



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2023 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Kvalitet analyse av RT-PPP**

Quality analysis of RT-PPP

Grétar Geir Ásgeirsson  
M-GEOM





# Forord

Denne avhandlingen markerer avslutningen på mine fem år ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU). Disse fem årene har gitt meg mange gode minner, bekjentskaper og gode fagkunnskaper. En stor takk til fem uforglemmelige år går til medstudenter og forelesere på NMBU.

Takk til veileder Ola Øvstedal for veiledning, innspill og råd knyttet til oppgaven underveis. En stor takk må også rettes til Rolf Knoph fra Blinken AS og Leif Morten By fra Fugro for lån av utstyr og tjenester, samt støtte rundt alt det tekniske underveis. I tillegg må Sveinung Himle fra Kartverket få ros for raske svar på mail i forbindelse med bruk av transformasjonsbiblioteket Proj.

Stor takk til familie og venner som har bidratt med omsorg og omtanke i hektiske og stressende perioder underveis i skrivningen.

*Grétar Geir Ásgeirsson*  
*Ás, 15 mai 2022*

# Abstract

This master's thesis deals with the field of geomatics and deals with a quality analysis of the RT-PPP services G4 and G4+ from Fugro and Starpoint Pro from Topcon. The purpose of the task is to look at the quality measures of the real-time solutions for a well-suited point, a medium-well-suited point and a poorly-suited point in terms of obstructions in Ås. In addition, it was investigated whether different obstacles in line of sight to the geostationary satellite for receiving corrections in the RT-PPP solution has an impact on the quality measures. The analyzes contain quality measures for formal accuracy, RMS, standard deviation and external reliability. For obstruction in line of sight to a geostationary satellite, the parameters for signal quality and age of the last correction message received have been studied.

The results from the analysis show that the poorly suitable point K004 is demanding to measure for all the services, where all the services received a measurement with interrupted convergence at that point. A convergence time of 30 minutes is required to achieve good precision. The best consistent accuracy and precision of the entire measurement series for all independent measurements and services, NMB1 did best, P102 second best and K004 worst. In order to achieve RMS and standard deviation below 20 cm for all the services and points, a convergence time of 55 minutes was required in plan and height. The biggest error in the ground plan is 5 cm and 21 cm in height after 55 minutes. Starpoint had a longer convergence time in the first 5 minutes weighed against the quality measures compared to G4 and G4+. A necessary convergence time to meet area types 3b and 4 in the location standard of 0.50 meters in plan and height for all services is 30 minutes. Area types 1, 2 and 3a of 0.10 meters were fulfilled after 55 minutes. A long convergence time is required to determine new coordinates according to the standard in the property norm.

The quality measures of G4 and G4+ were not representative of various obstacles in the line of sight to its geostationary satellite Alphasat, due to its large inclination angle of 2.8 degrees, which gives a different elevation angle during the day. Starpoint, on the other hand, received worse quality measures for increased degree of obstruction in line of sight for its geostationary satellite Eshail 1. The formal accuracy figures, RMS and standard deviations between the measurements and external reliability make it worse for all its convergence times for increased obstruction in line of sight.

# Sammendrag

Denne masteroppgaven omhandler fagområdet geomatikk og tar for seg en kvalitet analyse av RT-PPP tjenestene G4 og G4+ til Fugro og Starpoint Pro til Topcon. Hensikten med oppgaven er å se på kvalitetsmålene til sanntidsløsningene for et godt egnet punkt, et middels godt egnet punkt og et dårlig egnet punkt mht. obstruksjoner i Ås. I tillegg ble det undersøkt om ulik hindring i sikt til geostasjonær satellitt for mottakelse av korreksjoner i RT-PPP løsningen har en påvirkning på kvalitetsmålene. Analysene inneholder kvalitetsmål for formell nøyaktighet, RMS, standardavvik og ytre pålitelighet. For hindring i sikt til geostasjonær satellitt er parameterne for signalkvalitet og alder på siste mottatte korreksjonsmelding studert.

Resultatene fra analysen viser at det dårlige egnede punktet K004 er krevende å måle for alle tjenestene, hvor alle tjenestene fikk en måling med avbrutt konvergens i det punktet. Det er nødvendig med en konvergenstid på 30 minutter, for å oppnå en god presisjon. Den beste sammenhengende nøyaktigheten og presisjonen til hele måleserien for alle uavhengige målingene og tjenestene, er det NMB1 som gjorde det best, P102 nest best og K004 dårligst. For å oppnå RMS og standardavvik under 20 cm for alle tjenestene og punktene var det nødvendig med en konvergenstid på 55 minutter i grunnriss og høyde. Den største feilen i grunnriss er på 5 cm og 21 cm i høyde etter 55 minutter. Starpoint hadde lengre konvergenstid de første 5 minuttene veid opp mot kvalitetsmålene i forhold til G4 og G4+. En nødvendig konvergenstid for å oppfylle områdetypene 3b og 4 i stedfestingsstandard på 0.50 meter i grunnriss og høyde for alle tjenestene er på 30 minutter. Områdetypene 1, 2 og 3a på 0.10 meter var oppfylt etter 55 minutter. Det er nødvendig med en lang konvergenstid til å bestemme nye koordinater i henhold til standarden i eiendomsnormen.

Kvalitetsmålene til G4 og G4+ var ikke representative for ulike hindringer i sikt til sin geostasjonær satellitt Alphasat, grunnet dens store inklinasjonsvinkel på 2.8 grader, som gir ulik elevasjonvinkel på døgnet. Starpoint derimot fikk dårligere kvalitetsmål for økende grad av hindring i sikt til sin geostasjonære satellitt Eshail 1. De formelle nøyaktighetstallene, RMS og standardavvikene mellom målingene og ytre påliteligheten gjør det dårligere for alle sine konvergenstider for økt hindring i sikt.

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrunn . . . . .	1
1.2	Problemstilling . . . . .	2
1.3	Oppgavens Struktur . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>4</b>
2.1	Innføring i GNSS . . . . .	4
2.1.1	Kodemålinger . . . . .	6
2.1.2	Fasemålinger . . . . .	7
2.1.3	GNSS segmenter . . . . .	8
2.1.4	GNSS konstellasjoner . . . . .	9
2.1.5	Metoder for satellittbasert posisjonsbestemmelse . . . . .	15
2.1.6	Ionosfæren . . . . .	18
2.1.7	Multipath . . . . .	19
2.2	Presis enkeltpunktstedfesting (PPP) . . . . .	20
2.2.1	RT(S)-PPP . . . . .	23
2.2.2	Ulike RT-PPP-teknologier . . . . .	24
2.2.3	Fugro Starfix G4 & G4+ . . . . .	26
2.2.4	Starpoint Pro . . . . .	27
2.2.5	Galileo Høy Nøyaktighet System (HAS) . . . . .	28
2.3	Geostasjonær bane . . . . .	30
2.3.1	ALPHASAT & ES'HAIL 1 . . . . .	30

2.3.2	Elevasjonsvinkel til geostasjonære satellitter . . . . .	32
2.3.3	Elevasjonsvinkler til satellitt i GEO anvendt i Norge . . . . .	33
2.4	Kvalitetsmål . . . . .	35
2.4.1	Standardavvik . . . . .	35
2.4.2	Normalfordeling . . . . .	36
2.4.3	Presisjon og Nøyaktighet . . . . .	37
2.4.4	Distanse kvadratisk gjennomsnitt (DRMS) . . . . .	38
2.4.5	Pålitelighet . . . . .	39
2.4.6	Ukorrelerte observasjoner . . . . .	40
2.4.7	Integritet . . . . .	41
2.5	Proj . . . . .	41
2.6	Formater . . . . .	42
2.6.1	NMEA . . . . .	42
2.6.2	KOF . . . . .	44
2.6.3	LB-melding . . . . .	44
2.6.4	RINEX . . . . .	45
<b>3</b>	<b>Metode</b>	<b>46</b>
3.1	Måleutstyr . . . . .	46
3.2	Etablerte fasitkoordinater . . . . .	47
3.3	Transformere koordinater i Pyproj . . . . .	47
3.4	NMEA til KOF . . . . .	48
3.5	RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås . . . . .	48
3.5.1	Datainnsamling . . . . .	50
3.6	Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås . . . . .	51
3.6.1	Datainnsamling . . . . .	54
3.6.2	Predikerte elevasjonsvinkler . . . . .	54
3.6.3	LB til RINEX . . . . .	55
<b>4</b>	<b>Resultater</b>	<b>56</b>

4.1	RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås . . . . .	56
4.1.1	Formelle nøyaktighetstall . . . . .	56
4.1.2	Presisjon og nøyaktighet . . . . .	62
4.1.3	RMS & Standardavvik . . . . .	63
4.1.4	Ytre Pålitelighet . . . . .	70
4.1.5	GNSS kvalitetstall . . . . .	71
4.2	Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås . . . . .	72
4.2.1	Formelle nøyaktighetstall . . . . .	72
4.2.2	RMS & standardavvik . . . . .	74
4.2.3	Ytre pålitelighet . . . . .	75
4.2.4	Signal quality indicator . . . . .	76
4.2.5	Age of last message . . . . .	78
<b>5</b>	<b>Diskusjon</b>	<b>79</b>
5.1	RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås . . . . .	79
5.1.1	Formelle nøyaktighetstall . . . . .	79
5.1.2	Presisjon og nøyaktighet . . . . .	80
5.1.3	RMS & standardavvik . . . . .	81
5.1.4	Ytre pålitelighet . . . . .	82
5.1.5	GNSS kvalitetstall . . . . .	82
5.2	Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås . . . . .	83
5.2.1	Formelle nøyaktighetstall . . . . .	83
5.2.2	RMS & Standardavvik . . . . .	83
5.2.3	Ytre pålitelighet . . . . .	84
5.2.4	Signal Quality Identicator . . . . .	84
5.2.5	Age of last message . . . . .	84
5.3	Videre arbeid . . . . .	85
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b>	<b>86</b>
	<b>Referanser</b>	<b>87</b>

<b>Vedlegg</b>	<b>91</b>
<b>A Obstruksjonsplot</b>	<b>93</b>
<b>B Feltrapport</b>	<b>99</b>
B.1 Utstyrliste . . . . .	99
B.2 Feltlogg . . . . .	100
B.3 Måleskjema . . . . .	105
<b>C Resultater</b>	<b>107</b>
C.1 Ytre pålitelighet av fasilkoordinater . . . . .	107

# Figuroversikt

1.1	Oversiktskart over målte punkter med RT-PPP tjenestene i Ås. . . . .	2
2.1	Grunnlaget for satellittbasert posisjonering. . . . .	4
2.2	Avstandsmålingene vil inneholde klokkefeilen $\delta t_r$ og posisjonen til mot-takeren er krysningspunktet mellom de brune linjene (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 8). . . . .	5
2.3	Prinsippet bak pseudoavstandsmålinger (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 5). . . . .	5
2.4	Skisse av en ren sinuskurve som blir modulert til en bærebølge ved bruk av tofase-modulasjon (Rost, 2022a). . . . .	6
2.5	Prinsippet bak faseobservasjoner, med flertydigheten $N$ og faseforskjellen $\Delta\varphi$ (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 108). . . . .	7
2.6	Metoder for satellittbasert posisjonsbestemmelse og deres presisjon (Rost, 2022b). . . . .	17
2.7	Ionosfæren (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 12). . . . .	18
2.8	Multipath (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 155). . . . .	19
2.9	Illustrasjon av et PPP-system (Tallysman, 2023). . . . .	20
2.10	IGS sitt globale nettverk av RTS stasjoner (IGS, 2023b). . . . .	24
2.11	G4 sitt nettverk av referansestasjoner og dekningsområde for de åtte geostasjonære satellittene (Tegedor et al., 2017). . . . .	27
2.12	Systemelementene i Galileo HAS (“Galileo High Accuracy Service”, 2020). . . . .	30
2.13	Geostasjonær bane vs geosynkron bane. . . . .	30



2.14	Bilde av Geostasjonære kommunikasjonssatellitter. . . . .	31
2.15	Beregning av vinkler forutsatt sfærisk jord (Soler & Eisemann, 1994, s. 117). . . . .	32
2.16	Berening av asimutvinkel basert på hvilken kvadrant satellitten befinner seg i (Soler & Eisemann, 1994, s. 118). . . . .	33
2.17	Normalfordelingskurven (Toews., 2007). . . . .	36
2.18	Nøyaktighetsmål og presisjonsmål. . . . .	37
2.19	Indre og ytre pålitelighet. . . . .	40
3.1	Python funksjon for transformasjon med Pyproj fra ITRF14 til EUREF89. . . . .	48
3.2	Liten tekstsnett tatt fra NMEA-melding. . . . .	48
3.3	Liten tekstsnett tatt fra KOF-fil. . . . .	48
3.4	Bilder av målte punkter. . . . .	49
3.5	Oversiktskart over de brukte fastmerkene K004, NMB1 og P102. . . . .	50
3.6	Bilde fra nordsiden av NIBIO fasaden hvor punktene El20, El21 og El22 ble etablert. . . . .	51
3.7	Oversiktskart over de etablerte koordinatene El20, El21 og El22 foran den nordlige fasaden til NIBIO-bygningen. . . . .	52
3.8	Trukket rett linje mellom to punkt med høydeprofil verktøyet på høydedata.no for koordinatene i tabell 3.5. . . . .	52
3.9	Høydeprofil fra høydedata.no generert av trukket line i figur 3.8. . . . .	53
3.10	Trigonometrisk formel basert på vinkelen $x$ med endring i DTM og stativhøyde. . . . .	53
3.11	Plott som viser elevasjonsvinkler time for time for de geostasjonære satellittene Alphasat og Eshail 1 i Ås. Stiplet blå linje indikerer start og slutt på perioden av målingene, grønn linje er endring i timer og orange linje er endring i elevasjon, oppgitt i grader. . . . .	55
3.12	Innholdet i batch-filen. . . . .	55

4.1	Et søylediagram som viser standardavvik i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter. . . . .	61
4.2	Et søylediagram som viser standardavvik i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter. . . . .	61
4.3	1 sekund estimer (prikkene) for målingene med avbrutt konvergens. Plottene viser differanser i øst og nord og beregnede RMS-verdier og standardavvik i grunnriss. Rødt kryss (x) i origo er sann verdi fra CPOS-målinger og svart stjerne (*) er middel av estimatene. Fargeskalaen til høyre viser tiden det har gått for 1 sekund estimatene, oppgitt i minutter. . . . .	62
4.4	Midlede 1 sekund estimer for alle målingene til punktene og tjenestene. Plottene viser differanser i øst og nord og beregnede RMS-verdier og standardavvik i grunnriss. Rødt kryss (x) i origo er sann verdi fra CPOS-målinger og svart stjerne (*) er middel av estimatene. Fargeskalaen til høyre viser tiden det har gått for 1 sekund estimatene, oppgitt i minutter. . . . .	63
4.5	Et søylediagram som viser standardavvik for øst- og nordkomponenten ( $G4_E$ , $G4_N$ , $G4_{E+}$ , $G4_{N+}$ , $Starpoint_E$ , $Starpoint_N$ ) til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. . . . .	64
4.6	Et søylediagram som viser RMS for øst- og nordkomponenten ( $G4_E$ , $G4_N$ , $G4_{E+}$ , $G4_{N+}$ , $Starpoint_E$ , $Starpoint_N$ ) til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, i centimeter. . . . .	64
4.7	Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ , $G4_{RMS+}$ , $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ , $G4_{std+}$ , $Starpoint_{std}$ ) i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. . . . .	66
4.8	Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ , $G4_{RMS+}$ , $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ , $G4_{std+}$ , $Starpoint_{std}$ ) i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. . . . .	68

4.9	Ytre pålitelighet i grunnriss til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter. . . . .	70
4.10	Ytre pålitelighet i høyde til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter. . . . .	70
4.11	Prosentvis fordeling av de ulike GNSS kvalitetstallene (1, 2, 4, 5) for de ulike tjenestene og punktene. . . . .	71
4.12	Fordelingen av GNSS kvalitetstallene (1, 2, 4, 5) for de målingene som gjorde det dårligst med hensyn til de formelle nøyaktighetstallene, se delkapittel 4.1.1. . . . .	71
4.13	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El20. . . . .	72
4.14	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El21. . . . .	73
4.15	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El22. . . . .	73
4.16	Et søylediagram som viser standardavvik i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter. . . . .	74
4.17	Et søylediagram som viser standardavvik i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter. . . . .	74
4.18	Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ , $G4_{RMS+}$ , $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ , $G4_{std+}$ , $Starpoint_{std}$ ) i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. .	75

4.19	Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ , $G4_{RMS+}$ , $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ , $G4_{std+}$ , $Starpoint_{std}$ ) i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. . . . .	75
4.20	Ytre pålitelighet i grunnriss til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter. . . . .	76
4.21	Ytre pålitelighet i høyde til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter. . . . .	76
4.22	Plott av parameteren for signalkvalitet for alle de uavhengige målingene (1, 2, 3, 4) til punktene mot tiden i minutter, oppgitt i desibel (dB). . . . .	77
4.23	Alder på siste mottatte korreksjonsmelding oppgitt i sekunder (s) plottet mot tiden i minutter for de uavhengige målingene (1, 2, 3, 4). . . . .	78
A.1	Obstruksjonsplott av K004. . . . .	93
A.2	Label til alle obstruksjonsplottene. . . . .	94
A.3	Obstruksjonsplott av P102. . . . .	94
A.4	Obstruksjonsplott av NMB1. . . . .	95
A.5	Obstruksjonsplott av El22. . . . .	96
A.6	Obstruksjonsplott av El21. . . . .	97
A.7	Obstruksjonsplott av El20. . . . .	98
B.1	Nyetablerte koordinatene El20, El21 og El22. . . . .	100
B.3	Bilder av punktet P102. . . . .	102
B.4	Bilde av punkt K004. . . . .	102
B.5	Bilder foran nordsiden av NIBIO fasaden. . . . .	103
B.6	Bilde av punkt P102 etter at det har snødd. . . . .	103
B.7	Bilde foran NIBIO fasaden. . . . .	104

# Tabelloversikt

2.1	Generasjonssatellittene til GPS (NOAA, 2023). . . . .	10
2.2	Oversikt over de ulike båndene til GPS (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 207). . . . .	11
2.3	Oversikt over de ulike signalene til GLONASS (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 226 & s. 232). . . . .	12
2.4	Oversikt over de ulike båndene for Galileo (Subirana et al., 2013, s. 32). . . . .	13
2.5	Operative satellitter i BeiDou konstellasjonen (30.03.2023) (“Test & Assessment Research Center”, 2023). . . . .	13
2.6	Oversikt over båndene i BeiDou II (Subirana et al., 2013, s. 36). . . . .	14
2.7	Oversikt over båndene i BeiDou III (Subirana et al., 2013, s. 36). . . . .	14
2.8	Oversikt over ulike feilkilder til PPP, hvor verdier for størrelse og usikkerhet er avhengig av situasjon og er kun tilnærminger (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 727). . . . .	21
2.9	IGS sine produkter for GPS (IGS, 2023a). . . . .	23
2.10	Ulike IGS produkter, deres formater og frekvenser (Caissy et al., 2012). . . . .	23
2.11	Ulike PPP-teknologier (EUSPA, 2019, s. 18-19). . . . .	25
2.12	Sammendrag av tilgjengelige teknologier til posisjonering med GNSS (EUSPA, 2019, s. 13-14). . . . .	26
2.13	Beskrivelse av PPP løsningene til Starpoint Pro (Topcon, 2022). . . . .	28
2.14	Ytelse for Tjenestenivå 1 og Tjenestenivå 2 når det er fullt operativt (“Galileo High Accuracy Service”, 2020). . . . .	29

2.15	Dagens baneparametre til Alphasat og Eshail (10.04.2023) (N2YO, 2023a, 2023b; Wikipedia, 2022, 2023).	31
2.16	Beregnete elevasjonsvinkler til geostasjonær satellitt ( $\Phi_s = 0$ grader) for ulike stasjoner med varierende breddegrad under betingelsen $\lambda = \lambda_s$ . Gult indikerer Norges utstrekning i breddegrader inklusiv Svalbard.	34
2.17	Beregnete elevasjonsvinkler til Alphasat og Eshail 1 ( $\Phi_s = 0$ grader) oppgitt i grader for ulike stasjoner i Norge under betingelsene $\lambda_{\text{alphasat}} = 24.9$ grader, $\lambda_{\text{Eshail1}} = 25.5$ grader. Gult indikerer stedet der målingene av koordinatene foregikk i denne avhandlingen.	35
2.18	Kvalitetstall i grunnriss.	39
2.19	Anbefalte PPP-perioder for ulike nøyaktigheter i grunnriss (Abou-Galala et al., 2018).	39
2.20	Krav til ytre pålitelighet ved stedfesting av matrikkelenehtsgrenser for forskjellige områdetyper (“Alle eiendomsgrenser i matrikkelen har god nøyaktighet”, 2021).	40
2.21	Beskrivelse av innhold i NMEA-strengene GGA & GST (Trimble, 2023). Brukte felt i analysen er markert i grønt.	43
2.22	Beskrivelse av GNSS kvalitetstall feltet i GGA-strengen.	43
2.23	Eksempel på 05 koordinatblokk.	44
2.24	Eksempel på 44 måleblokk.	44
2.25	Beskrivelse av innholdet i LB-meldingen. Meldingene logget av Topcon mottakeren og brukt i analysen er markert i grønt.	44
3.1	Oversiktstabell over brukt utstyr fra Topcon og Fugro.	46
3.2	Fasitkoordinater fra CPOS-målinger i punktene K004, P102 og NMB1, oppgitt nord- og østkoordinater i EUREF89 UTM32 og NN2000-høyder samt tilhørende standardavvik.	47
3.3	Fasitkoordinater fra CPOS-målinger i punkt El20, EL21 og El22, oppgitt nord- og østkoordinater i EUREF89 UTM32 og NN2000-høyder samt tilhørende standardavvik.	47

3.4	Datainnsamling for alle tjenestene. . . . .	50
3.5	Nord- og østkoordinater oppgitt i EUREF89 UTM33N. . . . .	52
3.6	Verdier som gir ønskede vinkler $x$ . . . . .	54
3.7	Datainnsamling for alle tjenestene. . . . .	54
4.1	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4 og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens. . . . .	57
4.2	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4+ og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens. . . . .	58
4.3	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4+ og punktet P102. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens. . . . .	59
4.4	Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten Starpoint og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens. . . . .	60
4.5	Tabell over RMS ( $RMS_E$ , $RMS_N$ ) verdier, standardavvik ( $sE$ , $sN$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten til øst- og nordkomponenten for både alle tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens. . . . .	65
4.6	Største avvikene fra RMS verdiene ( $E_{max}$ , $N_{max}$ ) og standardavvikene ( $sE_{max}$ , $sN_{max}$ ) til øst- og nordkomponenten for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens. . . . .	65

4.7	Tabell over RMS ( $RMS_{gr}$ ) og standardavvik ( $s_{gr}$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten i grunnriss for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt: Avbrutt konvergens. . . . .	67
4.8	Største avvikene fra RMS verdiene ( $Gr_{max}$ ) og standardavvikene ( $sGr_{max}$ ) i grunnriss for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt: tidspunktet med avbrutt konvergens. . . . .	67
4.9	Tabell over RMS ( $RMS_h$ ) og standardavvik ( $s_h$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten i høyde for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens. . . . .	69
4.10	Største avvikene fra RMS verdiene ( $h_{max}$ ) og standardavvikene ( $sh_{max}$ ) i høyde for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens. . . . .	69
B.1	Måleskjemaer for P102, NMB1 og K004 for posisjonstjenestene G4, Starpoint Pro og G4+. Måletid lik 1 time. . . . .	105
B.2	Måleskjemaer for El20, El21 og El22 for posisjonstjenestene G4, Starpoint Pro og G4+. Måletid lik 10 min. . . . .	106



# Akronymer

**AR** Ambiguity Resolution  
**ASCII** American Standard Code for Information Interchange  
**CDMA** Code-Division Multiple Access  
**CSSR** Compact-State Space Representation  
**DGNSS** Differential Global Navigation Satellite System  
**DRMS** Distance Root Mean Square  
**EPSG** European Petroleum Survey Group  
**ESA** European Space Agency  
**EU** European Union  
**FCB** Fractional Cycle Biases  
**FDMA** Frequency-division multiple access  
**GEO** Geostationary orbit  
**GLONASS** Global Navigation Satellite System  
**GNSS** Global Navigation Satellite System  
**GPS** Global Positioning System  
**HAS** Galileo High Accuracy Service  
**IGS** International GNSS Service  
**IGSO** Inclined Geosynchronous Orbit  
**JPL** Jet Propulsion Laboratory  
**KOF** Koordinat- og Observasjonsformat for Feltminner  
**MEO** Medium Earth orbit  
**NASA** National Aeronautics and Space Administration  
**NMEA** National Marine Electronics Association  
**NTRIP** Network Transport of RTCM via Internet Protocol  
**OSR** Observable Space Representation  
**PPP** Precise Point Positioning  
**PRN** Pseudorandom Noise  
**RINEX** Receiver Independant EXchange Format  
**RT** Real Time  
**RTCM** Radio Technical Commission for Maritime Services  
**RTK** Real-Time Kinematic  
**RTS** Real Time Service  
**SSR** State Space Representation  
**TEC** Total Electron Count  
**TLE** Two-line Element Set  
**UHD** Uncalibrated Hardware Delays  
**UPD** Uncalibrated Phase Delays  
**UTC** Universal Time Coordinated  
**VRS** Virtual Reference Station  
**WAAS** Wide Area Augmentation System

# Kapittel 1: Introduksjon

## 1.1 Bakgrunn

For tiden er det en betydelig økning i etterspørsel etter presis posisjonering i sanntid, som er kompatible med nye og eksisterende applikasjoner for selvkjørende biler, ubemannede luftfartøy, maritim farkost, automatisert landbruk og landmåling i fjerntliggende strøk.

De fire globale systemene i dag er amerikanske GPS, russiske GLONASS, eurpeiske Galileo og kinesiske BeiDou, de går ofte under betegnelsen "GNSS" eller "Global Navigation Satellite Systems" på engelsk, og globale navigasjonssatellittsystemer på norsk. To velkjente teknikker for posisjonering ved bruk av globale navigasjonssatellittsystemer, er teknikkene realtids kinematisk måling (RTK) og presis enkeltpunktstedfesting (PPP). Disse teknikkene har blitt brukt mye i applikasjoner som krever presis posisjonering. En posisjonering med nøyaktighet på centimeteren, med en initialiserings tid under 5 sekunder i sanntid, kan oppnås med RTK gjennom en dobbeltdifferanse faseflertydighetsløsning, bedre kjent på engelsk som "Ambiguity Resolution" (AR). Ytelsen til RTK er derimot svært avhengig av kommunikasjonsforbindelser med kort rekkevidde til en referansestasjon. Derimot er PPP i stand til å oppnå posisjoner med høy presisjon ved bruk av en enkelt GNSS-mottaker, som er mindre avhengig av referansestasjoner, men som krever en lang konvergenstid på 15 minutter eller lengre.

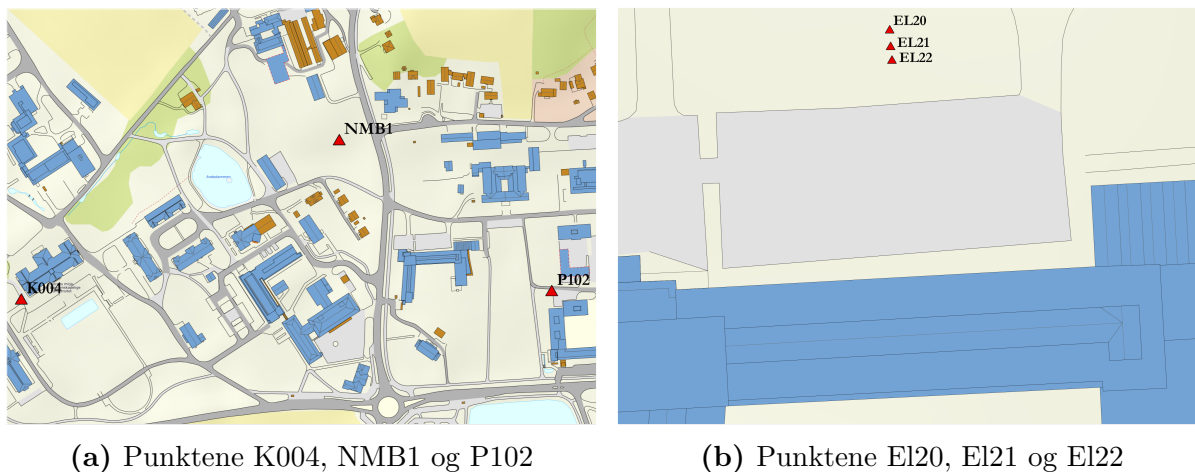
Utviklingen av PPP går tilbake til Anderle i 1976, men det var ikke før først på slutten av 1990-tallet at denne metoden ble forsket videre på av National Aeronautics and Space Administration (NASA) i deres Jet Propulsion Laboratory (JPL). De to neste tiårene ble to-frekvent PPP grundig undersøkt og flere PPP programvarer utviklet. I diverse studier ble det funnet at centimeter presisjon er oppnåelig for etterprosesserte statiske data og desimeter presisjon for etterprosesserte kinematiske data. Med de fremskrittene gjort gjennom årene, har det kommet flere aktører på banen som tilbyr kommersielle PPP tjenester som et tillegg/alternativ til relative differensielle posisjonsteknikker i områder hvor tettheten av referansestasjoner ikke strekker til.

I den tradisjonelle PPP-løsningen blir det brukt flertydige fasemålinger som krever at faseflertydighetene for alle satellittene estimeres i ligningssystemet. Feil i både mottakerens og satellittens klokke som et resultat, gjør at faseflertydighetene til udifferensierte fasemålinger ikke har integer-egenskaper. Derimot er det flere studier som har vist de siste årene hvordan det er mulig å løse heltalls faseflertydighetene ved hjelp av GPS, som inkluderer at kode og fase feilene gis som input til PPP algoritmen i et justert nettverk i sanntid.

Disse sanntids PPP løsningene blir ofte kalt "realtime"-PPP (RT-PPP) i litteraturen. De

nyeste RT-PPP-tjenestene har tatt i bruk multi-GNSS og multi-frekvenser for å oppnå integer-egenskap raskere. Fugro var første på banen med sin globale tofrekvente RT-PPP-L1/L2 tjenesten G2, som støttet både GPS og GLONASS i 2009. Etter den raske GNSS-utviklingen, har systemet senere lagt til støtte for BeiDou i 2015 og Galileo i 2016, for å bli en G4 tjeneste som støtter alle de globale GNSS-systemene.

I forbindelse med den raske utviklingen av RT-PPP, er det interessant å se på ytelsen av dagens RT-PPP tjenestene til Topcon og Fugro. Statistiske målinger med Topcon sin tjeneste Starpoint Pro og Fugro sine G4 og G4+, ble gjort i punktene K004, NMB1, P102, EL20, EL21 og EL22 i Ås, som vist i figur 1.1.



**Figur 1.1:** Oversiktskart over målte punkter med RT-PPP tjenestene i Ås.

## 1.2 Problemstilling

Hovedformålet i denne avhandlingen er å se på ulike kvalitetsmål av RT-PPP tjenestene til Topcon og Fugro for ulike konvergenstider i Ås. Oppgaven er todelt inn i en RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås for punktene i figur 1.1a og en analyse av ulik hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås for punktene i figur 1.1b. Følgende problemstillinger ble konkretisert på forhånd:

1. Hvilke kvalitetsmål klarer tjenestene å oppnå for de ulike konvergenstidene 5, 15, 30, 55 og 60 minutter?
2. Vil en ulik hindring i sikt til geostasjonær satellitt for mottakelse av korreksjoner i RT-PPP løsningen ha en påvirkning på kvalitetsmålene?

I RT-PPP kvalitet analysen av tre punkt i Ås, ble tre punkter valgt: et godt egnet punkt, et middels godt egnet punkt og et dårlig egnet punkt mht. obstruksjoner. 1 time uavhengige måleserier ble gjort fire ganger i alle punktene. I tillegg er det interessant å sammenligne de målte posisjonene med RT-PPP fra de etablerte CPOS fastkoordinatene.

For ulik hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås, ble tre punkt etablert foran nordsiden av fasaden til NIBIO. De tre punktene hadde ulike hindringer i sikt til geostasjonære satellittene Alphasat og Eshail 1, med elevasjonsvinklene 20, 21 og 22 grader. 10 min uavhengige måleserier ble gjort fire ganger i alle punktene. I tillegg er det interessant å sammenligne de målte posisjonene med RT-PPP fra de etablerte CPOS fastkoordinatene

## 1.3 Oppgavens Struktur

Denne avhandlingen består av seks kapitler, med introduksjonen. I tillegg er bibliografi og vedlegg lagt til bakerst. Hvert kapittel beskriver forskjellige aspekter ved oppgaven. Dette er for å gi leseren en veiledning om hvordan oppgaven bør leses og dermed kommer en kort beskrivelse av hvert kapittel nedenfor.

Kapittel 2 tar for seg teoriene og alle konseptene brukt i denne oppgaven. Flere grunnleggende prinsipper blir beskrevet for å danne et grunnlag for teorien.

Kapittel 3 tar for seg metodene som er brukt i denne oppgaven. Denne beskrivelsen inneholder metoder for datainnsamling.

Kapittel 4 tar for seg resultatene av analysene utført i denne oppgaven.

Kapittel 5 tar for seg diskusjon rundt resultatene av kapittel 4.

Kapittel 6 tar for seg oppsummering av hovedaspektene ved denne oppgaven.

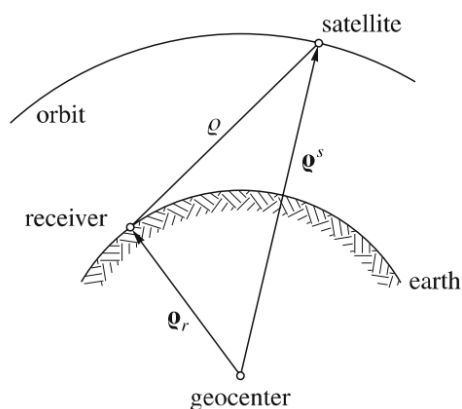
# Kapittel 2: Teori

## 2.1 Innføring i GNSS

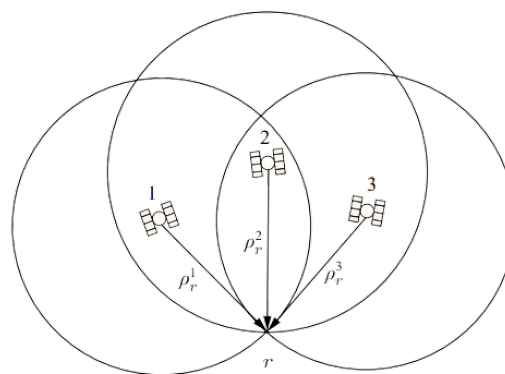
Globalt navigasjonssatellittsystem (GNSS), bedre kjent som "Global Navigation Satellite System" på engelsk, i dagligtalen ofte omtalt som GPS, er prinsippet bak satellittbasert posisjonering vha. satellittsystemer. Satellittbasert posisjonering er bestemmelse av posisjoner fra observerte steder på land, til havs, i luften og i rommet vha. satellitter.

Operative satellitter gir brukeren muligheten til å bestemme posisjonen sin uttrykt ved breddegrad, lengdegrad og høyde. Dette kan utføres ved å bestemme avstanden  $\rho$ , ved å måle signalets gangtid mellom mottaker og satellitt, som vist i figur 2.1a. Den tiden signalet forplanter seg fra satellitt til mottaker med lyshastigheten gir ut avstanden signalet har reist. Avstandsmålinger mellom mottaker og satellitt kalles ofte for pseudoavstand i satellittgeodesien.

Ved at posisjonsvektoren til satellitten  $\rho^s$  er kjent, og samme satellitt måler avstanden  $\rho$ , er det mulig å bestemme posisjonsvektoren til mottakeren  $\rho_r$ . For å oppnå en tredimensjonal posisjonsbestemmelse er det nok med tre ukjente  $(x, y, z)$  til å danne akkurat tre ligninger for et løsbart system i teorien. For å danne tre ligninger behøves det avstandsmålinger fra minst tre satellitter, hvor hver måling gir en sirkel med satellitten i sentrum (se figur 2.1b). Posisjonen til mottakeren vil da være i skjæringspunktet mellom satellittenes tre utspente sirkler. Denne metoden kalles for "trilaterasjon" i litteraturen, der kun avstandsmåling benyttes.



(a) Illustrert geometri (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 4)



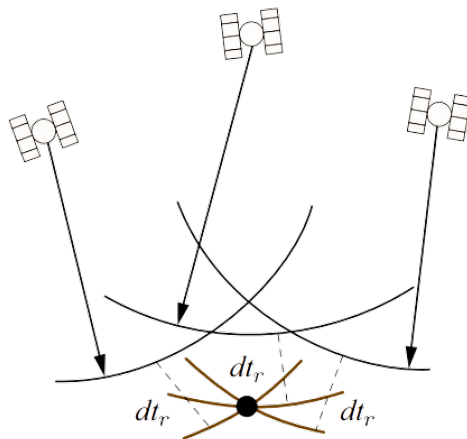
(b) Trilaterasjon (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 7)

**Figur 2.1:** Grunnlaget for satellittbasert posisjonering.

Avstanden mellom satellitt og mottaker er gitt ved formelen

$$\rho = \|\rho^s - \rho_r\| \quad (2.1)$$

For å få nøyaktige posisjoner er det ikke nok med tre satellitter i ligningssystemet. Mottakerens klokke avviker fra sann systemtid, som medfører at den målte avstanden vil være forskjellig fra den sanne geometriske avstanden. Figur 2.2 viser hvor posisjon vil forplante seg når klokkefeilen til mottakeren er estimert.

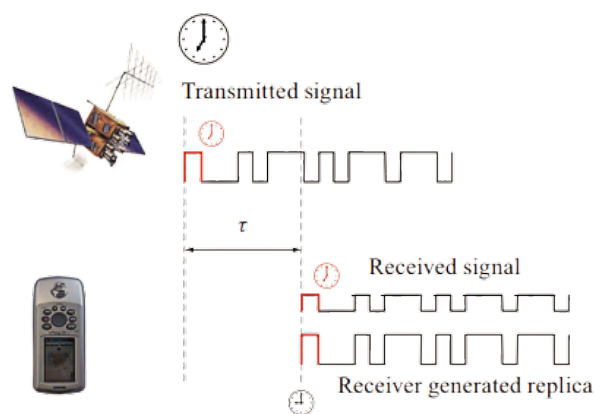


**Figur 2.2:** Avstandsmålingene vil inneholde klokkefeilen  $\delta t_r$  og posisjonen til mottakeren er kryssningspunktet mellom de brune linjene (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 8).

Klokkefeilen til mottakeren er en signifikant feilkilde som må estimeres i ligningssystemet. Det nye ligningssystemet vil inneholde fire ukjente  $(x, y, z, \delta t_r)$ , som betyr at det trengs avstandsmålinger fra fire satellitter for at systemet skal være entydig og løsbart. Avstanden  $R$  vil da være

$$R = \rho + c \delta t_r \quad (2.2)$$

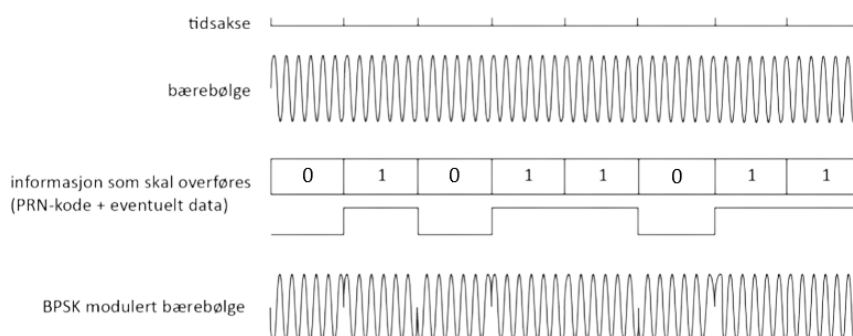
hvor  $c$  er lyshastigheten og  $\delta t_r$  er klokkefeilen i mottakeren. Årsaken til at denne avstanden  $R$  ofte kalles "pseudoavstander" (pseudos: falsk på gresk) er fordi avstandene måles av en tidsmåling som inneholder en feilkilde. Ligning 2.2 tar ikke hensyn til alle feileddene. Ved å bestemme tids- og faseforskyvningen mellom satellittens utsendte signal og det mottatte signalet i mottakeren, trengs det et karakteristisk replikasignal som mottakeren klarer å gjenkjenne. Teknikkene for å bestemme disse avstandene er inndelt i kode- og fasemålinger.



**Figur 2.3:** Prinsippet bak pseudoavstandsmålinger (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 5).

## 2.1.1 Kodemålinger

Teknikken som benyttes i kodemåling tar i bruk koder til å sendte signalet, ved å modulere informasjon på bærebølgen. Disse kodene er bedre kjent fra forkortelsen PRN eller "Pseudorandom Noise" på engelsk, som er en sekvens av komplekse binære tall bestående av 0'ere og 1'ere. Den vanligste modulasjonsteknikken innen fagfeltet er en såkalt tofase-modulasjon, bedre kjent som "Binary Phase-shift" (BPSK) på engelsk. Hver endring i den binære koden, tilsvarer et 180 graders faseskift eller faseforskjell på bærebølgen, som vist i figur 2.4.



**Figur 2.4:** Skisse av en ren sinuskurve som blir modulert til en bærebølge ved bruk av tofase-modulasjon (Rost, 2022a).

Den viktigste informasjonen i kodene er tidspunktet signalet forlot satellitten. Gangtiden til signalet avgjøres ved å korrelere den utsendte koden fra satellitten, med det genererte replika-signalet i mottakeren. Kopien av signalet skyves fram til den største korrelasjon mellom signalene oppnås, og gir ut verdien for tidsskiftet. Figur 2.3 viser konseptet.

Bærebølgen vil ikke kun inneholde PRN-kodene, en modulasjon av navigasjonsdata kommer i tillegg. Med en frekvens på 50 Hz, moduleres dataene til den kringkasta navigasjonsmeldingen på bærebølgen. Denne meldingen vil inneholde nyttig informasjon om satellittens posisjon og gjør det mulig å bestemme posisjon i sanntid.

Oppsummert basert på informasjonen ovenfor er det mulig å bestemme pseudoavstander basert på to klokker med sine representative avvik gitt i systemtiden. Satellittene har presise atomur ombord, som inneholder klokkefeil en brøkdel av mottakerens. Observasjonslikningen for kodemålinger inklusive feiledd er gitt ved

$$R = \rho_r^s + c (\delta t_r - \delta t_s) + T_r^s + I_r^s + \epsilon_r^s \quad (2.3)$$

,  $\rho_r^s$  er geometrisk avstand,  $c$  er lyshastigheten,  $\delta t_r$  er mottakerens klokkefeil,  $\delta t_s$  er satellittens klokkefeil,  $T_r^s$  er ionosfæreforsinkelse,  $I_r^s$  er troposfæreforsinkelsen og  $\epsilon_r^s$  er umodellerte feil, multipath og mottakerstøy blant annet.

Kodemålingene vil inneholde forskjellige chiprater for de ulike utsendte signalene. Systemet for GPS benytter seg av kodene C/A og P med chipratene 1.023 Mbit/s og 10.23 Mbit/s. Dette gir en chiplengde på 300 og 30 meter for signalene, med en presisjon på 3 og 0.3 meter.

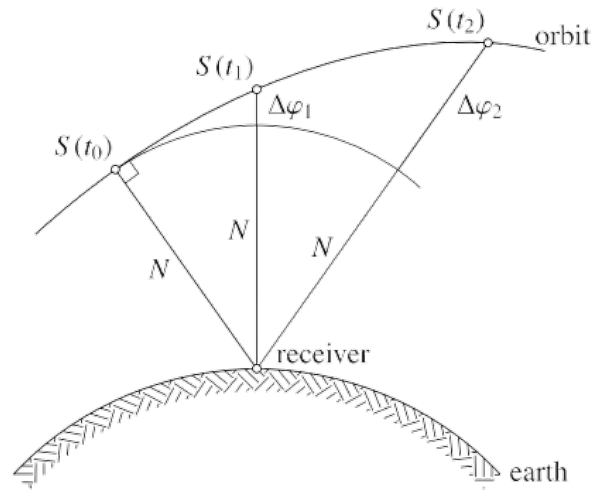
## 2.1.2 Fasemålinger

Den andre teknikken for å bestemme avstander, er å observere faseforskjellen til bærebølgen. Ved det samme prinsippet som foregår i kodemålingene, der mottakeren generer et replikasignal som mottas fra satellitten. Med mottatt signal  $\phi^s$  og generert signal  $\phi_r$ , vil den endelige ligningen for fasemålingene være gitt ved (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 107)

$$\Phi = \frac{\rho}{\lambda} + \frac{c}{\lambda}(\delta t_r - \delta t^s) + N \quad (2.4)$$

Fasemålingene er tvetydige som betyr at mottakeren kun klarer å måle en brøkdel av bølgelengden. En fasemåling blir ofte sammenlignet med å dra et målebånd fra mottakeren til satellitt, der metermerkene på den første delen er borte, mens den aller siste delen av båndet kan brukes til målinger.

Dermed må faseflertydigheten  $N$  bestemmes for å få den totale avstanden. Faseflertydigheten er heltallig og holder seg konstant over tid ved uavbrutte fasemålinger. I det øyeblikket fasebrudd forekommer, må denne verdien bestemmes på nytt. Figur 2.5 illustrerer prinsippet bak fasemålinger, hvor faseflertydigheten  $N$  holder seg permanent ved uavbrutte målinger, mens den målte faseforskjellen  $\Delta\varphi$  vil variere med tiden.



**Figur 2.5:** Prinsippet bak faseobservasjoner, med flertydigheten  $N$  og faseforskjellen  $\Delta\varphi$  (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 108).

Fordelen med fasemålinger fremfor kodemålinger, er at de gir mer presise avstander grunnet sine korte bølgelengder. Disse korte bølgelengdene ligger mellom 19 og 25 cm, som gir signifikant høyere tidssoppløsning sammenlignet med en kodeobservasjon. Ved å Multiplisere ligning (2.4) med bølgelengden, samt inkludere flere feilkilder er ligningen for faseobservasjoner oppgitt i enhet meter som

$$\Phi = \rho_r^s + c(\delta t_r - \delta t^s) + T_r^s - I_r^s + \lambda N_r^s + \epsilon_r^s \quad (2.5)$$

hvor geometrisk avstand, klokkefeil i satellitt og mottaker, og troposfæren er lik med kodemålingene. Ionosfæren har motsatt fortegn her.  $N_r^s$  er den ukjente faseflertydigheten i antall hele bølgelengde mellom mottaker og satellitt oppgitt i enhet meter.  $\epsilon_r^s$  er støy på faseobservasjonen, multipath og andre effekter.



### 2.1.3 GNSS segmenter

I litteraturen deles de forskjellige GNSS-systemene oftest inn i tre segmenter. Hvert segment har sin egen funksjon i driften av systemet. Alle de ulike systemene opererer etter disse segmentene, men varierer i noen grad når det kommer til funksjonalitet og oppsett innad segmentene.

#### Romsegmentet

Romsegmentet tar for seg satellittene som opererer i bane rundt jorden i et bestemt system, og blir ofte omtalt som satellittkonstellasjonen. Dette essensielle segmentet er fundamentet bak alle avstandsmålinger som foregår i en GNSS-mottaker, og en posisjon kan bestemmes utifra kjentpunktene fra satellittene. I satellittkonstellasjonen er det bestemt at man må minst opprettholde siktlinje til fire satellitter uavhengig av sin plassering på jordkloden. En annen funksjon i romsegmentet er å erstatte satellitter som har fullført sin livssyklus med som oftest nye og bedre satellitter, som har mer avansert teknologi og lengre levealder.

#### Kontrollsegmentet

Kontrollsegmentet sin funksjon er å overvåke og kontrollere hele GNSS-systemet. Dette innebærer sporing av satellittene for å estimere satellittbaner og klokkefeil. Et felles kontrollcenter driver alle prosessene og et nettverk av bakkestasjoner brukes til å spore satellittene. Alle bakkeantennene laster deretter beregnede estimater fra kontrollcenteret opp til satellittene.

De essensielle oppgavene til bakkestasjonene er:

- Kontinuerlig satellittovervåking
- Kontroll av satellittene (banemanøvrer)
- Beregning av systemtiden
- Beregning og prediksjon av satellittbanene og oppførselen til satellittklokkene
- Regelmessig oppdatering av navigasjonsdataene til satellittene

#### Brukersegmentet

Brukersegmentet består av alle de forskjellige GNSS-mottakerne som brukes til måle posisjon. Med flere GNSS-systemer er brukerne i stand til å måle flere ulike pseudoavstander, alt ettersom hva mottakeren er kompatibel med. En rapport fra EUSPA i 2022, kom det frem at det fantes 6.5 milliarder GNSS-mottakere på verdensbasis i 2021 og kom med en prognose at i løpet av 2031 er tallet opp i 10.6 milliarder.

## 2.1.4 GNSS konstellasjoner

Ting innen GNSS er i rask og stadig utvikling. For tre tiår siden fantes det kun to operative systemer, GPS og GLONASS. I ettertid derimot, har det kommet to nye systemer inn på banen: Galileo og Beidou. Alle systemene følger de samme prinsippene, men skiller seg fra hverandre med hesnyn til rom- og kontrollsegmentet, samt formål om bruk. Hensikten med dette delkapittelet er å gi leseren en oversikt over den nåværende tilstanden til GNSS.

### GPS

GPS, eller ”Global Positioning System” på engelsk, er nok det mest kjente GNSS-systemet i verden i dag. Det ble utviklet og drevet av USAs forsvarsdepartementet fra 1973 og har vært fullt operativt siden 1995. Opprinnelig var GPS laget for militære formål, men sivil bruk av systemet har også vært et mål siden starten. Fokuset på sivil bruk har økt med tiden, og endret sammensetningen av rom- og kontrollsegmentet av GPS.

Den nåværende GPS-konstellasjonen består av 31 aktive satellitter fordelt på 6 ulike baneplaner. De 6 baneplanene har en inklinasjonsvinkel på 55 grader i forhold til ekvator. I tillegg til de 24 satellittene som trengs for å gi full dekning, er det beregnet med ekstra reserve satellitter for å sikre tilgjengeligheten til enhver tid.

GPS har utviklet generasjonene Block I, Block II, Block IIA, Block IIA, Block IIR, Block IIR-M, Block IIF, Block III/IIF så langt. Per dags dato er ingen satellitter fra block I, II og IIA fortsatt operative i sin bane. De ulike blokkene varierer i noen aspekter, som forventet levetid, vekt og funksjonalitet. Det mest interessante er diskutere utviklingen av de tilgjengelige tjenestene. En kort oversikt over endringene fra block til block er beskrevet under og vist i tabell 2.1.

Block IIR sendte opp sin første satellitt i 1997, med sivil C/A kode på L1 og militær P(Y) kode på L1 og L2. Disse satellittene har en forventet levetid på 7.5 år. Denne blokken har fortsatt 7 operative satellitter.

Block IIR-M sendte opp sin første satellitt i 2005, med et nytt militærsignal og et første sivil signal på den andre bærefrekvensen L2. Dette var en revolusjon for sivile brukere, GPS var nå kompatibel med sivile mottakere som støttet dobbelfrekvens. Dette åpnet en dør til forbedring i nøyaktighet av sivil posisjonsbestemmelse. Denne blokken har fortsatt 7 operative satellitter.

Block IIF sendte opp sin første satellitt i 2010, med et nytt og tredje signal L5. En tredje sivil kode sendes på denne frekvensen. Dette gjorde det mulig med flere lineære kombinasjoner. Denne blokken har 12 operative satellitter.

Block III sendte opp sin første satellitt i 2018, med et nytt og forbedret sivil signal på det første signalet L1. Det originale C/A signalet på L1 beholdes, for å opprettholde baklengs kompatibilitet for eldre enheter. Denne blokken har 5 operative satellitter.

**Tabell 2.1:** Generasjonssatellittene til GPS (NOAA, 2023).

BLOCK IIA	BLOCK IIR	BLOCK IIR-M	BLOCK IIF	GPS III/IIF
0 operative	7 operative	7 operative	12 operative	5 operative
C/A kode på L1-frekvensen	C/A kode på L1	Nytt sivilt signal på L2 (L2C)	Samme signalene til Block IIR-M	Samme signalene til Block IIF
P(Y) kode på L1 og L2	P(Y) kode på L1 og L2	Ny militær kode M	Tredje signal på L5	Fjerde sivile signal på L1 (L1C)
Levealder på 7.5 år	Levealder på 7.5 år	Levealder på 7.5 år	Bedre atomur og bedre signalstyrke og kvalitet	Bedre pålitelighet, presisjon og integritet
Skudd opp i 1990-1997	sendt opp i 1997-2004	Skudd opp i 2005-2009	Levealder på 12 år	Levealder på 15 år
Siste satellitt gikk ut av drift i 2019			Skudd opp i 2010-2016	Første skudd opp i 2018

## CDMA

Ettersom GNSS satellitter sender flere observasjonssignaler til mottakere, er det viktig at mottakeren er i stand til å adskille forskjellige signaler fra hverandre. GPS satellitter sender ut informasjon på de tre samme frekvensene. For å skille signalene fra hverandre har GPS, Galileo og BeiDou implementert teknikken CDMA, "Code-Division Multiple Access" på engelsk.

Med CDMA sender hver satellitt sin egen unike PRN kode, kodet med observasjons- og navigasjonsdata. Hver PRN-kode er bestemt slik at den har lav krysskorrelasjon med de andre. Dette gjør det mulig for mottakeren å trekke ut signalet fra en bestemt satellitt og holde det adskilt fra de andre. En fordel med CMDA er at alle satellittene bruker de samme frekvensene.

## Signaloversikt

Fra og med satellittene til Block IIF generasjonen, sender ut signaler på tre distinkte frekvenser eller bånd. Disse heter L1, L2 og L5. Disse båndene er kodet med flere PRN-koder. PRN-koder modulert på signalet vil variere fra satellitt til satellitt, basert på hvilken generasjon satellitten tilhører. Se tabell 2.2 for en oversikt over tilgjengelige bånd og koder.

**Tabell 2.2:** Oversikt over de ulike båndene til GPS (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 207).

Bånd	Frekvens (MHz)	$\lambda$ (cm)	PRN kode	Chiprate
L1	1575.42	19.0	P(Y)	10.23
			C/A	1.023
			L1C <sub>D</sub>	1.023
			L1C <sub>P</sub>	1.023
			M	5.115
L2	1227.60	24.4	P(Y)	10.23
			L2C <sub>M</sub>	0.5115
			L2C <sub>L</sub>	0.5115
			M	5.155
L5	1176.45	25.5	I5	10.23
			Q5	10.23

## GLONASS

GLONASS, eller ”Global Navigation Satellite System” er det russiske bidraget til GNSS. Utviklingen av GLONASS ble satt i gang på midten av 1970-tallet av den tidligere Sovjetunionen. Etter Sovjetunionens fall, ble utviklingen tatt over av den russiske føderasjonen. I likhet med GPS er GLONASS også et militært GNSS-system med sivile tjenester. Systemet var fullt operativt med 24 satellitter i 1995 (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 219).

I skrivende stund består GLONASS konstellasjonen av 24 operative satellitter, fordelt på 3 baneplan med en inklinasjonsvinkel på 64.8 grader (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 221). Tilsvarende med GPS, er nye generasjoner av satellitter fått utvidet funksjonalitet og levetid. En kort oversikt over satellittene til GLONASS er presentert nedenfor.

Den aller første satellitten til GLONASS var skudd opp i 1982, med båndene G1 og G2 (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 233). Forventet levetid på disse satellittene var 3 år.

I 2003 ble første generasjon satellittene erstattet av den moderniserte GLONASS-M serien. Forventet levetid på satellittene ble utvidet fra 3 år til 7 år. Det andre sivile signalet ble lagt til G2 og var de første sivile GNSS-systemet med to frekvenser (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 236)

GLONASS-K1 som ble først skudd opp i 2011, er den første generasjonen som sender signal på det nye CDMA-båndet ved 1202.025 MHz. Den nyeste generasjonen GLONASS-K2 har valgt å gå over til å ha tre CDMA-bånd og holdt på de to FDMA-båndene for å sikre baklengs kompatibilitet. I tillegg har de fått utvidet levetid på 10 år (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 234).

## FDMA

GLONASS brukte opprinnelige ikke CDMA for å adskille satellittsignalene fra hverandre. I starten brukte de teknikken FDMA, ”Frequency Division Multiple Access” på engelsk. Konseptet går ut på at hver satellitt har et sett med unike frekvenser, i motsetning til ulike koder. Hver satellitt er basert på et tildelt frekvensnummer  $k$ , hvor første og andre

bånd er gitt ved

$$\begin{aligned} f_1(k) &= 1602 + k \cdot 0.5625 \text{ MHz} \\ f_2(k) &= 1246 + k \cdot 0.4375 \text{ MHz} \end{aligned} \quad (2.6)$$

hvor  $k$  er hele tall mellom  $[-7, 6]$ . Siden det er færre frekvensnummer  $k$  enn det er antall satellitter, må bestemte satellitter dele nummer. Noen av de satellittene som deler baneplan, vil aldri være synlige for en mottaker samtidig og vil dermed kunne dele samme frekvensnummer.

**Tabell 2.3:** Oversikt over de ulike signalene til GLONASS (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 226 & s. 232).

Bånd	Frekvens (MHz)	$\lambda$ (cm)	PRN kode	Chiprate
G1	$1602 + 0.5625K$	18.7 (k=0)	G1O <sub>F</sub>	0.511
	$1602 + 0.5625K$	18.7 (k=0)	G1S <sub>F</sub>	5.11
	1600.995	18.7	G1O <sub>C</sub>	0.5115
	1600.995	18.7	G1S <sub>C</sub>	N/A
	1575.420	19.0	G1O <sub>CM</sub>	TBD
G2	$1246 + 0.4375K$	24.1 (k=0)	G2O <sub>F</sub>	0.511
	$1246 + 0.4375K$	24.1 (k=0)	G2S <sub>F</sub>	5.11
	1246.06	24.0	G2O <sub>C</sub>	0.5115
	1246.06	24.0	G2S <sub>C</sub>	N/A
G3	1202.025	24.9	G3O <sub>C</sub>	10.23
	1176.45	25.5	G3O <sub>CM</sub>	

<sup>1</sup> "O" : Open signal (standard precision)

<sup>2</sup> "S" : Obfuscated signal (high precision)

<sup>3</sup> "F" : FDMA

<sup>4</sup> "C" : CDMA

## Galileo

Systemet som er oppkalt etter den italienske astronomen Galileo Galilei, er et GNSS-system utviklet av og drevet av den europeiske romorganisasjonen ESA og EU-kommisjonen. I motsetning til GPS og GLONASS, er Galileo ment som et sivilt system. Motivasjonen bak utviklingen var å ha et uavhengig system. Galileo's virkemåte og oppbygging er svært likt GPS, og er kompatibel med forrige generasjonen av GLONASS og GPS.

Konstellasjonen til Galileo skal inneholde 30 satellitter, der 6 av dem er reserve satellitter. Disse er fordelt på 3 baneplan med en inklinasjonsvinkel på 56 grader i forhold til ekvator. En status fra 29.03.2023 er 28 satellitter i bane, hvor 22 er operative og 6 er tatt ut av drift.

Alle satellittene til Galileo sender ut signaler på 5 bånd. De tre første er E1, E5 og E6, videre er E5 delt inn båndene E5a og E5b. Galileo bruker CDMA teknikken på signalene sine. På hvert av båndene moduleres det signalkomponenter, hvor båndene E1 og E6 har

fått tildelt komponentene A, B og C. E5a- og E5b-båndet har fått tildelt komponentene I og Q. Hver komponent kan moduleres med både pseudoavstander og navigasjonsdata, eller bare utelukkende pseudoavstander. Den førstnevnte blir referert som data kanal, mens den andre omtales som en pilot kanal. En totaloversikt over bånd, frekvenser og kanaler er listet opp i tabell 2.4

**Tabell 2.4:** Oversikt over de ulike båndene for Galileo (Subirana et al., 2013, s. 32).

Bånd		Frekvens (MHz)		$\lambda$ (cm)		PRN kode	Kanal	Chiprate
E1		1575.42		19.0		E1-A	data	10.23
						E1-B	data	1.023
						E1-C	pilot	1.023
E5	E5a	1191.795	1176.45	25.2	25.5	E5a-I	data	10.23
	E5b		1207.14		24.8	E5b-I	data	
						E5b-Q	pilot	10.23
E6		1278.75		23.4		E6-A	data	5.115
						E6-B	data	
						E6-C	pilot	

## BeiDou

BeiDou er GNSS-systemet utviklet og drevet av folkerepublikken Kina. Den kinesiske regjeringen tok en avgjørelse om å implementere sitt eget uavhengige GNSS-system. BeiDou har gått gjennom tre faser, BeiDou I, BeiDou II og BeiDou III. Som GPS og GLONASS, er BeiDou også et militært system som tilbyr sivil bruk. Hele systemet sto ferdig i 2020, med 35 operative satellitter.

Romsegmentet til BeiDou avviker i oppsett i forhold til de andre GNSS-systemene. Konstellasjonen består ikke kun av satellitter i middels høye inklinerte baner (MEO). De har valgt å bruke tre forskjellige banetyper i systemet, en geostasjonær bane (GEO), inklinert geosynkron bane (IGSO) og MEO. Satellittene i MEO er fordelt over på tre baneplasser, som har en inklinasjonsvinkel på 56 grader. Den globale konstellasjonen til BeiDou skal bestå av tre GEO, tre IGSO og 24 MEO, i alt 30 satellitter. Per dags dato er det 27 operative MEO, 10 operative IGSO, 7 operative GEO og 1 GEO i testfasen. Se tabell 2.5 for en oversikt over informasjon om generasjon, type satellitt og deres status.

**Tabell 2.5:** Operative satellitter i BeiDou konstellasjonen (30.03.2023) (“Test & Assessment Research Center”, 2023).

Generasjon	BeiDou I	BeiDou II			BeiDou III		
Type	GEO	GEO	IGSO	MEO	GEO	IGSO	MEO
Operative	0	5	7	3	2	3	24
Testing	0				1	0	

<sup>1</sup> ”GEO” : Geostationary Orbit

<sup>2</sup> ”IGSO”: Inclined Geosynchronous Orbit

<sup>3</sup> ”MEO” : Medium Earth orbit

I likhet med GPS og Galileo, bruker BeiDou også CDMA for å separere satellittsignalene fra hverandre. Begge generasjonene til BeiDou er i bane i skrivende stund. Begge inneholder tre bånd, men har ulike frekvenser. En oversikt over de forskjellige PRN-kodene og kanalene som blir utsendt av BeiDou II og III er presentert i tabell 2.6 og 2.7. Legg merke til at kanalene med data inneholder både pseudoavstander og navigasjonsdata, mens pilot inneholder kun pseudoavstandene.

**Tabell 2.6:** Oversikt over båndene i BeiDou II (Subirana et al., 2013, s. 36).

Bånd	Frekvens (MHz)	$\lambda$ (cm)	PRN kode	Chiprate
B1	1561.098	19.2	B1-I B1-Q	2.046
B2	1207.14	24.8	B2-I B2-Q	2.046 10.23
B3	1268.52	23.6	B3	10.23

**Tabell 2.7:** Oversikt over båndene i BeiDou III (Subirana et al., 2013, s. 36).

Bånd	Frekvens (MHz)	$\lambda$ (cm)	PRN kode	Chiprate
B1	1575.42	19.0	B1-C data B1-C pilot B1	1.023 1.023 2.046
B2	1191.795	25.2	B2a data B2a pilot B2b data B2b pilot	10.23
B3	1268.52	23.6	B3 B3A data B3A pilot	10.23 2.5575 2.5575

## 2.1.5 Metoder for satellittbasert posisjonsbestemmelse

I dette avsnittet blir det ramset opp forskjellige metoder for satellittbasert posisjonsbestemmelse. Det er viktig å holde et skille mellom metodene og ha en fast terminologi å forankre seg til.

### Sanntidsmåling og etterprosessering

To begreper som brukes mye innen GNSS posisjonering er sanntidsmåling og etterprosessering. Sanntidsmåling innebærer at resultatene av målingene er tilgjengelige nesten umiddelbart i sanntid. Fordelen med sanntids GNSS er at resultatene kan bestemmes og brukes umiddelbart i felten. Dette egner seg godt i fagfeltet landmåling, hvor kvaliteten av målingene evalueres ute i felten, og ikke inne på kontoret i ettertid. Denne metoden er veldig effektiv og tidsbesparende. Sanntidsmåling er også helt essensielt for navigasjon. I sanntid er det kun mulig å motta kringkastede efemerider, som inneholder mindre nøyaktige banedata sammenlignet med de presise efemeridene.

Etterprosessering er en metode som innebærer at dataene behandles på et senere tidspunkt. Denne metoden egner seg ikke til navigasjonsformål. Fordelen er at dataene kan prosesseres med mer presise efemerider i ettertid, for å oppnå de mest nøyaktige resultatene. Dette er essensielt for applikasjoner som krever høyere kvalitetskrav enn det sanntidsdata kan tilby.

### Statiske og kinematiske målinger

Det finnes to forskjellige metoder som beskriver hvilken tilstand målingen har blitt tatt i, en statisk eller kinematisk tilstand. Det vil si om mottakeren har vært stille eller i bevegelse i løpet av måletiden. Hvis mottakeren står stille over en posisjon under hele måletiden, da vil alle epokene ha den samme ukjente posisjonsvektoren. Dette resulterer i at alle de utallige observasjonene som ble tatt i løpet av måletiden, er med på å estimere en felles posisjonsvektor. Desto lenger en mottaker for står i ro over et punkt, desto flere observasjoner er det i beregningen, som vil da øke presisjonen av estimatene.

Ved kinematisk posisjonering er mottakeren i bevegelse. Det vil si at det er en ny posisjonsvektor for hver målepoke. Denne metoden krever en større fysisk modell, som gjør at flere parametere må estimeres, som f.eks ved bruk av et kalmanfilter. Dette gjør at estimatene inneholder flere modellerte feilkilder, som vil gå ut over presisjonen.

### Absolutt GNSS

I absolutt GNSS, måler en mottaker pseudoavstander til minimum fire satellitter for å estimere sin egen posisjon. I delkapitlene 2.1.1 og 2.1.2 blir det utledet teori om kode- og fasemålinger. Legg merke til at her brukes det kun en mottaker, som medfører at ikke er mulig å oppnå en fix løsning. For å oppnå en fix løsning må man ta i bruk metoden differensiell GNSS.

### Relativ GNSS

Relativ GNSS oppnås når to plasserte mottakere måler pseudoavstander til de samme satellittene samtidig. Koordinatene til en av mottakerne vil være kjent. Dette gjør det mulig å danne dobbeldifferanser av målingene. Se for deg to mottakere A og B, som begge



måler faseobservasjoner til satellitt 1 og 2 samtidig. I denne modellen er det antatt at effektene av ionosfæren og troposfæren er like på begge mottakerne, selv om dette ikke stemmer med virkeligheten. Siden mottakerene er relativt nær hverandre kan effektene neglisjeres.

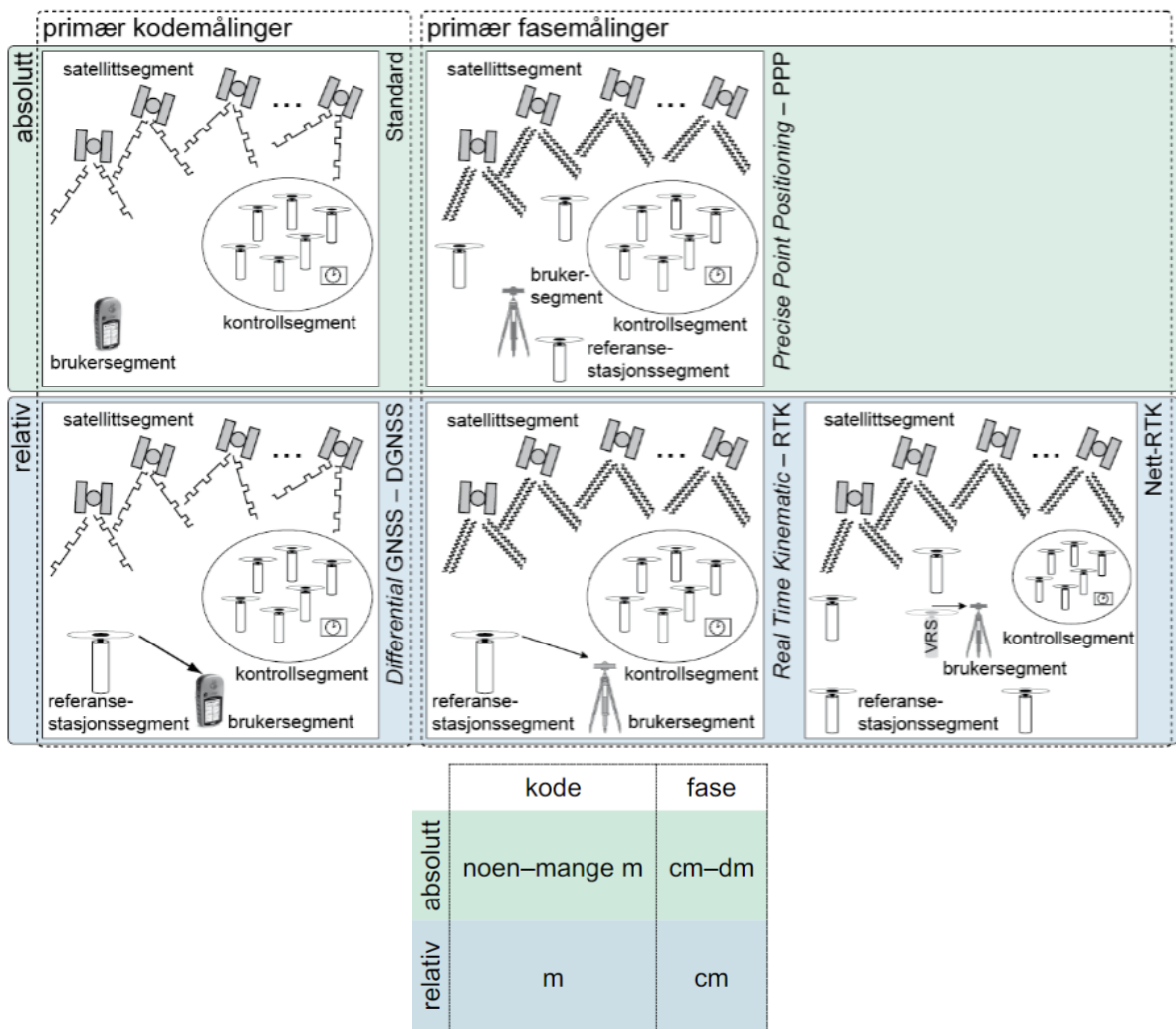
Enkeldifferanser kan lages ved å lage differanser mellom samtidige målinger fra flere mottakere til felles satellitter. Enkeldifferansene eliminerer satellittklokkefeilen, reduserer effekten av feil i satellittkoordinater, samt reduserer umodellerte ionosfære og troposfære effekter.

Videre utledes dobbeldifferanser av å ta differansene mellom enkelt-differansene. Dobbeldifferanse eliminerer mottakerklokkefeilen, ytterligere effekt av feil i satellittkoordinater og faseflertydigheten identifiseres som integer-tall. Dette medfører til en enklere modell med færre parametere, som igjen gjør at presisjonen blir bedre.

Et steg videre er å danne trippeldifferanser mellom to tidspunkter, for å eliminere faseflertydigheten, som er en nyttig egenskap til å både detektere og reparere fasebrudd.

Denne formen for statistisk relativ GNSS kan kun oppnås gjennom etterprosessering. Allikevel finnes det en variant av relativ GNSS, som støtter sanntidsmåling. Denne metoden kalles differensiell GNSS, ofte forkortet til DGNS. Når man bruker DGNS, er observasjonene fra begge mottakerne ikke kombinert til en løsning. Mottakeren med de kjente koordinatene vil bli referert som base-mottakeren og overfører korreksjonsdata til den andre mottakeren, ofte referert som rover. Radiobølger brukes vanligvis til å overføre disse dataene mellom base og rover og gjør det mulig å oppnå fix løsning i sanntid.

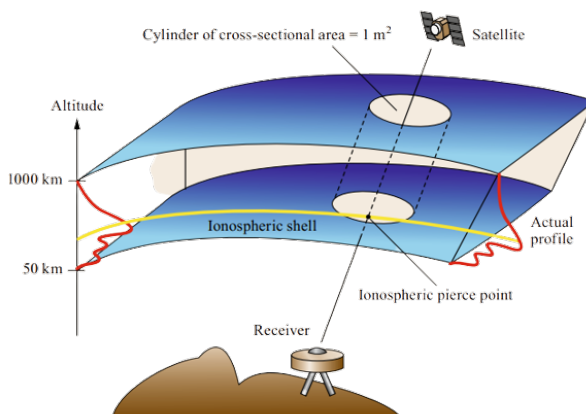
Figur 2.6 viser forskjellen på absolutt og relativ GNSS, og beskriver godt hvilke metoder som tilhører kode- og fasemålinger. DGNS vil benytte seg av primære kodemålinger, mens RTK ("Real Time Kinematic") er en form for DGNS som vil primært bruke fasemålinger. Nett-RTK beregner en virtuell referansestasjon (VRS) på bakgrunn fra permanente geodetiske referansestasjoner og brukers posisjon. Tjenesten CPOS fra karverket bruker Nett-RTK. En nærmere beskrivelse av metoden PPP ("Precise Point Positioning") kan leses i delkapittel 2.2.



Figur 2.6: Metoder for satellittbasert posisjonsbestemmelse og deres presisjon (Rost, 2022b).

## 2.1.6 Ionosfæren

Den delen av atmosfæren kjent som ionosfæren, ligger i en høyde fra 50 til 1000 km over jordoverflaten (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 12). Ionosfæren består av ionisert gass, som betyr at gassen inneholder frie ladde partikler som protoner, elektroner og ladede ioner. Mengden av antall ladde partikler i ionosfæren til enhver tid vil variere med syklusen til solen, ettersom det er den største ionosfære feilkilden. Når et utsendt satellittsignal passerer ionosfæren oppstår det en refraksjon. Det vil gjøre at signalet bøyes og forsinkes på veien til mottaker. I satellittgeodesien blir denne signalforsinkelsen ofte kalt ionosfærisk forsinkelse. Antallet elektroner i ionosfæren vil påvirke hvor mye signalet bøyes og forsinkes. Målet TEC (total electron count) teller antall elektroner langs en søyle i ionosfæren. TEC brukes til å estimere ionosfæriske forsinkelser for ulike frekvenser. Det totale elektroninnholdet TEC til ionosfæren er gitt ved integralet (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 120)



**Figure 2.7:** Ionosfæren (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 12).

$$TEC = \int N_e ds_0 \quad (2.7)$$

der  $N_e$  er elektrontettheten,  $ds_0$  er geometriske avstanden. TEC gir ut da antall elektroner i en søyle mellom satellitt og mottaker som har en diameter på  $1 \text{ m}^2$ .

Ionosfæreeffekten er omvendt proporsjonalt med kvadratet av frekvensen til et utsendt signal og er gitt ved ligningen (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, S. 120)

$$I_i^P = \frac{40.3}{f_i^2} \cdot TEC, \quad I_i^L = -I_i^P \quad (2.8)$$

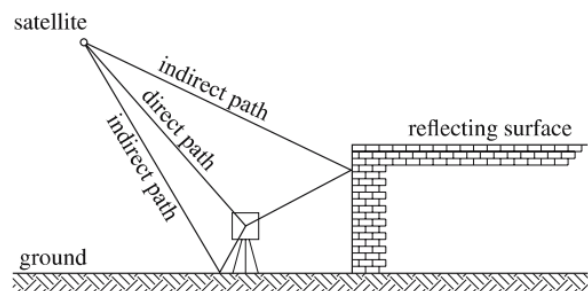
der indeks  $i$  angir frekvensen til utsendt signal, mens indeksene  $L$  og  $P$  angir kodemåling og fasemåling i enhet meter. Merk at at effekten av ionosfære henholdsvis kode- og fasemåling har samme tallverdi, men med motsatt fortegn, som bli utledet i delkapitlene 2.1.1 og 2.1.2.

Det finnes flere metoder å redusere ionosfærisk forsinkelse på, hvor en metode baserer seg på å lage en funksjonsforbindelse mellom ionosfærisk forsinkelse på ulike frekvenser. Det betyr at hvis den ene forsinkelsen på en frekvens er kjent, kan man regne ut forsinkelsen for en annen frekvens. En annen metode er å estimere ionosfæren fra to-frekvente målinger for en ønsket frekvens. Det er også mulig å eliminere den ionosfæriske forsinkelsen ved å danne en ionosfærefri lineærkombinasjon, forutsatt at mottakeren er kompatibel med flere frekvenser. For mer informasjon om metodene brukt til å korrigere ionosfærisk forsinkelse, se (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 126 - 128).

## 2.1.7 Multipath

En svakhet ved GNSS-posisjonering er at de utsendte signalene må reise i gjennom rom og tid mellom satellitt og mottaker. I det tilfellet hvor signalet reflekteres og bøyes før det ankommer mottaker, vil innholde feilaktige og forskjøvne avstander. Den riktige målte avstanden kommer fra signaler som har en direkte reiserute, mens signaler som har en indirekte reiserute blir betegnet som feilaktige og anses som multipath. Hindringer som bygninger, bakken eller fysiske obstruksjoner i området rundt mottakeren er faktorer som kan interferere med signalene og gi feil i de avledede kode- og fasemålingene. Figur 2.8 gir et godt bilde av multipath.

Multipath vil både påvirke kode- og fasemålinger i en viss grad avhengig av faktorer som chiprate, signalstyrke og kvalitet på mottaker. En tilsvarende høy chiprate vil korte ned lengden på hver chip. Kodemålinger er mer utsatt for multipath enn fasemålinger, av den grunn at chiplengden til koden er større enn bølgelengden til bærebølgen. Effekten av multipath vil variere og endre seg basert på lokale forhold av en plassert mottaker og dermed gjør den vanskelig å modellere. Høykvalitets mottakere og antenner vil kunne redusere effekten av multipath. For lave elevasjonsvinkler vil denne feilen være størst. Multipath kan gi feil for kodemålinger opptil 1.5 ganger chiplengden, som tilsvarer en effekt på 450 meter for C/A koden til GPS. For fasemålinger er feilen på opp til en kvart bølgelengde av bærebølgen, som tilsvarer 5 cm for L1-båndet for GPS.



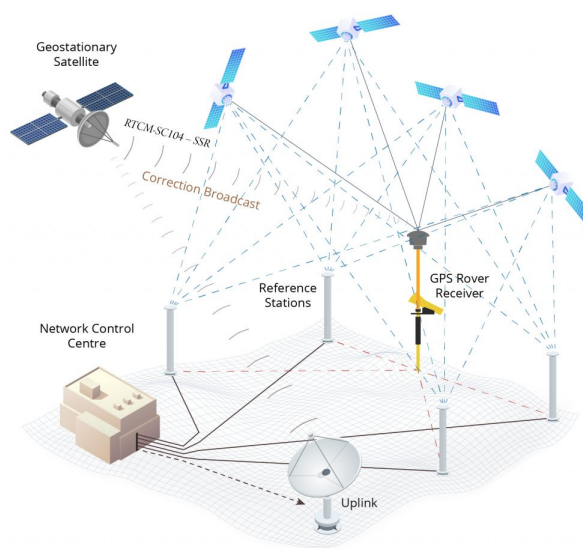
**Figur 2.8:** Multipath (Hofmann-Wellenhof et al., 2008, s. 155).

## 2.2 Presis enkeltpunktstedfesting (PPP)

Presis enkeltpunktstedfesting eller "Precise Point Positioning" (PPP) på engelsk, er en populær metode for absolutt posisjonsbestemmelse. Løsningen til PPP er basert på udifferensierte kode- og fasemålinger sammen med presise satellittkoordinater, satellittklokkekorreksjoner og diverse korreksjonsdata. Basert på lengden til målesesjonen og kvalitet på produktene, er det mulig å oppnå en presisjon på centimeternivå. Ulikt fra relative differensierte målinger, krever ikke PPP at to mottakere måler samtidig. Metoden er bygd videre på en vanlig absolutt posisjonsbestemmelse i sanntid, hvor klokkekorreksjoner, kringkasta efemerider og korreksjonsdata skiftes ut med presise produkter. Det er også mulig å etterprosessere PPP-dataene i etterkant. I en PPP-løsning blir det brukt flertydige fasemålinger, som krever at faseflertydighetene for alle satellittene estimeres i ligningssystemet. Feil i både mottakerens og satellittens klokke som et resultat, gjør at faseflertydighetene til udifferensierte fasemålinger ikke har integeregenskaper i utgangspunktet, og som kun oppnås ved dannelse av dobbeltdifferanser. Dermed vil en løsning behøve tid (15 min eller lengre) til å konvergere, for å oppnå en god flyttallsløsning (float) som mulig (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 723).

Utviklingen av PPP går tilbake til Anderle i 1976 (Anderle, 1976), men det var ikke før først på slutten av 1990-tallet at denne metoden ble forsket på av National Aeronautics and Space Administration (NASA) i deres Jet Propulsion Laboratory (JPL) (ZUMBERGE et al., 1997). De to neste tiårene ble to-frekvent PPP grundig undersøkt og flere PPP programvarer utviklet. I disse studiene ble det funnet at centimeter presisjon er oppnåelig for etterprosesserte statiske data og desimeter presisjon for etterprosesserte kinematiske data (Gao & Chen, 2004; Lachapelle et al., 2006; Zumberge et al., 1997a). Med fremskrittene gjort gjennom årene, har det kommet flere aktører på banen som tilbyr kommersielle PPP tjenester som et tillegg/alternativ til relative differensielle posisjonsteknikker i områder hvor tettheten av referansestasjoner ikke er tilstrekkelig, for eksempel grunnet demografi eller av økonomiske årsaker (som i utviklingsland).

Den største fordelen med PPP i forhold til differensiell posisjonsbestemmelse er den homogene spredte nøyaktigheten og uavhengigheten i avstand til referansestasjon. Det betyr at nettverket av referansestasjoner ikke trenger å være like tett for å opprettholde en god presisjon. PPP bruker sekvensiell (epokevis) minste kvadraters estimerer. For oppnå en god nøyaktighet er det viktig å redusere alle potensielle feil i PPP-modellen. Det er mulig å gjøre ved modellering av troposfære, relativitet, tidevann og estimering av klokkefeil og eliminering av ionosfæren ved lineære kombinasjoner blant annet. I tabell 2.8 er det oppsummert ulike feilkilder en PPP-løsning kan inneholde.



Figur 2.9: Illustrasjon av et PPP-system (Tallysman, 2023).

**Tabell 2.8:** Oversikt over ulike feilkilder til PPP, hvor verdier for størrelse og usikkerhet er avhengig av situasjon og er kun tilnærminger (Teunissen & Montenbruck, 2017, s. 727).

Model component		Magnitude	Uncertainty	Notes	
Satellite	Center-of-mass position		2.5 cm (GPS)	Interpolated from precise orbit product in standard product 3 (format) (SP3) format with typical sampling of 15 min	
	Antenna phase center offset	0.5–3 m	10 cm	Antenna offset vector in spacecraft system (IGS antenna exchange (ANTEX)) and GNSS specific attitude models [25.5, 6]	
	Phase center variations	5–15 mm (GPS)	0.2–1 mm	IGS ANTEX model [25.5]	
	Clock offset	< 1 ms	75 ps, 2 cm (GPS)	Interpolated from precise clock product with typical sampling of 30 s to 5 min	
	Relativistic clock effects	10–20 m	–	Eccentricity-dependent effect [25.7, 8]	
		2 cm	–	$J_2$ -dependent contribution [25.8]; consistently neglected in current precise GNSS clock products and PPP models	
	Differential code biases	up to 15 ns, 5 m	0.1–1 ns	Required biases depend on tracked signals and clock product [25.9, 10]	
	Fractional phase biases	up to 0.5 cy	0.01 cy	For undifferenced ambiguity resolution [25.11]	
	Atmosphere	Troposphere (dry)	2.3 m	5 mm	Vertical delay [25.12], up to 10× larger for low elevations. Models: see, e.g., [25.13, Sect. 9.2], [25.14, 15]
		Troposphere (wet)	up to 0.3 m	up to 100%	Vertical delay [25.12]; estimated due to insufficient a priori models
Ionosphere (1 <sup>st</sup> -order)		up to 30 m	– / 1 m	Vertical delay, up to 3× larger for low elevations. Corrected through ionosphere-free combination (2-freq. PPP) or global ionosphere maps ([25.16]; 1-freq. PPP)	
	Ionosphere (higher-order)	0–2 cm	1–2 mm	References [25.17] and [25.13, Sect. 9.4.1]	
Site displacement				Corrections for expressing measured positions in a conventional terrestrial reference frame	
	Plate motion	up to 0.1 m/y	0.3 mm/y	Reference [25.18]	
	Solid Earth tide	up to 0.4 m	1 mm	References [25.19] and [25.13, Sect. 7.1.1]	
	Ocean loading (tidal)	1–10 cm	1–2 mm	References [25.13, Sect. 7.1.2], [25.20, 21]	
	Ocean loading (nontidal)	up to 15 mm	1 mm	Nonconventional correction; [25.22]	
	Pole tide	25 mm	–	Reference [25.13, Sect. 7.1.4]	
	Atmospheric loading (tidal)	up to 1.5 mm	–	Reference [25.13, Sect. 7.1.3]	
	Atm. loading (nontidal)	up to 20 mm	15%	Nonconventional correction; [25.23]	
Receiver	Phase center offset	5–15 cm	–	IGS ANTEX model (conventional values)	
	Phase center variations	up to 3 cm	1–2 mm	IGS ANTEX model; [25.24]	
Others	Phase wind-up	10 cm	see notes	Wavelength dependent; correction subject to knowledge of satellite/receiver antenna orientation; [25.25, 26]	

Den funksjonelle PPP-modellen tar for seg forholdet mellom observasjoner og ukjente. Ved bruk av minste kvadraters metode, kan GNSS-målingene utledes i et ligningssystem for å bestemme de ukjente. De tradisjonelle ionosfærefrie kode og fase lineære kombinasjonene er de mest kjente for å redusere første ordens ionosfærisk effekt og disse kombinasjonene har blitt brukt som en funksjonell modell for PPP tidligere. De udifferensierte observasjonsligningene er gitt ved (Kouba & Héroux, 2001; Zumberge et al., 1997b)

$$P_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{ion(L_i)} + d_{trop} + d_{hd(P_{L_i})}^r - d_{hd(P_{L_i})}^s + d_{multi(P_{L_i})} + d_{noise(P_{L_i})} \quad (2.9)$$

$$\Phi_{L_i} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - d_{ion(L_i)} + d_{trop} - \lambda_{L_i} N_{L_i} + d_{hd(\Phi_{L_i})}^r - d_{hd(\Phi_{L_i})}^s + d_{multi(\Phi_{L_i})} + d_{noise(\Phi_{L_i})} \quad (2.10)$$

hvor  $P_{L_i}$  og  $\Phi_{L_i}$  er kode- og faseobservasjoner for frekvensen  $L_i$ , oppgitt i meter.  $\rho$  er den

geometriske avstanden mellom satellitt og mottaker.  $d_{orb}$  er satellittens banefeil i meter.  $c$  er lysets hastighet i vakuum, oppgitt i meter per sekund.  $dT$  og  $dt$  er klokkefeilen til satellitt og mottaker, i sekunder.  $d_{ion(L_i)}$  er første ordens ionosfærisk effekt for frekvensen  $L_i$  i meter.  $d_{trop}$  er troposfærisk forsinkelse i meter.  $d_{hd(P_{L_i})}^s$  og  $d_{hd(P_{L_i})}^r$  er satellittens og mottakerens maskinvare (hardware) forsinkelse for kodeobservasjonen på frekvensen  $L_i$  i meter.  $d_{hd(\Phi_{L_i})}^s$  og  $d_{hd(\Phi_{L_i})}^r$  er satellittens og mottakerens maskinvare (hardware) forsinkelse for faseobservasjonen på frekvensen  $L_i$ , oppgitt i meter.  $d_{multi(P_{L_i})}$  og  $d_{multi(\Phi_{L_i})}$  er multipath feilene på kode- og faseobservasjonene for frekvensen  $L_i$  i meter.  $d_{noise(P_{L_i})}$  og  $d_{noise(\Phi_{L_i})}$  er støyfeil på kode- og faseobservasjonene for frekvensen  $L_i$  i meter.  $N_{L_i}$  er faseflertydigheten på frekvensen  $L_i$  i sykluser og  $\lambda_{L_i}$  er bølgelengden for frekvensen  $L_i$  i meter.

ionosfæriskfri lineærkombinasjon for kode- og faseobservasjoner er gitt ved

$$P_{if} = \frac{f_1^2 P_1 - f_2^2 P_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) + d_{trop} + d_{hd(P_{if})}^r \quad (2.11)$$

$$- d_{hd(P_{if})}^s + d_{multi(P_{if})} + d_{noise(P_{if})}$$

$$\Phi_{if} = \frac{f_1^2 \Phi_1 - f_2^2 \Phi_2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + d_{orb} + c(dT - dt) - \lambda_{if} N_{if} + d_{trop} \quad (2.12)$$

$$+ d_{hd(\Phi_{if})}^r - d_{hd(\Phi_{if})}^s + d_{multi(\Phi_{if})} + d_{noise(\Phi_{if})}$$

der  $N_{if}$  er ionosfæriskfrie faseflertydigheten, oppgitt i sykluser og  $\lambda_{if}$  er ionosfærefrie bølgelengden i meter. De estimerte parameterne er mottakerens koordinater, mottakerens klokkefeil, senit troposfærisk forsinkelse og ionosfæriskfri faseflertydighet. For mer informasjon om modellering av feilkildene til PPP, se (Kouba & Héroux, 2001)

## 2.2.1 RT(S)-PPP

Den internasjonale GNSS tjenesten (IGS) lanserte i april 2013 sanntids tjenesten ”Real Time Service” (RTS). Opprinnelig har kun IGS distribuert sine satellittbaner og klokkekorreksjoner som endelige sluttprodukter til etterprosessering, med en forsinkelse på opptil 12 dager. IGS RTS produserer og deler ut sanntids bane- og klokkekorreksjoner globalt og gratis via abonnement som er i samsvar med IGS’s sine retningslinjer for åpne data. Dataene kan overføres via radioen med teknisk kommisjon for maritime tjenester (RTCM) standarden. RTCM-SSR formatet er i stand til å støtte sub-desimeter RT-PPP hvor som helst i verden, døgnet rundt. For tiden tilbys det kun RTS produkter for GPS konstellasjonen. Se tabell 2.9 for å se hvilke produkter IGS tilbyr.

**Tabell 2.9:** IGS sine produkter for GPS (IGS, 2023a).

Type		Accuracy	Latency	Updates	Sample Interval
Broadcast	orbits	~ 100 cm	real time	-	daily
	Sat. clocks	~ 5 ns RMS			
		~ 2.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (predicted half)	orbits	~ 5 cm	real time	At 03, 09, 15,21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~ 3 ns RMS			
		~ 1.5 ns SDev			
Ultra-Rapid (observed half)	orbits	~ 3 cm	3 – 9 hours	At 03, 09, 15, 21 UTC	15 min
	Sat. clocks	~ 150 ps RMS			
		~ 50 ps SDev			
Rapid	orbits	~ 2.5 cm	17 – 41 hours	At 17 UTC daily	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~ 75 ps RMS			5 min
		~ 25 ps SDev			
Final	orbits	~ 2.5 cm	12 – 19 days	Every Friday	15 min
	Sat. & Stn. clocks	~ 75 ps RMS			Sat.: 30s
		~ 20 ps SDev			Stn.: 5 min

I tabell 2.10 er det vist IGS RTS produkter for bane- og klokkekorreksjoner, og deres formater samt hyppighet.

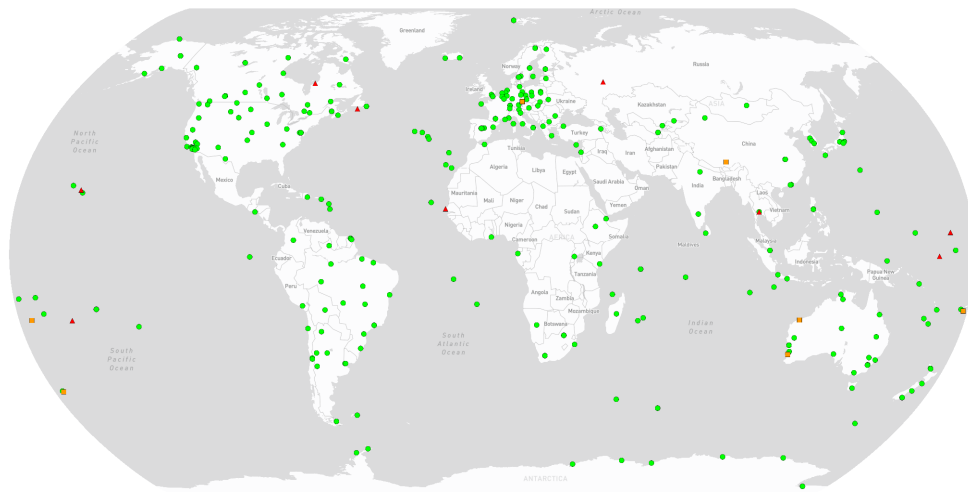
**Tabell 2.10:** Ulike IGS produkter, deres formater og frekvenser (Caissy et al., 2012).

Product	Format	Frequency
GNSS Data	RTCM 3	1 second
GPS orbit corrections	RTCM-SSR	5 or 60 seconds
GPS clock Corrections	RTCM-SSR	5 seconds

I skrivende stund består IGS sitt RTS nettverk av 307 globalt distribuerte sanntids referansestasjoner som er vedlikeholdt av lokale og regionale operatører. Disse RTS-stasjonene



observerer 1 sekund GNSS data. Figur 2.10 viser det globale IGS RTS-nettverket. IGS RTS sine korreksjonsprodukter er levert til brukere via nettverkstransport av RTCM med internett-protokoll (NTRIP)



**Figur 2.10:** IGS sitt globale nettverk av RTS stasjoner (IGS, 2023b).

Med tilgjengeligheten av sanntids satellittbane- og klokkekorreksjoner, har det dukket opp flere tjenester som benytter seg av disse produktene for å levere en RT-PPP løsning. Den største ulempen med en RT-PPP løsning, er den lange konvergenstiden for å oppnå koordinater med god presisjon. Det har resultert i at flere tjenester har forsøkt å redusere konvergenstiden og øke presisjonen, med det å løse heltalls fasetvetydigheten til bærebølgen. Flere tilnærminger og metoder har blitt utviklet for å oppnå integer-egenskaper og disse vil bli nærmere beskrevet i neste delkapittel.

## 2.2.2 Ulike RT-PPP-teknologier

Flere studier de siste årene har vist hvordan det er mulig å løse heltalls faseflertydighetene ved hjelp av GPS, som inkluderer at kode og fase feilene gis som input til PPP algoritmen. Flere tilnærminger har blitt utviklet, for eksempel "Decoupled ClockModel", "Integer Clock method" og "Single-Difference" tilnærmingen. De overnevnte kode- og fasefeilene er bedre kjent i den eksisterende litteraturen som "uncalibrated phase delays" (UPDs), "fractional cycle biases (FCBs)", eller uncalibrated hardware delays (UHDs), som er oversatt etter beste evne på norsk til ukalibrerte faseforsinkelser, brøksyklusskjevheter og ukalibrerte maskinvareforsinkelser. I de metodene er ionosfærefrie tvetydigheten delt inn i "wide-" og "narrow-lane" tvetydighet. "Wide-lane" tvetydighet løsning er basert på Melbourne-Wübbena geometri-frie tilnærmingen, mens "narrow-lane" tvetydighet løsningen oppnås ved å anvende en geometrisk tilnærming. En løsning med integer-egenskap i PPP blir da mulig når UHD's estimeres i et justert nettverk og overføres til bruker.

De nyeste RT-PPP-tjenestene har tatt i bruk multi-GNSS i beregningene for å redusere konvergenstiden og øke presisjonen. En multi-GNSS er konseptet bak at en mottaker er i stand til å beregne posisjon, hastighet og tid ved å motta utsendte satellittsignaler fra flere navigasjonssatellittsystemer samtidig. Flere studier har vist at romlig geometri,

konvergens, nøyaktighet og pålitelighet kan forbedres betydelig med en kombinasjon av observasjoner fra flere konstellasjoner (Li et al., 2015; Li et al., 2018). For full optimalisering har tjenestene også benyttet seg av teknologier, som tar i bruk beregninger på flere frekvenser. Ved bruk av multi-frekvenser kan flere observasjonskombinasjoner konstrueres for å oppnå integer-egenskap raskere. I tabell 2.11 er det oversikt over forskjellige teknologiske metoder, med forventet nøyaktighet og konvergenstid. Den aller beste PPP-metoden i skrivende stund er PPP-RTK, en metode som bruker multi-GNSS og tre-frekvente målinger. I EUSPA sin rapport fra 2019 har de oppgitt at PPP-RTK kan oppnå en nøyaktighet på 2-4 centimeter med en så liten konvergenstid som 5 minutter.

**Tabell 2.11:** Ulike PPP-teknologier (EUSPA, 2019, s. 18-19).

Service	Technology	Accuracy (cm)	Convergence Time (min)
Multi-GNSS single frequency PPP	RT-PPP-L1	80	30
Single Frequency PPP, MultiGNSS + Ion, SBAS	RT-PPP-L1 "Fast and Precise"	50	1
Multi-GNSS dual-frequency PPP with floating ambiguities	RT-PPP-L1/L2	10	30
Multi-GNSS dual-frequency PPP with fix ambiguities	PPP-IAR	4	30
Multi-GNSS tri-frequency PPP with fix ambiguities	PPP-RTK	2-4	5

PPP-RTK metoden kombinerer konseptene presis enkeltpunktstedfesting (PPP) og realtids kinematisk måling (RTK). Denne metoden skal i teorien oppnå en fix-løsning fra en mottaker relativt raskt ved å bruke korreksjoner utledet fra et nettverk med referansestasjoner. Metoden kan betraktes som en utvidelse av PPP-modellen, som gjør det mulig for brukere å oppnå absolutt posisjonsbestemmelse med en mottaker og allikevel oppnå god presisjon og rask konvergenstid. I motsetning til "Observable Space Representation" (OSR) korreksjonen brukt av RTK, som er avstandskorreksjoner sendt fra base til rover, gis korreksjonene av PPP-RTK i form av "State Space Representation" (SSR). Den korreksjonen vil inneholde presise satellittbaner og klokke, ionosfærisk og troposfærisk forsinkelse og ukalibrert faseforsinkelse (UPD). PPP-RTK kan oppnå samme nøyaktighet og ytelse som RTK, men med et bredere dekningsområde, bedre kapasitet på kommunikasjonen og høyere robusthet mot feil. Et eksperiment fra Australia viste at PPP-RTK kan oppnå relativt rask fix-løsning i et nettverk av referansestasjoner med en omkrets på 200-300 km (Li et al., 2021). I tabell 2.12 er det vist en god sammenligning av RTK- og PPP-metoden.

**Tabell 2.12:** Sammendrag av tilgjengelige teknologier til posisjonering med GNSS (EUSPA, 2019, s. 13-14).

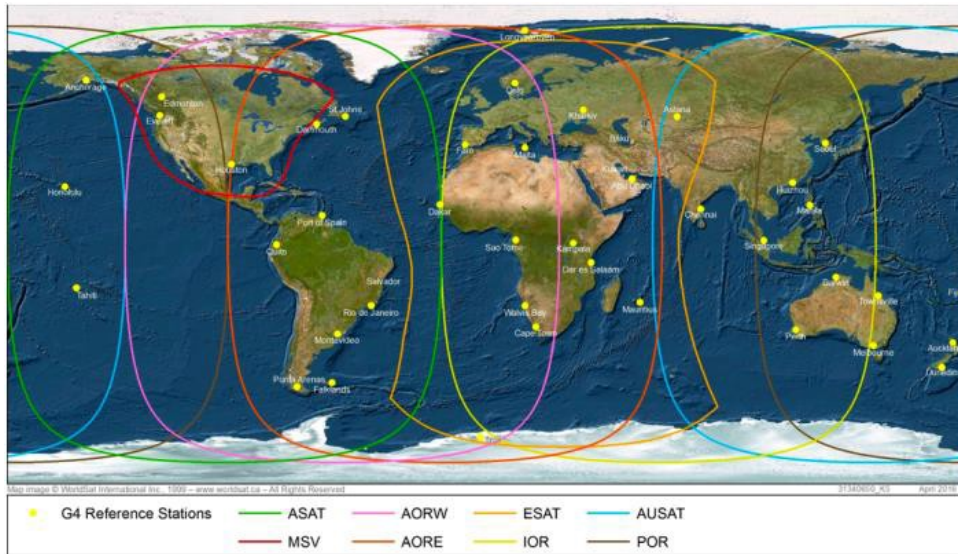
	RTK	Network RTK			Phase based PPP	Code based PPP	PPP-RTK
	RS	FKP	MAC	VRS/PRS			
<b>Errors corrected</b>	Orbit error, Clock error, Bias, Ionospheric delay, Tropospheric delay				Orbit error, Clock error, Bias, Iono/Tropospheric delay (PPP-RTK)		
<b>Approach</b>	OSR (Observation State Representation)				SSR (State Space Representation)		
<b>Accuracy</b>	cm				< dm	~ 3 dm	< dm
<b>Mean convergence time</b>	< 5 s				20 min	< 1 s	< 5 s - 1 min
<b>Coverage</b>	Local	Regional			Global		
<b>Double frequency</b>	Yes				Yes	No	Yes
<b>Required bandwidth</b>	Medium	Medium	High	Medium	Low	Low	Low-medium
<b>CORS network density requirement (km)</b>	20 - 50	70 - 100	70 - 100	70 - 100	1000's	1000's	100's

## 2.2.3 Fugro Starfix G4 & G4+

Fugro Starfix leverer presise posisjoneringstjenester for offshore konstruksjonsfartøy, oppmåling operasjoner, rør- og kabellegging aktiviteter, seismiske undersøkelser, dykkerstøtte, FPSO-installasjon og overvåking. I 2009 introduserte Fugro tjenesten G2, som på den tiden var den første globale tofrekvente sanntids-PPP (RT-PPP-L1/L2) tjenesten som støttet både GPS og GLONASS. Etter den raske GNSS utviklingen, har systemet senere lagt til støtte for BeiDou i 2015 og Galileo i 2016 for å bli en G4 tjeneste som støtter alle de globale GNSS-systemene (Tegeador et al., 2015).

Fugro opererer et globalt nettverk av referansestasjoner som genererer nøyaktige bane- og klokkeprodukter, se figur 2.11. Rådata fra GNSS sendes i sanntid til sentre i Oslo (Eik) og Darmstadt i Tyskland. Disse sentrene beregner nøyaktige baner og klokke drift i satellittene. Nettverk kontrollsentre i Houston (USA) og Singapore mottar de tilsendte kringkastede efemeride korreksjonene, og deretter kringkastes de til brukerne via de åtte geostasjonære kommunikasjonssatellittene (Tegeador et al., 2017; Tegeador & Ørpen, 2015).

G4+ tjenesten er PPP med heltalls flertydighetsbestemmelse med bruk av GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou og er en utvidelse av G2+. Denne tjenesten benytter seg av teknologien PPP-IAR (se tabell 2.11), hvor et større nettverk av ca. 80 stasjoner beregner ukalibrerte maskinforsinkelser (UHD) i satellittene. Disse forsinkelsene kringkastes til brukere for bestemmelse av heltallsdelen i fasemålingsflertydighetene i PPP, som muliggjør bedre presisjon (Tegeador & Ørpen, 2015)



**Figur 2.11:** G4 sitt nettverk av referansestasjoner og dekningsområde for de åtte geostasjonære satellittene (Tegedor et al., 2017).

## 2.2.4 Starpoint Pro

Starpoint Pro er et PPP-abonnement fra Topnet Live, som tilbyr presise sanntids posisjonsdata til landbruket, OEM, oppmåling i avsidesliggende områder, automobil, industriell IoT autonom robotikk. Deres tjeneste bruker alle GNSS konstellasjonene og kombinerer presise satellittbaner og klokker med udifferensierte dobbelfrekvente observasjoner. Løsningen tilbyr posisjoner med presisjon på centimeteren, ved hjelp av et nettverk av referansestasjoner rundt om i verden. På nettsiden til Topcon er det spesifisert at denne tjenesten kan oppnå en nøyaktighet på 3 centimeter med en initialiseringstid under 20 min (Topcon, 2022).

For øyeblikket tilbyr Topcon to alternativer for mottakelse av PPP korreksjoner, via L-båndet og NTRIP. L-båndet er satellittbasert korreksjonstjeneste som har en global dekning. Dette er kun for landbaserte applikasjoner og ikke marinebaserte. PPP løsninger som er tilgjengelige her er CPPP, PPPN og PPPF, se tabell 2.13.

Den andre måten å motta korreksjoner er via NTRIP, som distribueres gjennom internettet. Denne metoden kan brukes der "Topnet Live"-nettverket er tilgjengelig. Det vil ikke være tilgjengelig hvis internetforbindelsen er tapt. Dette er både for land- og marinebaserte applikasjoner. PPP løsninger som er tilgjengelige her er CPPP, PPPN.

**Tabell 2.13:** Beskrivelse av PPP løsningene til Starpoint Pro (Topcon, 2022).

<b>Solution</b>	<b>Description</b>
CPPP	CPPP (Convergence Point Precise Positioning): A convergence stage of calculation of autonomous coordinates of a single receiver, when using dual frequency code and carrier phase measurements and the data on precise orbits and clocks of navigation satellites.
PPN	PPN (Point Precise Positioning Normal): Positions are calculated using dual frequency code and carrier phase measurements of a single GNSS receiver and the data on precise orbits and clocks of navigation satellites. Integer ambiguities, however, were NOT fixed (their FLOAT estimates were used instead).
PPF	PPPF (Point Precise Positioning Full): Positions are calculated using dual frequency code and carrier phase measurements of a single GNSS receiver and the data on precise orbits and clocks of navigation satellites. Integer ambiguities were FIXED.

## 2.2.5 Galileo Høy Nøyaktighet System (HAS)

Galileo Høy Nøyaktighet System er bedre kjent som HAS, eller "Galileo High Accuracy Service" på engelsk. Systemet gir ut gratis PPP-korreksjoner med høy nøyaktighet, i gjennom Galileos E6-B signalet og gjennom internettet. De tilbyr en posisjonsløsning i sanntid med en nøyaktighet bedre enn 2 desimeter ("Galileo High Accuracy Service", 2020).

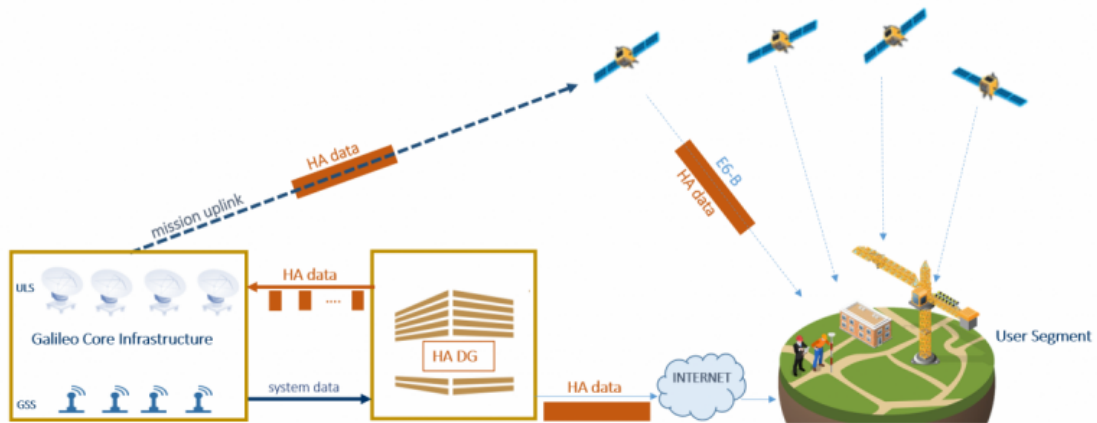
Det som kjennetegner Galileo HAS er begrepene HAS korreksjoner, tilgjengeliggjett, multikonstellasjon, multi-frekvens og åpent format. HAS korreksjoner består av korreksjoner med høy nøyaktighet som er sammensatt av baner, klokker, kode- og faseskjevheter fra hver satellitt. I tillegg inneholder HAS full service atmosfæriske korreksjoner. Tilgjengelighet består av korreksjoner med høy nøyaktighet, som er tilgjengelig gjennom to formidlingskanaler: E6-B signalet fra verdensrommet (SIS) og en forbindelse gjennom internettet, som en alternativ kilde til SIS. Multikonstellasjon og multifrekvens består av korreksjoner med høy nøyaktighet som beregnes fra Galileo E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC og GPS L1/L5; L2C. Åpent format som vil sende korreksjoner med høy nøyaktighet, som følger et lignende format som Compact-State Space Representation (CSSR).

Galileo HAS har to tjenestenivåer for levering av PPP korreksjoner: Tjenestenivå 1 og Tjenestenivå 2. Den førstenevnte har en global dekning og tilgjengelighet, som gir ut korreksjoner med høy nøyaktighet (baner, klokker) og feil (kode og fase) for Galileo E1/E5b/E5a/E6 og E5AltBOC og GPS L1/L5/L2C signalene. Tjenestenivå 2 har en regional dekning og tilgjengelighet, over det Europeiske dekningsområdet (ECA), gir tjenestenivå 1 korreksjoner og i tillegg atmosfæriske (ionosfæriske) korreksjoner og potensielle feilkilder (bias). Ytelsene til både Tjenestenivå 1 og Tjenestenivå 2 når systemet er fullt operativt, er presentert i tabell 2.14.

**Tabell 2.14:** Ytelse for Tjenestenivå 1 og Tjenestenivå 2 når det er fullt operativt (“Galileo High Accuracy Service”, 2020).

HAS	Tjenestenivå 1 (SL1)	Tjenestenivå 2 (SL2)
Dekning	Global	Europeisk dekningsområde (ECA)
korreksjoner	Bane, klokke, feil (kode og fase)	Bane, klokke, feil (kode og fase) + atmosfæriske korreksjoner
Format	Åpent format likhet med kompakt-SSR (CSSR)	
Konstellasjoner	Galileo, GPS	
Frekvenser	E1/E5a/E5b/E6; E5 AltBOC, L1/L5; L2C	
Horisontal nøyaktighet 95%	<20cm	
Vertikal nøyaktighet 95%	<40cm	
Konvergeringstid	<300s	<100s
Tilgjengelighet	99%	
Brukerstøtte	24/7	

Galileo HAS sin oppbygging for utnyttelse av korreksjoner med høy nøyaktighet involverer følgende systemelementer: High Accuracy Data Generator (HADG) på engelsk, som mottar data fra sensorstasjonene til Galileo (GSS) og beregner korreksjoner for Galileo og GPS. Korreksjonene med høy nøyaktighet (HA) videresendes tilbake i sanntid til Galileos kjerneinfrastruktur. Galileos kjerneinfrastruktur mottar HA dataene og samler informasjonen i en enkelt melding på 448 bits per sekund for hver tilkoblet satellitt. Galileos kjerneinfrastruktur laster opp HA-datene til satellittene gjennom opplink stasjonene. Satellittene til Galileo systemet kringkaster HA-data gjennom E6-B signal komponenten. HA-data sendes også gjennom den terrestriske lenken, tilgjengelig for brukere via internett. Brukermottakere bruker HA korreksjonene på de støttede Galileo og GPS signalene og beregner en presis posisjoneringsløsning gjennom implementering av en PPP algoritme.

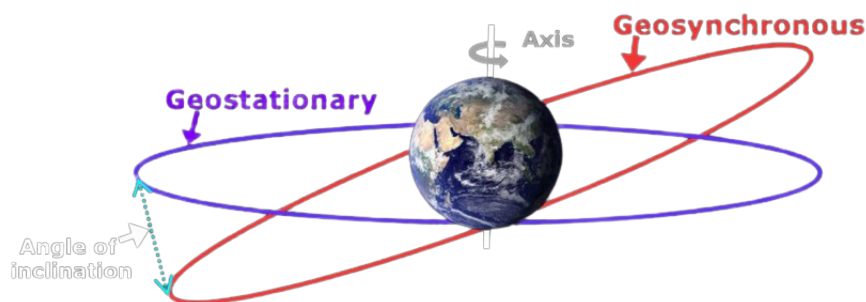


Figur 2.12: Systemelementene i Galileo HAS (“Galileo High Accuracy Service”, 2020).

## 2.3 Geostasjonær bane

En geostasjonær bane er en spesiell type bane som ligger eksakt i ekvatorplanet og sirkulerer i samme hastighet og retning som jordrotasjonen, med en omløpstid på ett stjernedøgn (23 t 56 min 4 s). Geostasjonære satellitter blir plassert i en banehøyde på rundt 35 800 km. Når en satellitt har oppnådd en perfekt geostasjonær bane, vil det se ut som den står i ro i forhold til jordas overflate. Denne spesielle banen egner seg godt til kommunikasjons- og observasjonsformål gitt at satellitten vil være kontinuerlig i kontakt med et bestemt punkt på jordoverflaten.

En geosynkron bane har en lav inklinasjonsbane (i forhold til ekvatorplanet) med en periode på ett stjernedøgn. Geostasjonær bane er en spesiell variant av geosynkron bane. I teorien er hver geostasjonær satellitt en geosynkron satellitt, men ikke alle geosynkrone satellitter er nødvendigvis geostasjonære. I figur 2.13 er det en illustrasjon som beskriver banene.

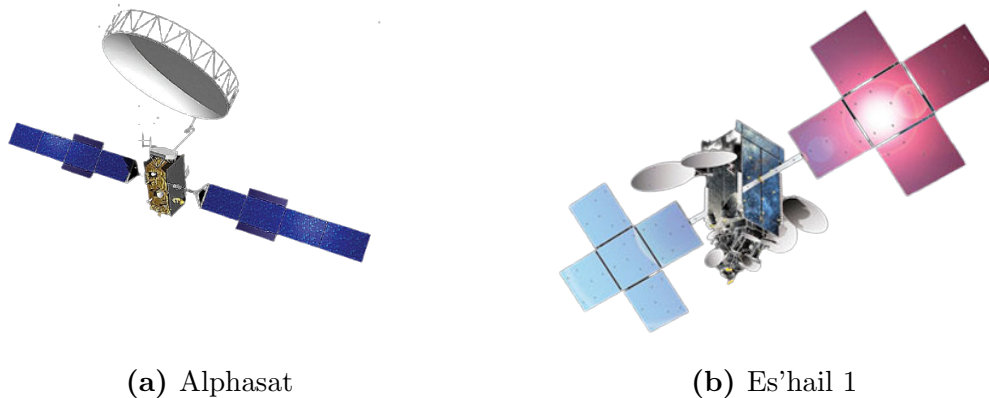


Figur 2.13: Geostasjonær bane vs geosynkron bane.

### 2.3.1 ALPHASAT & ES'HAIL 1

Alphasat, også kjent som Inmarsat-4A F4 og Inmarsat-XL (se figur 2.14a), er en svær geostasjonær I-4 kommunikasjonssatellitt som driftes av det britiske Inmarsat i samarbeid

med European Space Agency (ESA). Den ble skudd opp i 2013 og brukes til å levere mobilkommunikasjon til Afrika og deler av Europa og Asia. Es'hail 1 eller Eutelsat 25B (se figur 2.14b) er den første satellitten til Qatar. Denne kommunikasjonssatellitten drives av Es'hailSat etter å ha kjøpt Eutelsat sin eierandel i 2018 for €135 millioner. Satellitten ble skudd opp i 2013. Starfix tjenesten mottok korreksjoner fra Alphasat og Starpoint mottok korreksjoner fra Eshail 1.



**Figur 2.14:** Bilde av Geostasjonære kommunikasjonssatellitter.

### Two-line element set (TLE)

Et to linjet elementssett (TLE) er et dataformat som brukes til å registrere og rapportere posisjonen og banene til kunstige satellitter som kretser rundt jorden, og gir dataene som er nødvendige for å forutsi en satellitt posisjon på et fremtidig tidspunkt. Formatet inneholder informasjon for å identifisere romfartøyet, dens baneelementer og egenskaper om bevegelsene på et gitt tidspunkt. På 1960-tallet ble det formatet utviklet som et verktøy for å spore satellitter. I tabell 2.15 er det listet opp informasjon om dagens baneparametre fra TLE data til både Alphasat og Es'hail 1.

**Tabell 2.15:** Dagens baneparametre til Alphasat og Eshail (10.04.2023) (N2YO, 2023a, 2023b; Wikipedia, 2022, 2023).

	ALPHASAT	ES'HAIL 1
Referanse system	Geosentrisk	
Type satellitt	Geostasjonær	
Lengdegrad	24.93 ° øst	25.54 ° øst
Perigee	35 784.2 km	35 784.4 km
Apogee	35 802.3 km	35 802.9 km
Inklinasjon	2.8 °	0.1 °
Periode	23.94 t	
Skudd opp	25 juli 2013	29 august 2013
Epoke	29 oktober 2013	30 august 2015



### 2.3.2 Elevasjonsvinkel til geostasjonære satellitter

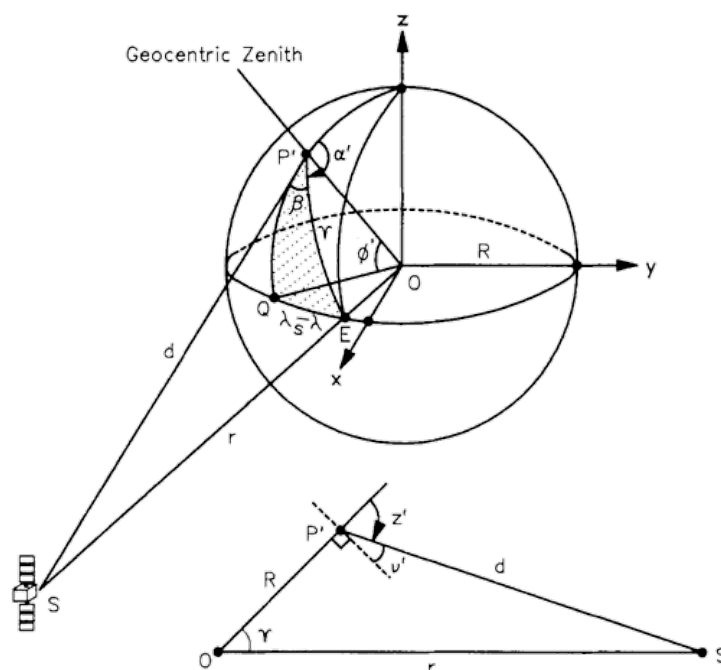
Beliggenheten til en mottaker på jordoverflaten angis med notasjon P' i figur 2.15. Forutsatt at posisjonen er oppgitt i sfæriske koordinater  $(\lambda, \Phi')$ , vil  $\lambda$  være lengdegrad og  $\Phi'$  være sfærisk breddegrad. Den geostasjonære satellitten S vil skjære med punktet E på ekvatorplanet, utspent av radiusen  $r$  og lengdegraden  $\lambda_s$  (Soler & Eisemann, 1994, s. 116). Vinkelen  $\gamma$  mellom radiusvektorene til punktene P' og E kan bestemmes ved å bruke sfæriske trekanten P'QE. En anvendelse av reglene til Napier gir følgende uttrykk

$$\cos \gamma = \cos \Phi' \cos(\lambda_s - \lambda) \quad (2.13)$$

Vektorene OP' og OS, henholdsvis R og r er forbundet til vinkelen  $\gamma$  ved ligningen

$$d = r[1 + (R/r)^2 - 2(R/r)\cos \gamma]^{1/2} \quad (2.14)$$

hvor  $d$  = toposentrisk distanse fra mottakeren til satellitt.



**Figur 2.15:** Beregning av vinkler forutsatt sfærisk jord (Soler & Eisemann, 1994, s. 117).

Alternativt brukes avstanden  $r$  til å beregne geosentrisk avstand fra jordas origo til en geostasjonær satellitt. For en ideell geostasjonær satellitt vil  $r$  være konstant på  $r \simeq 42\,200$  km og med en jordradius  $R$  på  $6\,371$  km.

Ved bruk av sinussetningen kan det skrives

$$r/\sin z' = d/\sin \gamma \quad (2.15)$$

hvor den sfæriske senitavstanden  $z'$  til satellitten S ved mottakerplasseringen P' kan løses

for

$$z' = \sin^{-1}[(r/d)\sin \gamma] \quad (2.16)$$

Som følge av dette bestemmes elevasjonsvinkelen ved følgende formel  $v' = 90^\circ - z'$ , alternativt kan formel 2.17 brukes.

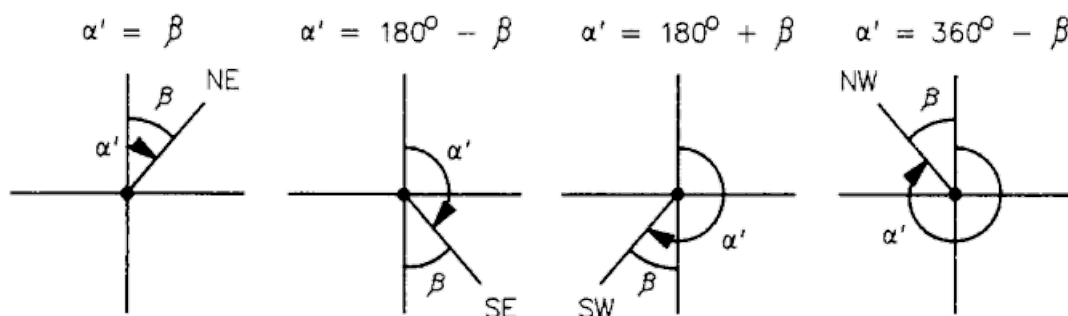
$$v' = \cos^{-1}[(r/d)\sin \gamma] \quad (2.17)$$

Fra figur 2.15 kan man se at asimuten  $\alpha'$  til satellitten er en funksjon av vinkelen  $\beta$ , henholdsvis uttrykt  $\alpha' = 180^\circ - \beta$

Vinkelen  $\beta$  beregnes ved anvendelse av reglene til Napier i formel 2.18

$$\beta = \cos^{-1}(\cot \gamma \tan \Phi') \quad (2.18)$$

Når vinkelen  $\beta$  ved P' er kjent, bestemmes asimutverdien enkelt ved å finne hvilken kvadrant satellitten befinner seg i, vist i figur 2.16



**Figur 2.16:** Berening av asimutvinkel basert på hvilken kvadrant satellitten befinner seg i (Soler & Eisemann, 1994, s. 118).

### 2.3.3 Elevasjonsvinkler til satellitt i GEO anvendt i Norge

Tatt utgangspunkt i ligningene utledet for en sfærisk tilnærming, er det utført en beregning av teoretiske verdier av sammenhengene:

- Varierende breddegrad til stasjon og dens elevasjonsvinkel til geostasjonær satellitt
- Elevasjonsvinkler til ALPHASAT og ES'HAIL 1 sett fra ulike steder i Norge.

Ved bruk av ligning 2.13 er det mulig å finne vinkelen  $\gamma$ , som brukes videre i ligning 2.14 for beregning av den toposentriske avstanden  $d$  mellom mottaker og satellitt. Elevasjonsvinkelen  $v'$  kan beregnes utifra vinkelen  $\gamma$  og avstanden  $d$  i ligning 2.17. Til slutt brukes ligning 2.18 og figur 2.16 for beregning av asimuten.

Tabell 2.16 tar for seg stasjoner (mottakere) som er plassert på breddegrader mellom 57 og 81.326 grader, med deres elevasjonsvinkler. Forutsetningene er at satellitten er

geostasjonær, det vil si at breddegraden  $\Phi_s$  er lik 0 grader og under betingelsen at lengdegradene til stasjonene er lik satellittens ( $\lambda = \lambda_s$ ). Den betingelsen medfører at asimutvinkelen forblir konstant på 180 grader uavhengig av breddegraden.

De gule skraverte områdene viser breddegradene Norge ligger på, inkludert Svalbard. Det illustrerer godt hvilken sikt som må til for å motta korreksjoner fra satellitten anvendt fra våre breddegrader. Longyearbyen på Svalbard ligger på 78 breddegrader, der nærmer vinkelen seg horisonten med elevasjonsvinkelen 3.33 grader. Elevasjonsvinkelen til satellitten er 0 grader og står parallelt med horisonten på 81.33 breddegrader og forsvinner under horisonten for øvrige breddegrader.

**Tabell 2.16:** Beregnede elevasjonsvinkler til geostasjonær satellitt ( $\Phi_s = 0$  grader) for ulike stasjoner med varierende breddegrad under betingelsen  $\lambda = \lambda_s$ . Gult indikerer Norges utstrekning i breddegrader inklusiv Svalbard.

Breddegrad til stasjon (grader)	Asimut (grader)	Elevasjon (grader)
57	180	25.15
59.67	180	22.30
60	180	21.96
63	180	18.78
65	180	16.70
66	180	15.64
71	180	10.46
75	180	6.38
78	180	3.33
80	180	1.33
81.326	180	0

Tabell 2.17 tar utgangspunkt i stasjoner (mottakere) plassert på ulike steder i Norge. Utifra det beregnes det elevasjonsvinkler for de ulike stedene. Fra alle stedene unntatt Kirkenes vil Alphasat ha en marginal bedre elevasjonsvinkel. Det er kun noen få hundre deler forskjell mellom Alphasat og Eshail 1.

**Tabell 2.17:** Beregnede elevasjonsvinkler til Alphasat og Eshail 1 ( $\Phi_s = 0$  grader) oppgitt i grader for ulike stasjoner i Norge under betingelsene  $\lambda_{\text{alphasat}} = 24.9$  grader,  $\lambda_{\text{Eshail1}} = 25.5$  grader. Gult indikerer stedet der målingene av koordinatene foregikk i denne avhandlingen.

Sted (lat, lon)	Asimut		Elevasjon	
	Alphasat	Eshail 1	Alphasat	Eshail 1
Kristiansand (58.1, 7.9)	160.20	159.51	22.33	22.21
Stavanger (58.9, 5.7)	157.87	157.20	21.10	20.97
Ås (59.67, 10.77)	163.74	163.06	21.23	21.14
Oslo (59.9, 10.7)	163.70	163.02	20.99	20.90
Bergen (60.4, 5.3)	157.73	157.06	19.55	19.43
Trondheim (63.4, 10.4)	163.87	163.21	17.41	17.33
Tromsø (69.7, 19.0)	173.71	173.07	11.69	11.66
Alta (70.0, 23.3)	178.30	177.66	11.48	11.48
Kirkenes (69.7, 30)	185.44	184.80	11.72	11.73
Longyearbyen (78.2, 15.6)	170.50	169.89	2.97	2.95

## 2.4 Kvalitetsmål

Dette delkapittelet inneholder statistiske formler og begreper brukt i denne avhandlingen, samt en beskrivelse av alle kvalitetsmålene.

### 2.4.1 Standardavvik

Beskrivelsen til standardavvik er typisk avvik fra gjennomsnittsverdien og er det vanligste av alle spredningsmål. Utgangspunktet er å se på hvor mye hver enkelt observasjon avviker i forhold til gjennomsnittet (Løvås, 2013, s. 55). Standardavviket defineres som kvadratroten av variansen. Symbolet  $s$  blir brukt for standardavviket og symbolet  $s^2$  for variansen. Avvikskvadratene  $(x_i - \bar{x})^2$  blir summert og delt på antall avvik  $n - 1$ . Formel 2.19 og 2.20 gir empirisk varians og empirisk standardavvik utifra et utvalg fra en statistisk fordeling.

$$\text{Varians} = s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.19)$$

$$\text{Standardavvik} = s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.20)$$

Hvor  $n$  er antall observasjoner,  $\bar{x}$  er gjennomsnittsverdien av alle observasjoner og  $x_i$  er hver enkel observasjon.

## 2.4.2 Normalfordeling

En variabel  $X$  er normalfordelt med forventningsverdi  $\mu$  og standardavvik  $\sigma$  hvis sannsynlighetstettheten er lik (Løvås, 2013, s. 190)

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (2.21)$$

Normalfordeling har notasjon  $X \sim Normal(\mu, \sigma)$ .

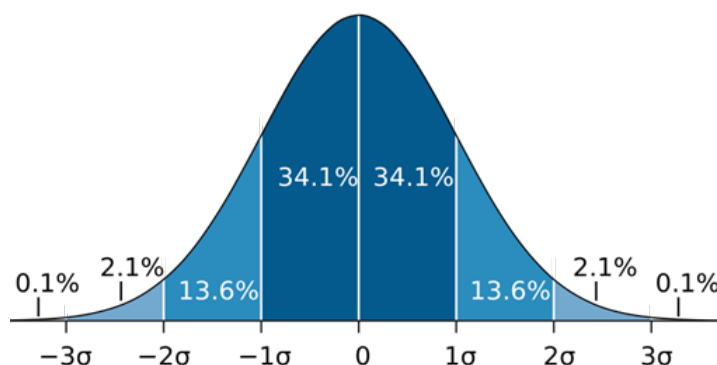
Det har blitt enighet blant statistikere at normalfordelingen med forventning  $\mu = 0$  og standardavvik  $\sigma = 1$  egner seg godt til å være den fordelingen vi skal ta utgangspunkt i. Denne fordelingen kalles derfor *standardnormalfordelingen*, og dens fordelingsfunksjon kalles  $G$  for gauss (Løvås, 2013, s. 191).

I en normalfordelingen vil variabelen  $Z$  være standardnormalfordelt med kumulativ fordelingsfunksjon  $G$ .

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \sim Normal(0, 1) \quad (2.22)$$

$$G(z) = P(Z \leq z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z e^{-t^2/2} dt \quad (2.23)$$

I formel 2.21 kreves det to parametere, gjennomsnitt  $\mu$  for plassering og et standardavvik  $\sigma$  til skalering. Arealet under normalfordelingskurven regnes ut ved å integrere tettheten fra  $-\infty$  til  $z$  i formel 2.23. Dette gir ut sannsynligheter for verdier innenfor et gitt intervall i normalfordelingen. Figur 2.17 viser en normalfordeling med forventningsverdi lik 0 og standardavvikene  $1\sigma$ ,  $2\sigma$  og  $3\sigma$ . 68% av verdiene vil ligge innen  $1\sigma$  fra forventningsverdi og tilsvarende 95% og 99.7% for  $2\sigma$  og  $3\sigma$ .



Figur 2.17: Normalfordelingskurven (Toews., 2007).

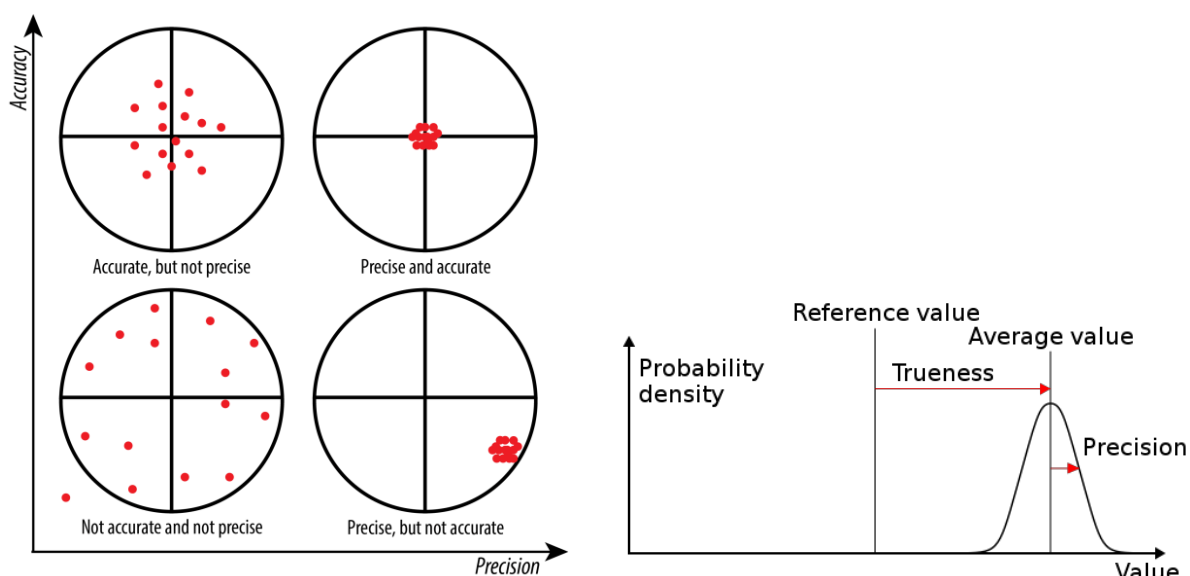
### 2.4.3 Presisjon og Nøyaktighet

En estimator er en stokastisk variabel knyttet til en forsøksserie, og som har den egenskapen at den observerte verdien kan brukes til å anslå en ukjent parameter (Løvås, 2013, s. 228). I boken statistikk fra Gunnar Løvås formuleres stokastisk variabel inn i følgende tre krav:

1. Estimatoren skal være forventningsrett, dvs  $E(\hat{\theta}) = \theta$
2. Estimatoren skal ha minst mulig varians, dvs.  $Var(\hat{\theta})$  minst mulig.
3. Estimatorens varians skal gå mot null når størrelsen på utvalget øker.

Tenk deg en dartskive og en dartspiller som kaster flere darpiler. Forestill deg at fasiten ligger i blinkens sentrum. En dartspiller har liten spredning (variens) i kastene sine hvis de treffer nær hverandre. Dartspilleren har kastet bra (forventningsrett) hvis kastene fordeler seg symmetrisk rundt blinkens sentrum. Figur 2.18a viser en fin statistisk illustrasjon av følgende mulige utfall etter flere pilkast:

1. Lav nøyaktighet og lav presisjon → Ikke forventningsrett og stor varians
2. Lav nøyaktighet og høy presisjon → Ikke forventningsrett og liten varians
3. Høy nøyaktighet og lav presisjon → Forventningsrett og stor varians
4. Høy nøyaktighet og høy presisjon → Forventningsrett og liten varians



(a) Presisjon vs Nøyaktighet (St. Olaf College, n.d.)

(b) Sann verdi og presisjon (SV1XV, 2013)

**Figur 2.18:** Nøyaktighetsmål og presisjonsmål.

Kvadratisk gjennomsnitt (RMS-verdi) er bedre kjent som "Root Mean Square" på engelsk, oppgir feilmarginen av en eller flere målinger og blir brukt som nøyaktighetsmål fra den sanne verdien. For å finne feilen tar man kvadratroten av populasjonsvariansen som vist i formel 2.24

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}} \quad (2.24)$$

hvor  $\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2$  er summen av kvadrerte feil,  $n$  er antall målinger,  $x_i$  er de individuelle observerte verdiene og  $\mu$  er den sanne verdien.

Standardavviket er et praktisk verktøy for å finne presisjonen til utvalget av et datasett. Ved hjelp av formel 2.25 kan man regne ut standardavviket  $s$  som er kvadratroten av variansen til utvalget (Ghilani, 2018, s. 22):

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}{n-1}}, \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (2.25)$$

hvor  $\sum_{i=1}^n v_i^2$  er summen av residualene kvadrert,  $n-1$  er frihetsgradene,  $n$  er antall målinger,  $\bar{y}$  er aritmetisk gjennomsnitt og  $y_i$  er de observerte verdiene.

Nøyaktighet og presisjon forveksles ofte og brukes om hverandre i litteraturen. Det er en fundamental forskjell på de to i den statistiske litteraturen, og derfor er det viktig å holde et klart skille mellom de. Nøyaktighet er hvor nær måleresultatene forplanter seg til den aksepterte (sanne) verdien, mens presisjon viser hvor bra målingene gjentar seg under permanente forhold og i hvilken grad de klarer å reprodusere de samme resultatene. Figur 2.18 er en fin illustrasjon som viser skillet mellom nøyaktighet og presisjon, hvor nøyaktighet er avhengig av den sanne referanseverdien, mens presisjon er uavhengig og baserer seg kun på utvalget.

I denne masteroppgaven blir RMS-verdien brukt som et *nøyaktighetsmål* og standardavviket  $s$  som et *presisjonsmål*, som oppgitt i ligning (2.24) og (2.25).

#### 2.4.4 Distanse kvadratisk gjennomsnitt (DRMS)

Distanse kvadratisk gjennomsnitt er bedre kjent som DRMS, eller "Distance Root Mean Square" på engelsk. Det er et kvalitetstall som definerer nøyaktighet i grunnriss. For å finne den horisontale posisjonsfeilen, må det kvadratiske gjennomsnittet RMS fra den sanne verdien være kjent (NovAtel, 2003). Matematisk er DRMS gitt ved:

$$DRMS_{grunnriss} = \sqrt{(RMS_N)^2 + (RMS_E)^2} \quad (2.26)$$

hvor  $(RMS_N)^2$  og  $(RMS_E)^2$  er det beregnede kvadratiske gjennomsnittet for nord- og østkoordinaten.

I tabell 2.18 er det beskrevet mer detaljert om kvalitetstallene og deres sannsynlighet.

**Tabell 2.18:** Kvalitetstall i grunnriss.

Kvalitetstall	Sannsynlighet	Definisjon
$DRMS_{grunnriss}$	63.2 %	Kvadratrotten av gjennomsnittet av de kvadrerte horisontale posisjonsfeilene.
$2DRMS_{grunnriss}$	98.2 %	To ganger DRMS av horisontale posisjonsfeil.

### Forventet nøyaktighet i grunnriss

Basert på den vitenskapelige artikkelen ”Assessment of the accuracy and convergence period of Precise Point Positioning” er det presentert nøyaktighetstall i grunnriss med ulike konvergenstider. De har brukt 523 daglige observasjonsfiler fra 75 globale distribuerte IGS stasjoner fra perioden 49-55 dag i året (DOY) i 2012. Alle dataene deres ble behandlet ved bruk av PPP-metoden og nøyaktigheten ble beregnet mot IGS sin ukentlige SINEX-løsning. I tabell 2.19 er det listet opp anbefalte PPP konvergenstider opp mot forventet nøyaktighet i grunnriss. Legg merke til at disse resultatene baserer seg på godt/perfekte plasserte IGS-stasjoner som ikke tar utgangspunkt i dårlige egnede punkt mht. obstruksjoner.

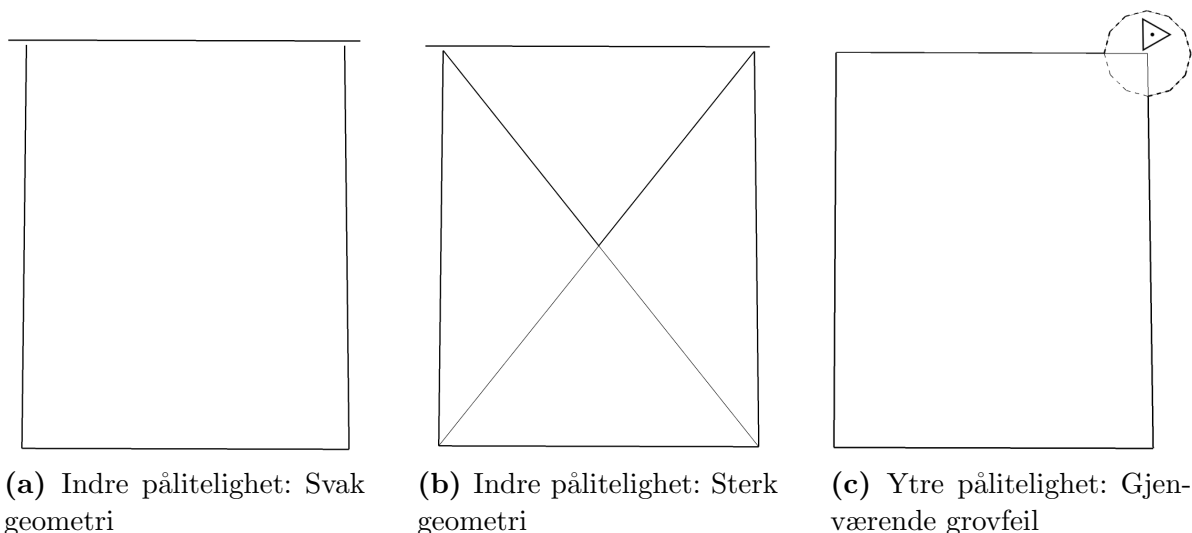
**Tabell 2.19:** Anbefalte PPP-perioder for ulike nøyaktigheter i grunnriss (Abou-Galala et al., 2018).

Nøyaktighet i grunnriss (cm)	Anbefalt PPP-periode (min)
100	5
50	15
20	30
10	55
5	60

### 2.4.5 Pålitelighet

I ordboka er pålitelighet beskrevet som: *som stemmer med virkeligheten, troverdig og vederheftig*. Innen litteraturen i parameterestimering skilles det mellom kvalitetsbegrepene indre og ytre pålitelighet. Indre pålitelighet sier hvor godt observasjonene i et system gjensidig kontrollerer hverandre, dvs. hvordan en grov feil i en observasjon gjenspeiles i den tilhørende utjevningskorreksjon (“Ordbok for kart og oppmåling”, 1989, s. 17). Figur 2.19a og 2.19b illustrerer forskjellen på et system med en svak geometri og et annet med sterk geometri.





Figur 2.19: Indre og ytre pålitelighet.

Ytre pålitelighet er virkningen på de ukjente i utjevningen av mulige gjenværende grove feil i observasjonene (“Ordbok for kart og oppmåling”, 1989, s. 23). I figur 2.19c ser man hvor stor skade den største gjenværende grovfeilen i et system kan gjøre.

Matrikkelen er et stort register over Norges faste eiendommer, som inneholder oversikt over bygninger, adresser, eiendomsgrenser og eiendommer. I stedfestingsstandarden stilles det ulike krav for merking og måling av slike grenser. Disse kravene varierer for ulike FKB-områdetyper (“Alle eiendomsgrenser i matrikkelen har god nøyaktighet”, 2021). Tabell 2.20 viser en oversikt over kravene for ytre pålitelighet i både grunnriss og høyde for de ulike områdetypene.

Tabell 2.20: Krav til ytre pålitelighet ved stedfesting av matrikkelenegtsgrenser for forskjellige områdetyper (“Alle eiendomsgrenser i matrikkelen har god nøyaktighet”, 2021).

Områdetype			Grunnriss	Høyde
1	Byområde (høy grad av utnytting)	FKB-A	0.10 m	0.10 m
2	Tettbygd/utbyggingsområder	FKB-B	0.10 m	0.10 m
3a	Spredtbygd/dyrket mark	FKB-C	0.10 m	0.10 m
3b	Skog/utmark	FKB-C	0.50 m	0.50 m
4	Fjell/ekstensiv arealutnytting	FKB-D	0.50 m	0.50 m

## 2.4.6 Ukorrelerte observasjoner

Ukorrelerte observasjoner vil ha en kovariansmatrise bestående av kovarianser fylt med null og den estimerte variansen  $s_0^2$  på diagonalen, som vist i formel 2.28. Vektmatrisen  $P$  er definert i ligning 2.27 (Ghilani, 2018, s. 180)

$$P = s_0^2 \cdot C_{ll}^{-1} = Q_{xx} \quad (2.27)$$

hvor  $s_0^2$  er estimerte variansen,  $C_{ll}$  er kovariansmatrisen og  $Q_{xx}$  er Kofaktormatrisen.

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} s_0^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & s_0^2 \end{bmatrix}, \quad P = s_0^2 \cdot C_{ll}, \quad s_0^2 = 1 \quad (2.28)$$

Fra ligning 2.28, vil uavhengige observasjoner med variansen lik  $s_i^2$  ha en vekt gitt ved

$$P_i = \frac{s_0^2}{s_i^2} \quad (2.29)$$

hvis observasjonen har en vekt,  $P_i = 1$ , så vil  $s_0^2 = s_i^2$ , eller  $s_0^2 = 1$ .

Den ukorrelerede kovariansmatrisen vil da være gitt ved

$$C_{ll} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

## 2.4.7 Integritet

På store norske leksikon står det at integritet betyr selvstendighet, ukrenkelig, hel eller bevart i sin helhet. I satellittgeodesien brukes begrepet til hvor godt egnet et system er rustet mot systematiske feil i sin helhet og kan ses som et mål på tilliten til nøyaktigheten av posisjonsløsningen. Integritet inkluderer evnen et system til å gi tidsmessig og gyldig advarsler til brukeren. Mange av konseptene knyttet til GNSS-integritet stammer fra utviklingen av Wide Area Augmentation System (WAAS).

## 2.5 Proj

Proj er en transformasjonsbiblioteket bestående av åpen kildekode med ulike kommandolinje applikasjoner (CLA), som transformerer koordinater mellom både geodetiske datum og kartprojeksjoner (“PROJ”, 2023). I tillegg er biblioteket lagt opp til å bruke EPSG-koder. Geonorge har en oversikt over alle EPSG kodene som blir brukt i Norge på nettsiden deres (GEONORGE, 2022).

Biblioteket er lisensiert som åpen kildekode, som betyr at det er fritt tilgjengelig for alle. Proj er plattformuavhengig og kan kjøres på operativsystemene Windows, Linux og Mac OS. Installasjon av biblioteket kan skje fra OsGeo, Anaconda (Miniconda), Vcpkg (Windows Command Prompt), Debian, Fedora og Red Hat. API grensesnittene som er tilgjengelige for Proj er C/C++-API, Pyproj i Python, Proj.Net i vn.net, Proj4J

i Java og proj4js.org i Javascript. Proj støtter blant annet GDAL som er et bibliotek med åpen kilde, med funksjonalitet for rasteroperasjoner og FME som er et verktøy for restrukturering, analyse og konvertering av geografiske data. Andre kjente programmer med støtte til Proj er ArcGIS, MATLAB, PostGIS, QGIS, MapServer, R og gvSIG.

Alle ressursfilene til Proj finnes på nettsiden [cdn.proj.org](http://cdn.proj.org), her er det mulig å finne deformasjonsmodeller, landhevingsmodeller, bevegelsesmodeller, restfeilsmodeller, translasjonsmodeller, geoidmodeller, horisontale og vertikale gridd. I skrivende stund støtter biblioteket de norske transformasjonene mellom referanserammene EUREF89 til NGO1948, EUREF89 til ED50 og EUREF89 til ITRF14. Den sistnevnte er basert på NKG transformasjonen NKG2020, med bevegelsesmodellen NKGRF17vel og i tillegg en Helmert transformasjon. I Proj blir transformasjonen mellom EUREF89 til NGO48 beregnet fra en TIN-modell med translasjoner for bredde og lengde, basert på en bilinear interpolasjon fra TIN-modellen.

I denne avhandlingen ble Pyproj grensesnittet brukt, og det kom godt til nytte, siden all analysen ble gjort i Python. Kartverket sitt eget transformasjonsprogramvare "SkTrans" skal fases ut med Proj på sikt. For videre lesning sjekk ut brukerveiledning for bruk av transformasjoner i kartverket og transformasjonsbiblioteket Proj på den norske nettsiden: [kartverket.github.io](http://kartverket.github.io).

## 2.6 Formater

Dette delkapittelet inneholder relevante formater brukt i denne masteroppgaven.

### 2.6.1 NMEA

NMEA står for **N**ational **M**arine **E**lectronics **A**ssociation - er et utvekslingsformat designet for å brukes sammen med marine teknikker slik som ekkolodd, GNSS mottakere, gyroer og andre instrumenter.

Dette formatet overfører en serie med data, samt en del som ASCII (tekstformat av dataene). Hver setning eller streng starter med et "\$" etterfulgt av et adressefelt. Her spesifiseres det hvilket system dataene kommer fra ved at GP står for GPS, GL for GLONASS og GN for både GPS og GLONASS. Komma brukes til å skille dataene.

I denne avhandlingen ble NMEA-strengene GGA og GST brukt, hvor GGA inneholder data om tid, posisjon og informasjon om fix, mens GST inneholder data om statistikk av posisjonsfeil. En nærmere beskrivelse av strengene kan ses i tabell 2.21.

**Tabell 2.21:** Beskrivelse av innhold i NMEA-strengene GGA & GST (Trimble, 2023). Brukte felt i analysen er markert i grønt.

Msg	Function	Field	Meaning
GGA	Time, position, and fix related data	0	Message ID \$GPGGA
		1	UTC of position fix
		2	Latitude (DDmm.mm)
		3	Direction of latitude: N: North S: South
		4	Longitude (DDDmm.mm)
		5	Direction of longitude: E: East W: West
		6	GPS Quality indicator: Se tabell 2.22
		7	Number of SVs in use, range from 00 through to 24+
		8	HDOP
		9	Orthometric height (MSL reference)
		10	M: unit of measure for orthometric height is meters
		11	Geoid separation
		12	M: geoid separation measured in meters
		13	Age of differential GPS data record, Type 1 or Type 9. Null field when DGPS is not used.
		14	Reference station ID
15	The checksum data, always begins with *		
GST	Position error statistics	0	Message ID \$GPGST
		1	UTC of position fix
		2	RMS value of the pseudorange residuals; includes carrier phase residuals during periods of RTK (float) and RTK (fixed) processing
		3	Error ellipse semi-major axis 1-sigma error, in meters
		4	Error ellipse semi-minor axis 1-sigma error, in meters
		5	Error ellipse orientation, degrees from true north
		6	Latitude 1-sigma error, in meters
		7	Longitude 1-sigma error, in meters
		8	Height 1-sigma error, in meters
		9	The checksum data, always begins with *

**Tabell 2.22:** Beskrivelse av GNSS kvalitetstall feltet i GGA-strengen.

Field	GPS Quality indicator
6	0: Fix not valid 1: GPS fix 2: Differential GPS fix (DGNSS), SBAS, OmniSTAR VBS, Beacon, RTX in GVBS mode 3: Not applicable 4: RTK Fixed, xFill 5: RTK Float, OmniSTAR XP/HP, Location RTK, RTX 6: INS Dead reckoning

## 2.6.2 KOF

KOF-formatet står for **K**oordinat- og **O**bservasjonsformat for **F**eltminner. Filen er en sekvensiell Ascii-fil og hver linje kan ikke data gå utover kolonne 80. Kolonne 1 i hver linje settes blank eller - (minus). Kolonne 2 og 3 er to heltall som angir type datablokk, for eksempel 00 01 02 osv. Data skal plasseres normalt i faste felt/kolonner med en blank mellom hvert datasett. Data som ikke ”eksisterer” settes blanke (Norkart, 2005).

I denne masteroppgaven er datablokkene **05 koordinatblokk** og **44 måleblokk for middelfeil og korrelasjoner** brukt. Kordinatblokken består av feltene: Punkt, Temakode, X, Y, H (ortometrisk høyde), Beregningskode og Merknad, se tabell 2.23. Måleblokken består av feltene: Andre mottagerpunkt, kode, middelfeil og korrelasjoner til vektoren, se tabell 2.24.

**Tabell 2.23:** Eksempel på 05 koordinatblokk.

-05	PPPPPPPPP	KKKKKKKK	XXXXXXXX.XXX	YYYYYYY.YYY	ZZZZ.ZZZ	Bk MMMMMMM
05	45	4616	59319.054	58196.831	123.321	

**Tabell 2.24:** Eksempel på 44 måleblokk.

-44	**s.X**	**s.Y**	**s.Z**	*r.XX**	*r.XY**	*r.XZ**	*r.YY**	*r.YZ**	*r.ZZ**
44	0.0002	0.0001	0.0004	1.0000	0.4492	0.6354	1.0000	0.4428	1.0000

## 2.6.3 LB-melding

LB-melding er en forkortelse for L-bånd melding, som inneholder forskjellig informasjon om den låste L-bånd satellitten, for den gitte korreksjonstjenesten. Meldingen sitt format er basert på Topcon-proprietære ASCII-data. Starpoint Pro mottok korreksjoner fra den geostasjonære L-bånd satellitten Eshail 1. Denne meldingen er tatt fra GIRL referanse manualen til Topcon. En komplett beskrivelse av LB-meldingen er presentert i tabell 2.25.

**Tabell 2.25:** Beskrivelse av innholdet i LB-meldingen. Meldingene logget av Topcon mottakeren og brukt i analysen er markert i grønt.

Msg	Description
sat_freq;	Current satellite nominal carrier frequency (lband/cursat/freq)
sat_srate;	Current satellite symbol rate enum (lband/cursat/srate)
sat_sid;	Current satellite Inmarsat service ID (lband/cursat/scrv)
sat_scrv;	Current satellite scrambler vector (lband/cursat/sid)
cur_freq;	Current carrier frequency [Hz]
sq;	Signal Quality indicator [fixed point 0.01 dB] (lband/stat/sq)
snr;	Signal to Noise Ratio [fixed point 0.01 dB*Hz] (lband/stat/snr)
msg_age;	Age of last message received [fixed point 0.1 sec]
rcv_sid;	Decoded Inmarsat Service ID (autodetect) (lband/stat/service)
service_enum;	Active service connected (0 - none, 1 - terra) (lband/stat/service)
ber;	BER for satellite signal [%] (lband/stat/ber)
lock;	Tracking status (lband/stat/lock)
checksum;	Checksum

## 2.6.4 RINEX

RINEX står for ”**R**ceiver **I**Ndependent **E**xchange”-format, er et kjent og mest brukte filformat for utveksling av GNSS-data. Formatet er skrevet i standard ASCII og er dermed et fleksibelt utvekslingsformat. Filtypene som er mest brukt er observasjons- og navigasjonsfilene. Observasjonsfilene inneholder informasjon om epokevise rå kode- og faseobservasjoner, signalstyrke og doppler fra de målte satellittene. Navigasjonsmeldingen inneholder informasjon om en kringkasta navigasjonsmeldingen til hver satellitt og essensielle data angående klokke- og baneparametre for å kunne navigere i sanntid. Formatet ble utviklet i 1989 og siden har det kommet flere versjoner som støtter alle satellittsystemene.

# Kapittel 3: Metode

I dette kapitlet beskrives utførelse av målinger og analyser brukt i avhandlingen. Følgende programvarer som ble benyttet er:

- Python 3.9.13 (Spyder) for å lage leserutiner for NMEA-meldingene og KOF-fasitfilen, utføre analyser samt lage plot, tabeller og resultatfiler.
- PyProj til å transformere koordinater fra geodetisk ITRF14 til EUREF89, UTM32N kartplanet og NN2000-høyder.
- Konvertere NMEA-melding til KOF-fil for koordinatene til de ulike tjenestene. I tillegg foreta en ytre pålitelighetstest i GISLINE for ønskede tidspunkter.
- TPS2RIN-rutine til å lese inn LB-meldingene og konvertere disse TPS rådataene til RINEX.

## 3.1 Måleutstyr

RT-PPP målingene ble utført med utstyret til Fugro og Topcon, som vises i tabell 3.1. Hele utstyrlisten kan ses i vedlegg B.1. Begge utstyrene ble brukt til å måle utvalgte punkt på Campus. Fasitkoordinatene P102, NMB1, K004, El20, El21 og El22 ble etablert med Topcon HiPer VR mottakeren, ved bruk av posisjonstjenesten CPOS til kartverket

**Tabell 3.1:** Oversiktstabell over brukt utstyr fra Topcon og Fugro.

Topcon HiPer VR	TopCon GM-50	Topcon trestativ	Topcon målebok
			
<b>VeroStar VSP6037L</b>		<b>Trimble BX992</b>	
			

## 3.2 Etablerte fasitkoordinater

Fasitkoordinater for punktene P102, K004, El20, El21 og El22 ble etablert ved 4 målinger av samme punkt, mens NMB1 ble målt 3 ganger, se feltlogg i vedlegg B.2. Hvert punkt ble kontrollert med en ny måling minst 45 minutter fra den tidligere. Koordinatene oppgis i EUREF89 UTM32N. Notasjon i grunnriss er nord (N) og øst (E), mens den ortometriske høyden ( $h$ ) oppgis relativt til geoiden for NN2000.

Målingene ble analysert i GISLINE, ved å utføre testene grovfeilsøk, indre pålitelighet, ytre pålitelighet og en utjevning. I ytre pålitelighetstesten er alle verdiene innefor kravene i eiendomsnormen. Ytre pålitelighetstesten kan ses i vedlegg C.1. De utjevnedede CPOS-målte fasitkoordinatene er gitt i tabellene 3.2 og 3.3.

**Tabell 3.2:** Fasitkoordinater fra CPOS-målinger i punktene K004, P102 og NMB1, oppgitt nord- og østkoordinater i EUREF89 UTM32 og NN2000-høyder samt tilhørende standardavvik.

	$N_{K004} \pm \sigma_N$	$E_{K004} \pm \sigma_E$	$h_{K004} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6 615 533.039 $\pm$ 0.004	599 458.433 $\pm$ 0.002	82.728 $\pm$ 0.006
	$N_{P102} \pm \sigma_N$	$E_{P102} \pm \sigma_E$	$h_{P102} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6 615 542.314 $\pm$ 0.002	600 043.417 $\pm$ 0.001	97.520 $\pm$ 0.003
	$N_{NMB1} \pm \sigma_N$	$E_{NMB1} \pm \sigma_E$	$h_{NMB1} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6 615 708.449 $\pm$ 0.002	599 809.067 $\pm$ 0.001	103.175 $\pm$ 0.004

**Tabell 3.3:** Fasitkoordinater fra CPOS-målinger i punkt El20, El21 og El22, oppgitt nord- og østkoordinater i EUREF89 UTM32 og NN2000-høyder samt tilhørende standardavvik.

	$N_{El20} \pm \sigma_N$	$E_{El20} \pm \sigma_E$	$h_{El20} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6 615 612.556 $\pm$ 0.002	599 912.413 $\pm$ 0.002	98.615 $\pm$ 0.004
	$N_{El21} \pm \sigma_N$	$E_{El21} \pm \sigma_E$	$h_{El21} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6 615 610.689 $\pm$ 0.002	599 912.521 $\pm$ 0.001	98.466 $\pm$ 0.004
	$N_{El22} \pm \sigma_N$	$E_{El22} \pm \sigma_E$	$h_{El22} \pm \sigma_h$
<b>Fasit</b>	6615609.067 $\pm$ 0.002	599912.674 $\pm$ 0.001	98.305 $\pm$ 0.004

## 3.3 Transformere koordinater i Pyproj

Transformasjoner ble gjennomført for RT-PPP målingene til tjenestene Starfix G4, Starfix G4+ og Starpoint Pro. Koordinatene i NMEA-meldingen til Starfix og Starpoint er oppgitt ITRF14 "current epoch", og i geodetiske koordinater (breddegrad, lengdegrad og ellipsoidisk høyde). Alle koordinatene ble transformert fra ITRF14 til EUREF89, for å få de i UTM32N kartplanet og i det norske høydedatumet NN2000. Etter transformeringen var koordinatene klare til å sammenlignes med de etablerte CPOS fasitkoordinatene. I



figur 3.1 er det presentert en Python funksjon som transformerer med Pyproj fra ITRF14 til EUREF89.

```

from pyproj import Transformer

# Transformere fra ITRF14 (EPSG:7912) til EUREF89 UTM32N + NN2000 (EPSG:5972)
coordinate = Transformer.from_crs(7912,5972)

# Funksjon med input-ene breddegrad, lengdegrad, ellipsoidisk høyde og epoke
# Output er koordinater oppgitt i EUREF89 UTM32N + NN2000
def TransformITRF14toEUREF89UTM32N(lat,lon,height,epoch):

    UTM32N = coordinate.transform(lat,lon,height,epoch)

    return UTM32N

if __name__ == "__main__":
    pass

```

Figur 3.1: Python funksjon for transformasjon med Pyproj fra ITRF14 til EUREF89.

### 3.4 NMEA til KOF

Alle NMEA-meldingene for punktene og tjenestene ble konvertert til KOF-filer med en egen generert kode i Python. Denne konverteringen var nødvendig for foreta en utjevning i GISLINE. De geodetiske koordinatene og standardavvikene fra NMEA-meldingen vist i figur 3.2, ble transformert fra ITRF14 til EUREF89 og lagt inn i en tekstfil og formatert som KOF-fil med koordinatblokk 05 og måleblokk 44, som vist i figur 3.3. Korrelasjonsvektoren består av 1 og 0 grunnet de ukorrelerte observasjonene mellom målingene, se delkapittel 2.4.6. Dette ble utført for alle de uavhengige målingene til punktene og tjenestene mot ønskede tidspunkter ut i måleøkten.

```

154 $GPGGA,114425.00,5939.95428229,N,01045.93140953,E,5,06,1.3,78.151,M,39.076,M,12.0,1012*48
155 $GPGST,114425.00,0.088,1.409,1.082,30.3,1.333,1.174,1.482*69

```

Figur 3.2: Liten tekstsnett tatt fra NMEA-melding.

```

1 .05 K004 .....6615526.869...599459.816...76.566.96.....
2 .44...1.3330...1.1740...1.4820...1.0000...0.0000...0.0000...1.0000...0.0000...1.0000

```

Figur 3.3: Liten tekstsnett tatt fra KOF-fil.

### 3.5 RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås

I forkant ble det tatt en grundig vurdering hvilke 3 punkt som skulle måles fra det eksisterende grunnlagsnettet til NMBU på campus. Det var viktig med god fremkommelighet både til og mellom punktene. Informasjon fra det tidligere emnet GMGD320 kom godt til nytte, hvor det ble utført en visuell vurdering og tegnet opp obstruksjonsplott av alle

punktene, se vedlegg A. Basert på det, ble NMB1 valgt som et godt egnet punkt, P102 som et middels godt egnet punkt og K004 som et dårlig egnet punkt. I tillegg er det interessant å sammenligne de målte posisjonene med RT-PPP fra de etablerte CPOS fastkoordinatene. Figur 3.4 og 3.5 viser en oversikt over campus i Ås og tilhørende brukte punkt.



(a) NMB1



(b) K004



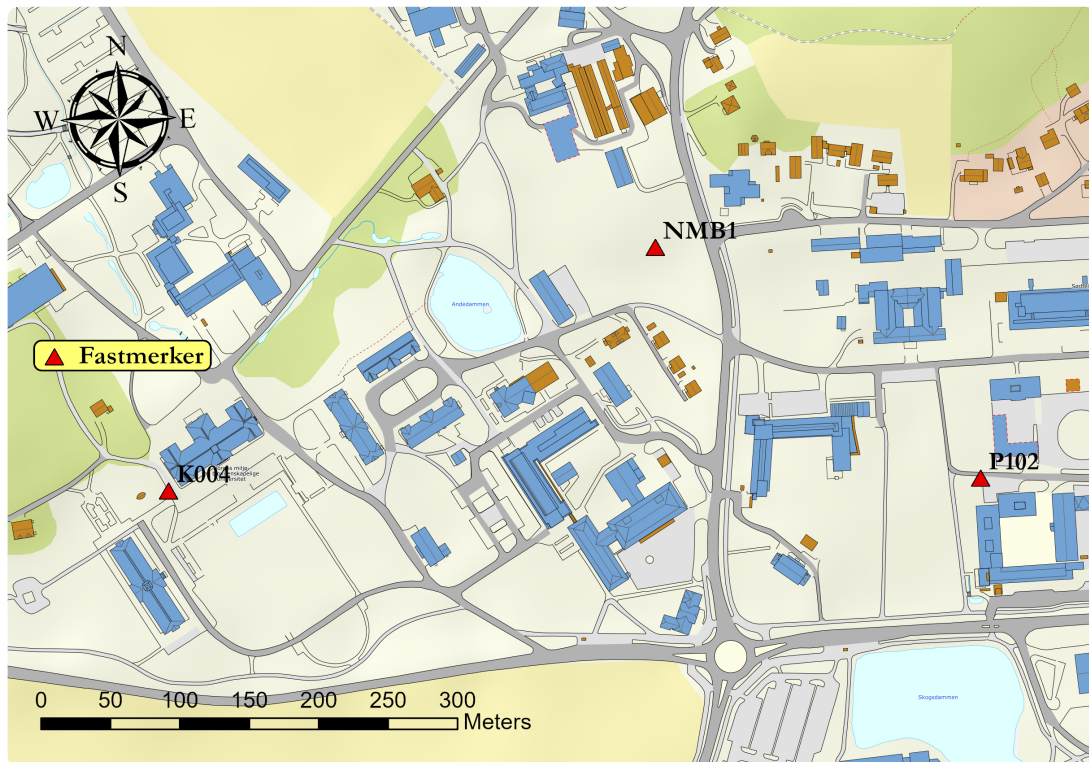
(c) P102

**Figur 3.4:** Bilder av målte punkter.

Plasseringen til NMB1 er på en søyle i et åpent terreng. Landskapet i terrenget står i en helning, hvor det høyeste punktet er i nord og det laveste i sør. Det er ingen store obstruksjoner å ta hensyn til.

Plasseringen til P102 er ved en gruskant omringet av 2 bygg. Bygningen ”Studentenes Hus” ligger cirka 18 meter nord-øst for punktet. Den nærmeste delen av TF1-bygget ligger også cirka 18 meter sør-øst for punktet. Det er tillegg noen høye trær plassert i sør-vest og nord-vest.

Plasseringen til K004 er ved flere store bygg. Urbygningen ligger cirka 9 meter nord-øst for punktet. Tårnbygningen ligger i underkant av 60 meter sør-vest for punktet. I tillegg er det noen høye trær i både sør og nord-vest.



Figur 3.5: Oversiktskart over de brukte fastmerkene K004, NMB1 og P102.

### 3.5.1 Datainnsamling

I målingene ble RT-PPP tjenestene Starfix G4, Starfix G4 + og Starpoint Pro brukt. I hvert punkt ble det satt opp et stativ og ved bruk av en trefot med optikk ble punktet sentrert og satt i vater. En måletid på 1 time ble gjort i alle punktene og repetert 4 ganger for hvert punkt. Mottakeren måtte slås av og skrur på igjen for å få uavhengige måleøkter. Dataraten ble satt til 1 s (1 Hz). I tabell 3.4 er det full oversikt over alle de målingene gjort med de ulike tjenestene. I vedlegg B.1 finnes det måleskjemaer for loggingen av dataene.

Tabell 3.4: Datainnsamling for alle tjenestene.

Antall	Dato	Pkt.	Mottakertype	Antennetype	Datarate	Måletid	Tjeneste
4	26.01.23	P102	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4
2	26.01.23	NMB1	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4
2	27.01.23	NMB1	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4
4	27.01.23	K004	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4
4	31.01.23	P102	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4+
4	01.02.23	NMB1	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4+
4	01.02.23	K004	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	1 t	Starfix G4+
4	26.01.23	P102		Topcon HiPer VR	1s (1 Hz)	1 t	Starpoint Pro
4	26.01.23	NMB1		Topcon HiPer VR	1s (1 Hz)	1 t	Starpoint Pro
4	27.01.23	K004		Topcon HiPer VR	1s (1 Hz)	1 t	Starpoint Pro



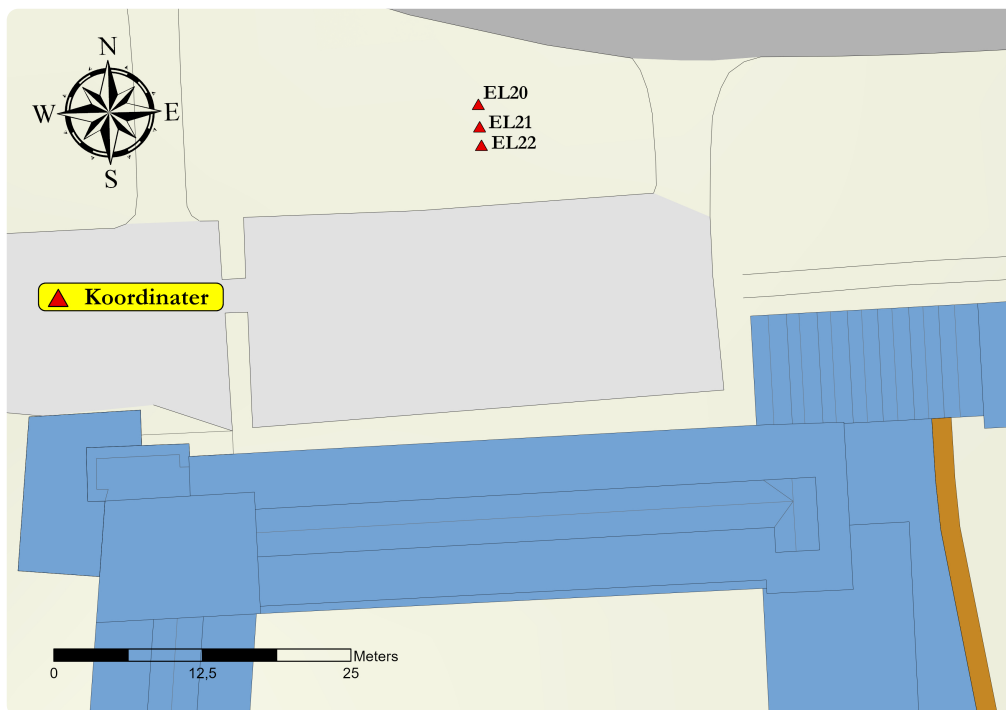
### 3.6 Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås

I forkant ble det tatt en grundig vurdering i hvilke punkt som skulle etableres til måling. Kriteriet er 3 punkter med ulik hindring i sikt til de geostasjonære satellittene Alphasat og Eshail 1. Det første punktet "EL20" skulle ha en hindring i sikt med en elevasjonsvinkel på 20 grader i sør-øst, og de to andre punktene "El21" og "El22" med tilsvarende hindring i sikt, med elevasjonsvinklene 21 grader og 22 grader. Bakteppet er å sammenligne målt signalkvalitet (Signal Quality indicator) og alder på siste mottatte korreksjonsmelding (Age of last message received) fra Starpoint Pro sin geostasjonære satellitt Eshail 1, til de punktene med ulike sikthindringer. I tillegg er det interessant å sammenligne de målte posisjonene med RT-PPP fra de etablerte CPOS fasiskoordinatene. Det var kun Topcon mottakeren og tjenesten Starpoint Pro som målte LB-meldinger.



**Figur 3.6:** Bilde fra nordsiden av NIBIO fasaden hvor punktene El20, El21 og El22 ble etablert.

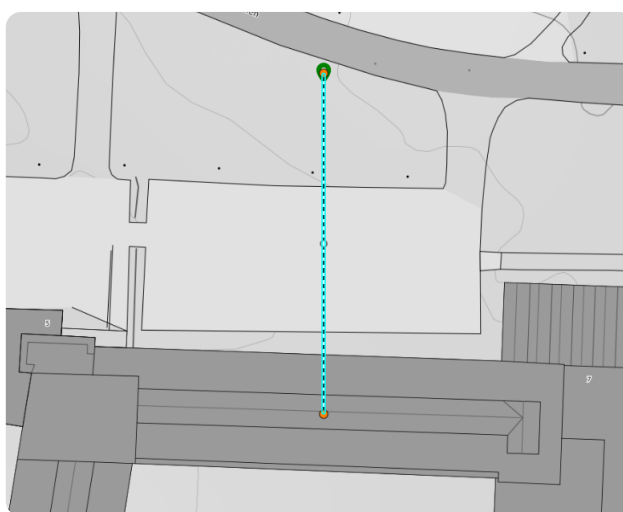
Det ble etablert 3 nye punkt på gressplen foran den store NIBIO-bygningen på campus (se figur 3.6 og 3.7), basert på kriteriet for ulike sikthindringer. Ved bruk av Kartverket sin karttjeneste for høydedata, ble UTM33N koordinaten til det høyeste punktet på bygget merket. Et punkt til ble merket 40 meter unna i nord for det forrige punktet, se tabell 3.5. I karttjenesten ble det trukket en rett linje mellom to følgende punkt med høydeprofil verktøyet, se figur 3.8.



**Figur 3.7:** Oversiktskart over de etablerte koordinatene EL20, EL21 og EL22 foran den nordlige fasaden til NIBIO-bygningen.

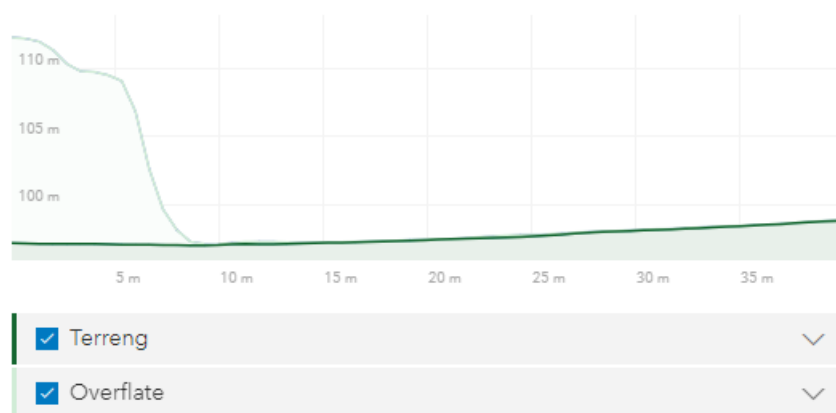
**Tabell 3.5:** Nord- og østkoordinater oppgitt i EUREF89 UTM33N.

Nord	Øst
6 621 824	261 998
6 621 864	261 998



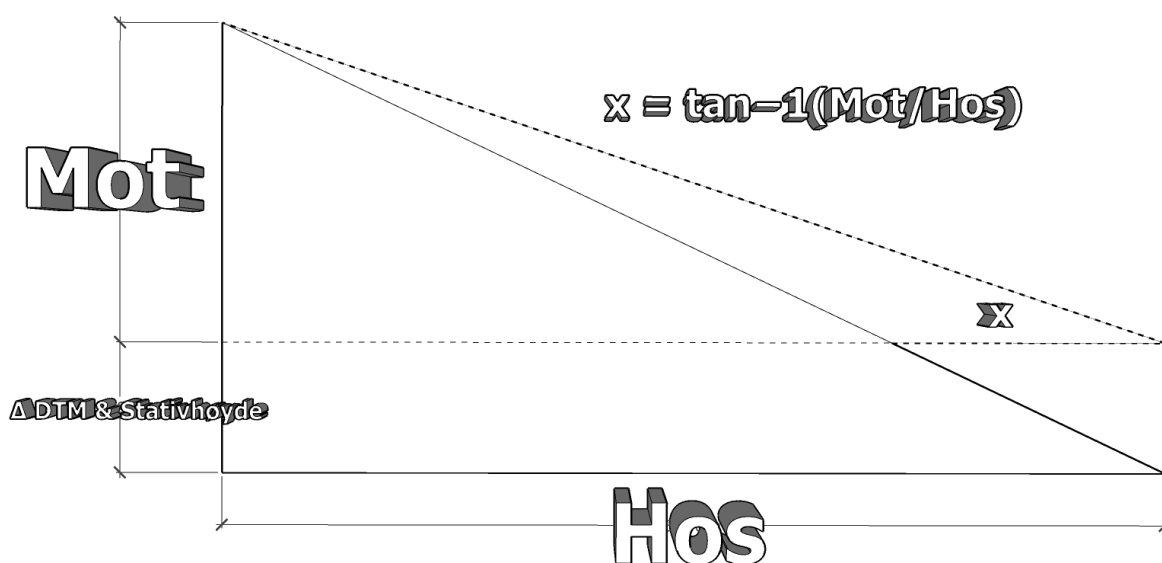
**Figur 3.8:** Trukket rett linje mellom to punkt med høydeprofil verktøyet på høydedata.no for koordinatene i tabell 3.5.

Den linjen mellom punktene genererer en høydeprofil av både terrenget og overflaten, som vist i figur 3.9. Med den horisontale avstanden vil både terrenget og overflaten endre seg, og det er denne endringen som er interessant, når man skal regne ut elevasjonsvinkler.



Figur 3.9: Høydeprofil fra høydedata.no generert av trukket line i figur 3.8.

Tatt utgangspunkt i høydeprofilen fra figur 3.9, er det mulig å finne verdier som gir ut de ønskede vinklene 20, 21 og 22 grader, ved anvendelse av trigonometri. Den motstående kateten ble funnet ved å subtrahere terrenget fra overflaten. Det er viktig å ta hensyn til endring i terrenget og stativhøyden basert på den horisontale avstanden, for å finne de riktige elevasjonsvinklene  $x$ , se figur 3.10.



Figur 3.10: Trigonometrisk formel basert på vinkelen  $x$  med endring i DTM og stativhøyde.

Etter litt beregning ble de riktige verdiene regnet ut, som tilfredsstilte elevasjonsvinklene  $x$  gitt i tabell 3.6. Hver hosliggende katet ble addert med nordkoordinaten til det første punktet i tabell 3.5 og deretter transformert enkeltvis fra UTM33N til UTM32N. De 3 koordinatene ble lagt inn i en KOF-fil uten høyder. Filen ble lagt inn i måleboken til Topcon og stukket ut samme dag med CPOS. 3 Betongskruer ble hamret ned i terrenget for punktene El20, El21 og El22.

**Tabell 3.6:** Verdier som gir ønskede vinkler  $x$ .

Hosliggende katet	Motstående katet	$\Delta$ DTM	Stativhøyde	$x$
31.7	12.8	1	1.3	$\simeq 22$
33.3	12.8	1.1	1.2	$\simeq 21$
35.2	12.8	1.2	1.1	$\simeq 20$

### 3.6.1 Datainnsamling

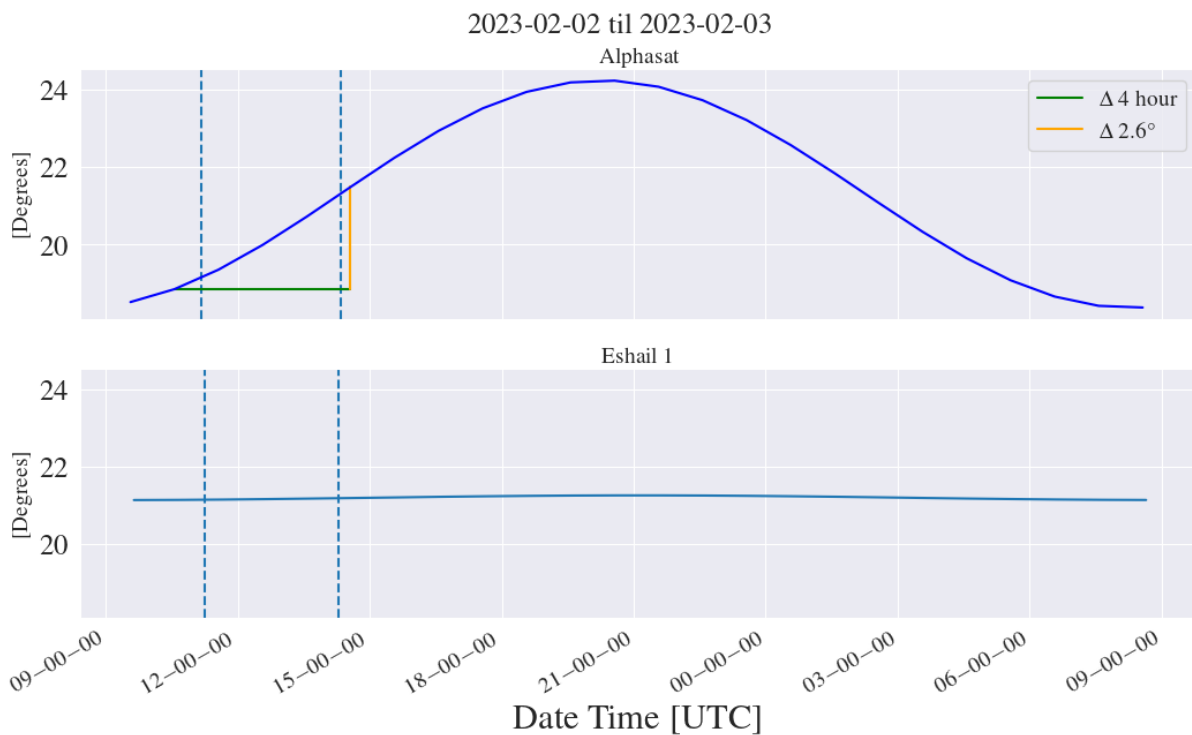
I målingene ble RT-PPP tjenestene Starfix G4, Starfix G4+ og Starpoint Pro brukt. I hvert punkt ble det satt opp et stativ og ved bruk av en trefot med optikk ble punktet sentrert og satt i vater. En måletid på 10 minutter ble gjort i alle punktene og repetert 4 ganger for hvert punkt. Mottakeren måtte slås av og skrus på igjen for å få uavhengige måleøkter. I tabellene 3.7 er det full oversikt over alle de målingene gjort med de ulike tjenestene. I vedlegg B.2 finnes det måleskjemaer for loggingen av dataene.

**Tabell 3.7:** Datainnsamling for alle tjenestene.

Antall	Dato	Pkt.	Mottakertype	Antennetype	Datarate	Måletid	Tjeneste
4	30.01.23	El20	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4
4	30.01.23	El21	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4
4	30.01.23	El22	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4
4	02.02.23	El20	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4+
4	02.02.23	El21	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4+
4	02.02.23	El22	BX992	VSP6037L	1s (1 Hz)	10 min	Starfix G4+
4	02.02.23	EL20	Topcon HiPer VR		1s (1 Hz)	10 min	Starpoint Pro
4	02.02.23	EL21	Topcon HiPer VR		1s (1 Hz)	10 min	Starpoint Pro
4	02.02.23	EL22	Topcon HiPer VR		1s (1 Hz)	10 min	Starpoint Pro

### 3.6.2 Predikerte elevasjonsvinkler

Predikerte elevasjonsvinkler fra punktene El20, El21 og El22 til de geostasjonære satellittene Alphasat og Eshail 1 ble plottet time for time for et døgn, den samme dagen det ble gjort målinger den 02.02.23, se figur 3.11. Den store endringen i elevasjonsvinkelen for Alphasat skyldes satellittens store inklinasjonsvinkel på 2.8 grader, se tabell 2.15. Den dagen endret elevasjonsvinkelen seg med 2.6 grader på 4 timer, rundt det tidspunktet målingene ble gjort. Den predikerte i elevasjonsvinkelen for Alphasat gikk fra 18.4 opp til 24.2 grader, som tilsvarer en endring på 5.8 grader, mens Eshail 1 sin endring var på 0.1 grader. Prediksjoner fra måledagen den 30.01.23 ble ikke hentet i forkant av målingene.



**Figur 3.11:** Plott som viser elevasjonsvinkler time for time for de geostasjonære satellittene Alphasat og Eshail 1 i Ås. Stiplet blå linje indikerer start og slutt på perioden av målingene, grønn linje er endring i timer og orange linje er endring i elevasjon, oppgitt i grader.

### 3.6.3 LB til RINEX

Topcon-proprietære ASCII-data måtte konverteres fra LB til RINEX. Dette ble gjort ved å bruke TPS2RIN-rutine, som brukes til å konvertere TPS rådata til RINEX. Alle filene ble lagt inn i en egen mappe med tps2rin.exe filen. En egen Python kode genererte en batch-fil med alle de filene som skulle konverteres. Følgende linje ble skrevet inn i batch-filen: `TPS2RIN - -print [filnavn.tps] > [utfil.txt]`, se figur 3.12. Batch-filen ble kjørt for å generere tekstfil med dekoderte LB meldinger.

```

1 TPS2RIN --print E120_020223A3.tps > E120_020223A3.tps.txt
2 TPS2RIN --print E120_020223B3.tps > E120_020223B3.tps.txt
3 TPS2RIN --print E120_020223C3.tps > E120_020223C3.tps.txt
4 TPS2RIN --print E120_020223D3.tps > E120_020223D3.tps.txt
5 TPS2RIN --print E121_020223A3.tps > E121_020223A3.tps.txt
6 TPS2RIN --print E121_020223B3.tps > E121_020223B3.tps.txt
7 TPS2RIN --print E121_020223C3.tps > E121_020223C3.tps.txt
8 TPS2RIN --print E121_020223D3.tps > E121_020223D3.tps.txt
9 TPS2RIN --print E122_020223A3.tps > E122_020223A3.tps.txt
10 TPS2RIN --print E122_020223B3.tps > E122_020223B3.tps.txt
11 TPS2RIN --print E122_020223C3.tps > E122_020223C3.tps.txt
12 TPS2RIN --print E122_020223D3.tps > E122_020223D3.tps.txt

```

**Figur 3.12:** Innholdet i batch-filen.



# Kapittel 4: Resultater

## 4.1 RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås

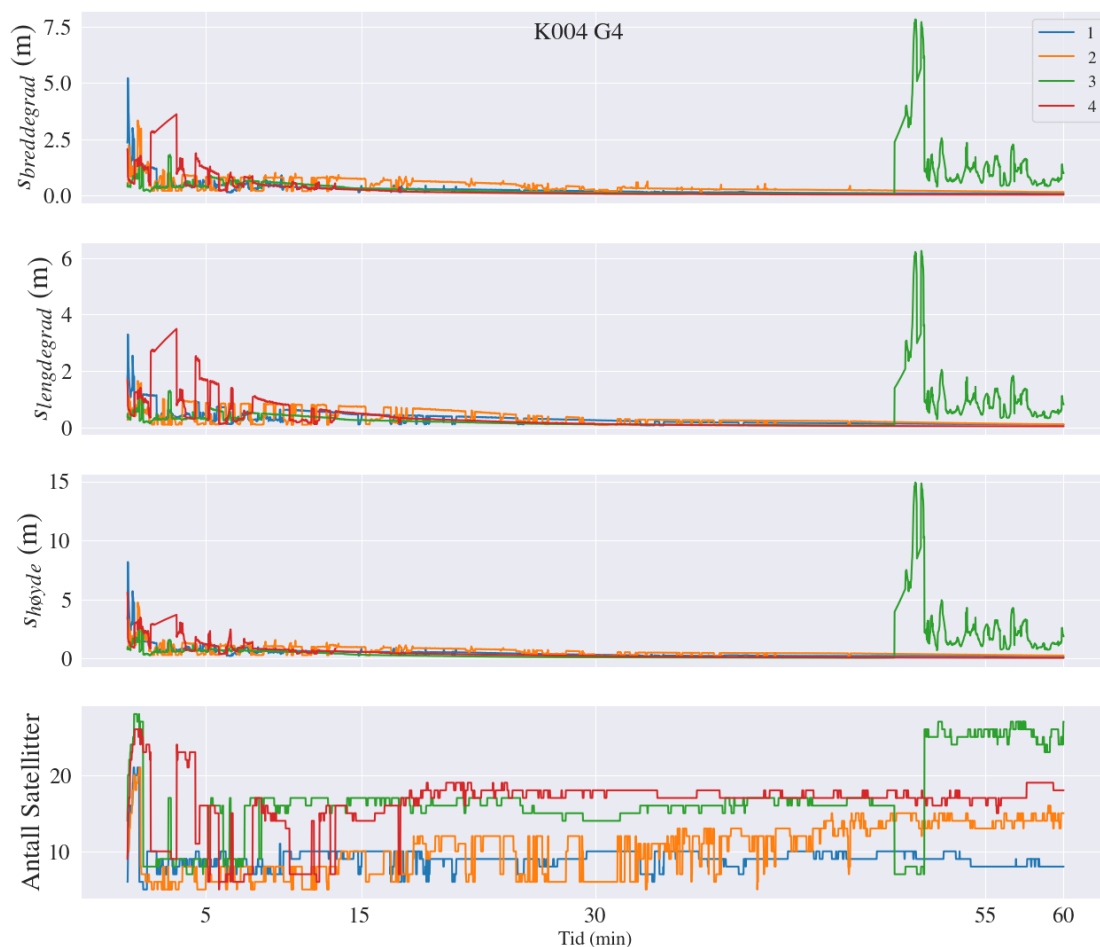
Resultatet av analysen er presentert for hvert enkelt punkt og tjeneste i form av tabeller og plot. Målte NMEA-meldinger fra tjenestene G4, G4+ og Starpoint for punktene K004, P102 og NMB1 blir sammenlignet med hverandre for formelle nøyaktighetstall samt verdier for beregnede RMS og standardavvik. I tillegg er det vist beregnede verdier for ytre pålitelighet og GNSS kvalitetstall plott.

Alle verdiene nedenfor er rundet opp til nærmeste heltall i centimeter, for å vise hvilke kvalitetstall tjenestene klarer å komme under.

### 4.1.1 Formelle nøyaktighetstall

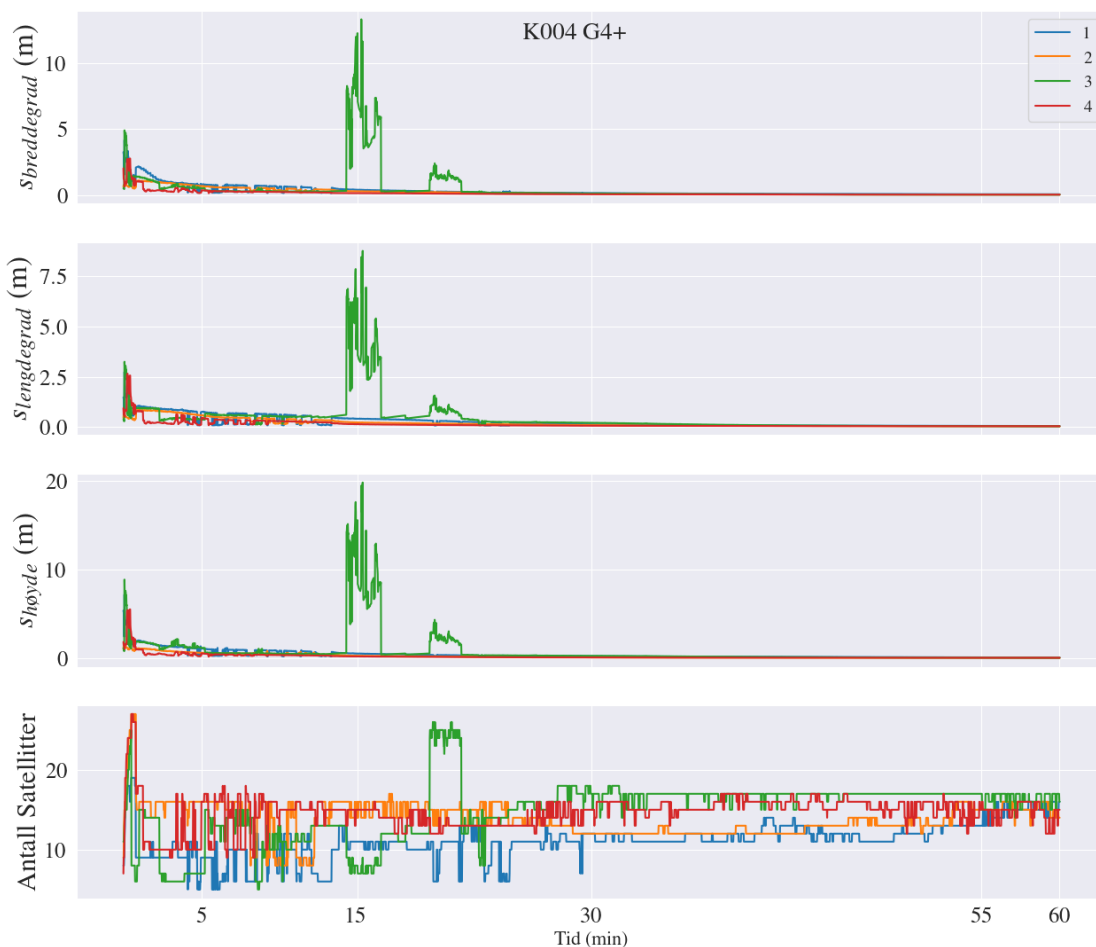
Formelle nøyaktighetstall fra GNSS-beregningene blir presentert for de punktene med avbrutt konvergens. Standardavvik i breddegrad, lengdegrad, grunnriss og høyde blir presentert som plott, stående søylediagram og tabell med konvergenstidene 5, 15, 30, 55 og 60 minutter. Nedenfor kommer Tjenestene i rekkefølgen G4, G4+ og Starpoint.

**Tabell 4.1:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4 og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens.



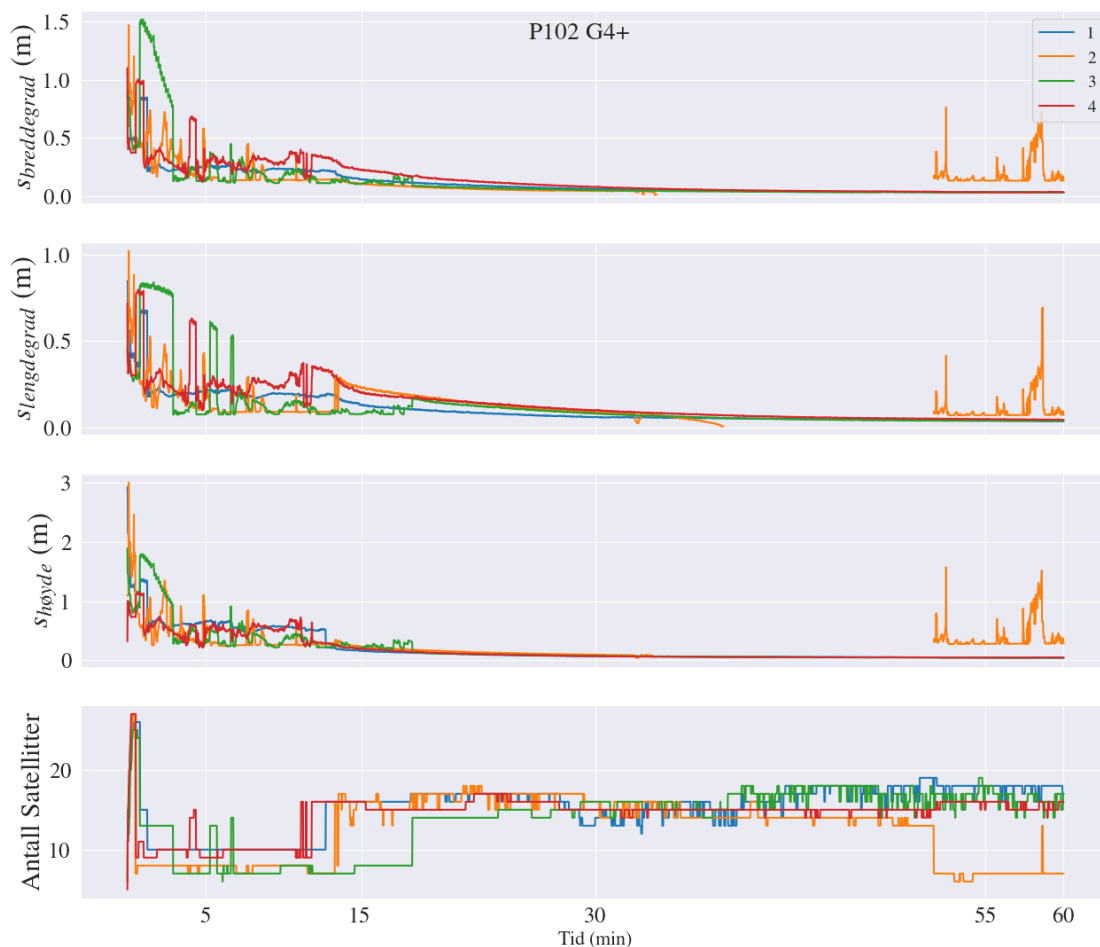
Måling	Tid (min)	$s_{bre}(cm)$	$s_{len}(cm)$	$s_{grunn}(cm)$	$s_{høy}(cm)$
1	5	58	44	72	102
	15	43	32	54	84
	30	19	26	32	33
	55	10	12	15	19
	60	8	10	13	15
2	5	23	11	25	35
	15	72	73	102	96
	30	18	10	20	25
	55	18	14	23	33
	60	15	11	19	27
3	5	40	31	51	66
	15	31	26	41	34
	30	11	11	16	12
	55	140	114	180	274
	60	99	82	128	188
4	5	119	166	204	120
	15	25	48	54	57
	30	8	13	15	23
	55	3	4	5	8
	60	3	4	5	7

**Tabell 4.2:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4+ og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens.



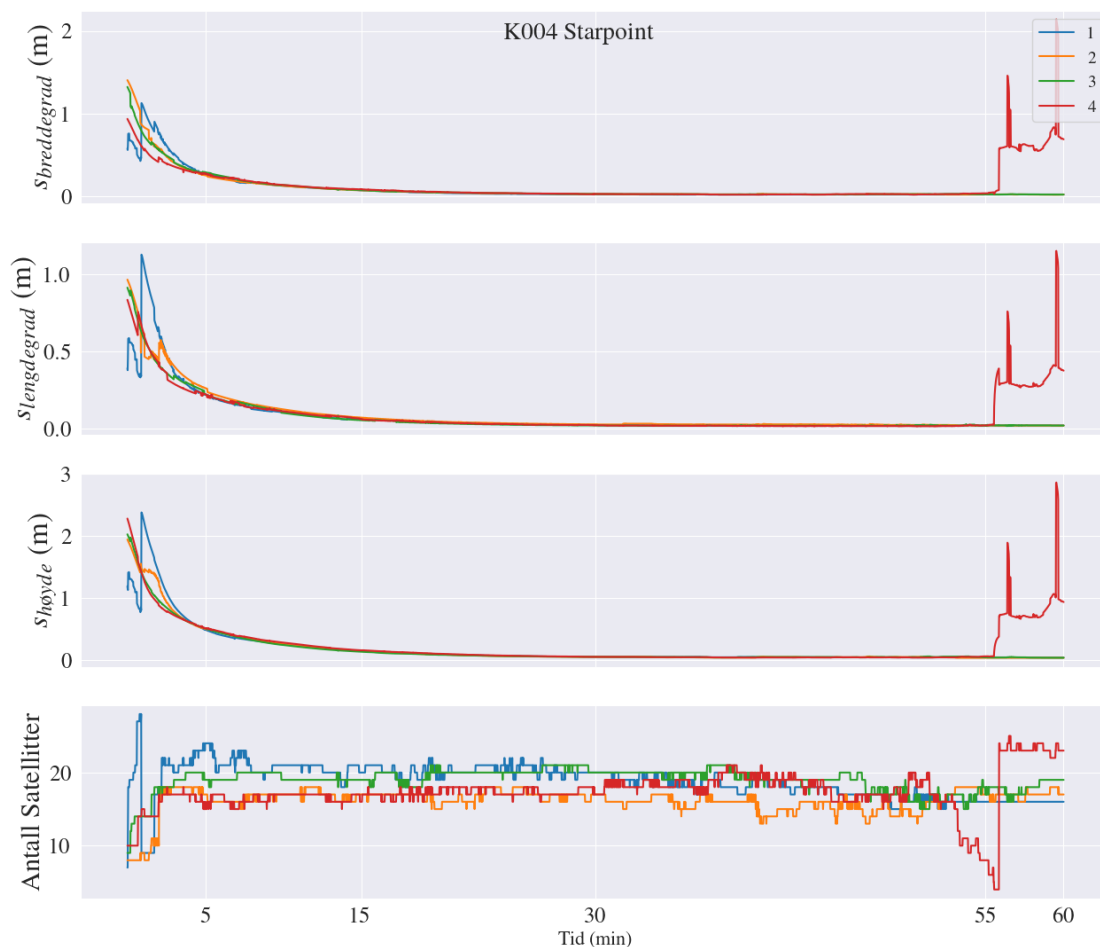
Måling	Tid (min)	$s_{bre}(cm)$	$s_{len}(cm)$	$s_{grunn}(cm)$	$s_{høy}(cm)$
1	5	81	76	111	109
	15	42	43	59	55
	30	16	14	21	25
	55	7	7	10	12
	60	7	6	9	10
2	5	70	59	91	64
	15	30	24	38	31
	30	12	10	16	12
	55	5	5	7	6
	60	5	4	6	6
3	5	53	38	65	120
	15	1226	642	1384	1555
	30	13	22	25	29
	55	4	5	6	8
	60	4	5	6	7
4	5	38	46	59	56
	15	16	15	22	22
	30	7	7	10	11
	55	5	5	7	8
	60	4	5	7	7

**Tabell 4.3:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten G4+ og punktet P102. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens.

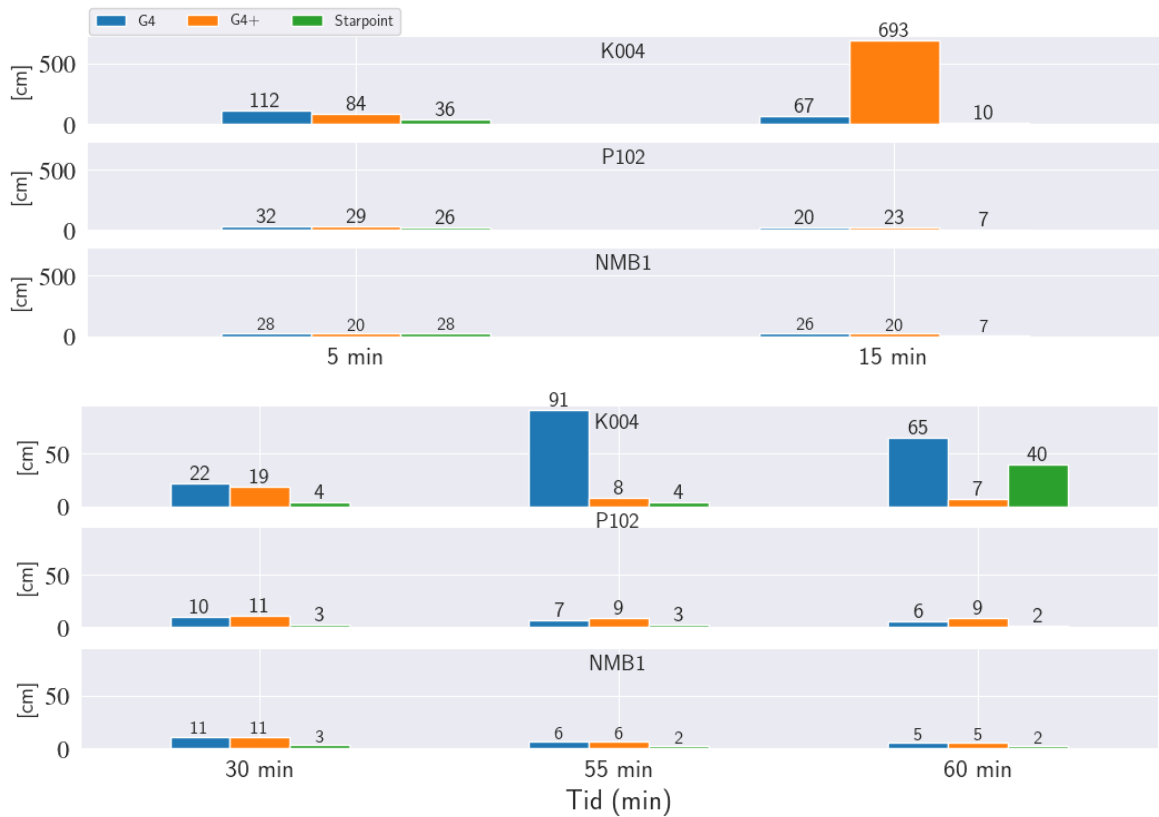


Måling	Tid (min)	$s_{bre}(cm)$	$s_{len}(cm)$	$s_{grunn}(cm)$	$s_{høy}(cm)$
1	5	25	21	33	64
	15	15	14	20	17
	30	7	6	9	8
	55	4	4	6	5
	60	4	4	5	5
2	5	28	19	33	52
	15	11	23	25	23
	30	5	9	11	10
	55	14	8	16	28
	60	14	8	16	29
3	5	14	8	16	29
	15	11	8	14	21
	30	6	8	10	8
	55	4	4	5	5
	60	4	4	5	5
4	5	23	17	29	38
	15	23	21	31	20
	30	9	10	13	8
	55	4	5	6	5
	60	4	5	6	5

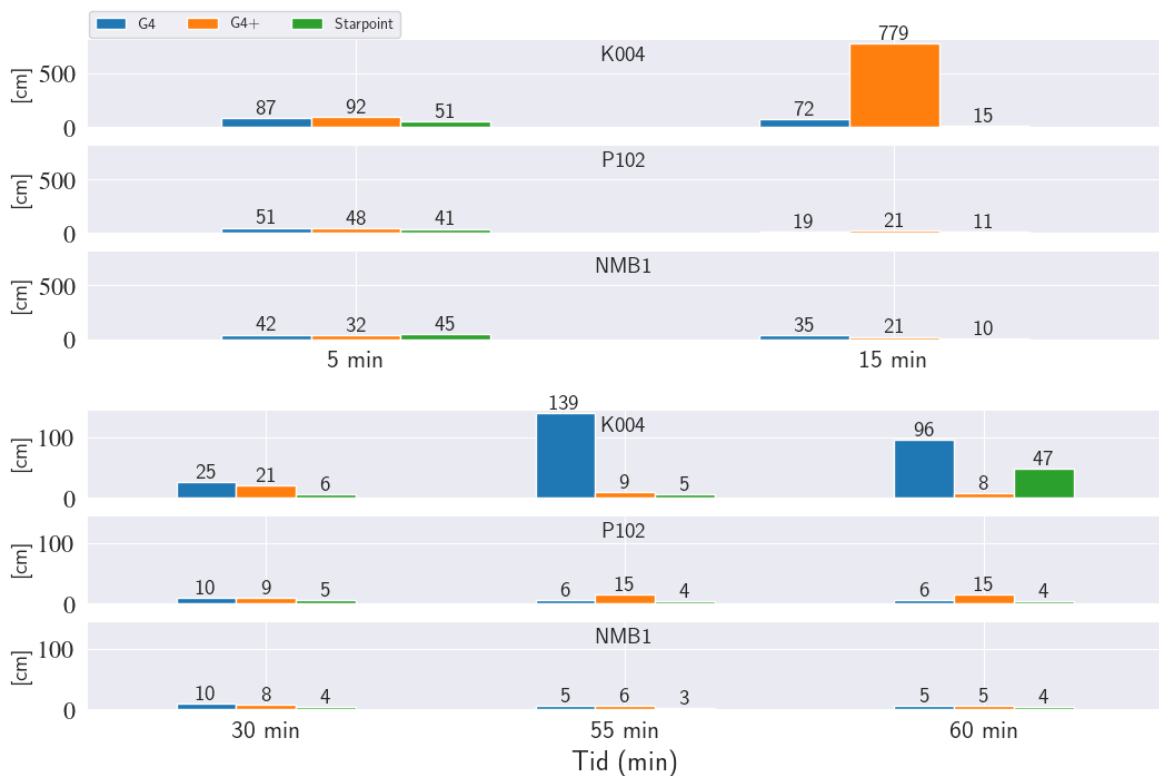
**Tabell 4.4:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott og tabell med ulike konvergenstider for tjenesten Starpoint og punktet K004. Rødt indikerer hvilken måling og dens tidspunkt med avbrutt konvergens.



Måling	Tid (min)	$s_{bre}(cm)$	$s_{len}(cm)$	$s_{grunn}(cm)$	$s_{høy}(cm)$
1	5	27	22	35	49
	15	8	7	10	15
	30	3	3	4	6
	55	3	2	3	5
	60	3	2	3	5
2	5	26	27	37	51
	15	8	7	11	15
	30	3	3	4	6
	55	3	2	3	4
	60	3	2	3	4
3	5	30	22	37	52
	15	8	6	10	14
	30	3	2	4	6
	55	3	2	3	5
	60	2	2	3	4
4	5	28	23	36	52
	15	9	6	11	16
	30	3	2	4	6
	55	4	2	5	7
	60	69	38	79	94



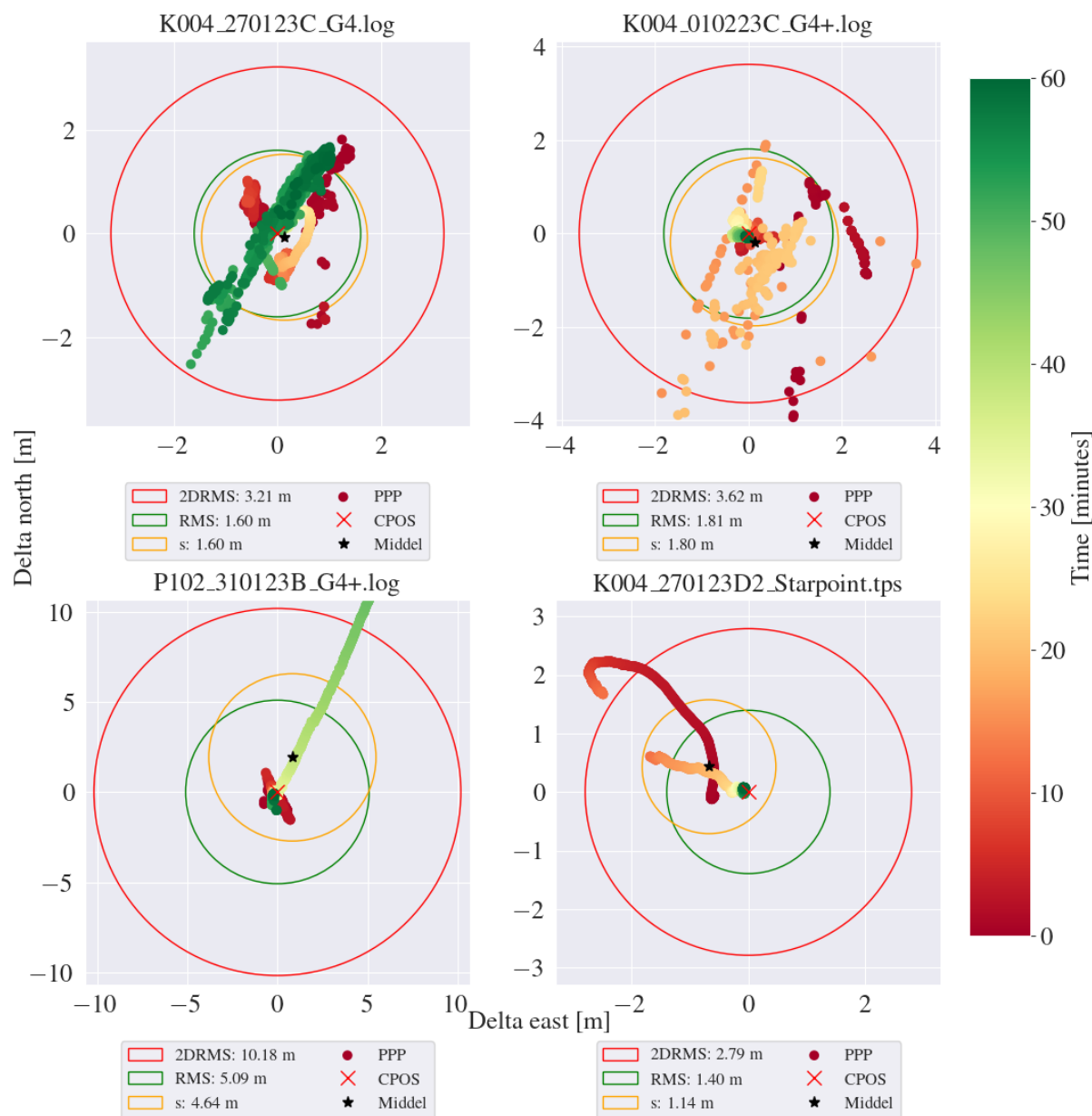
**Figur 4.1:** Et søylediagram som viser standardavvik i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter.



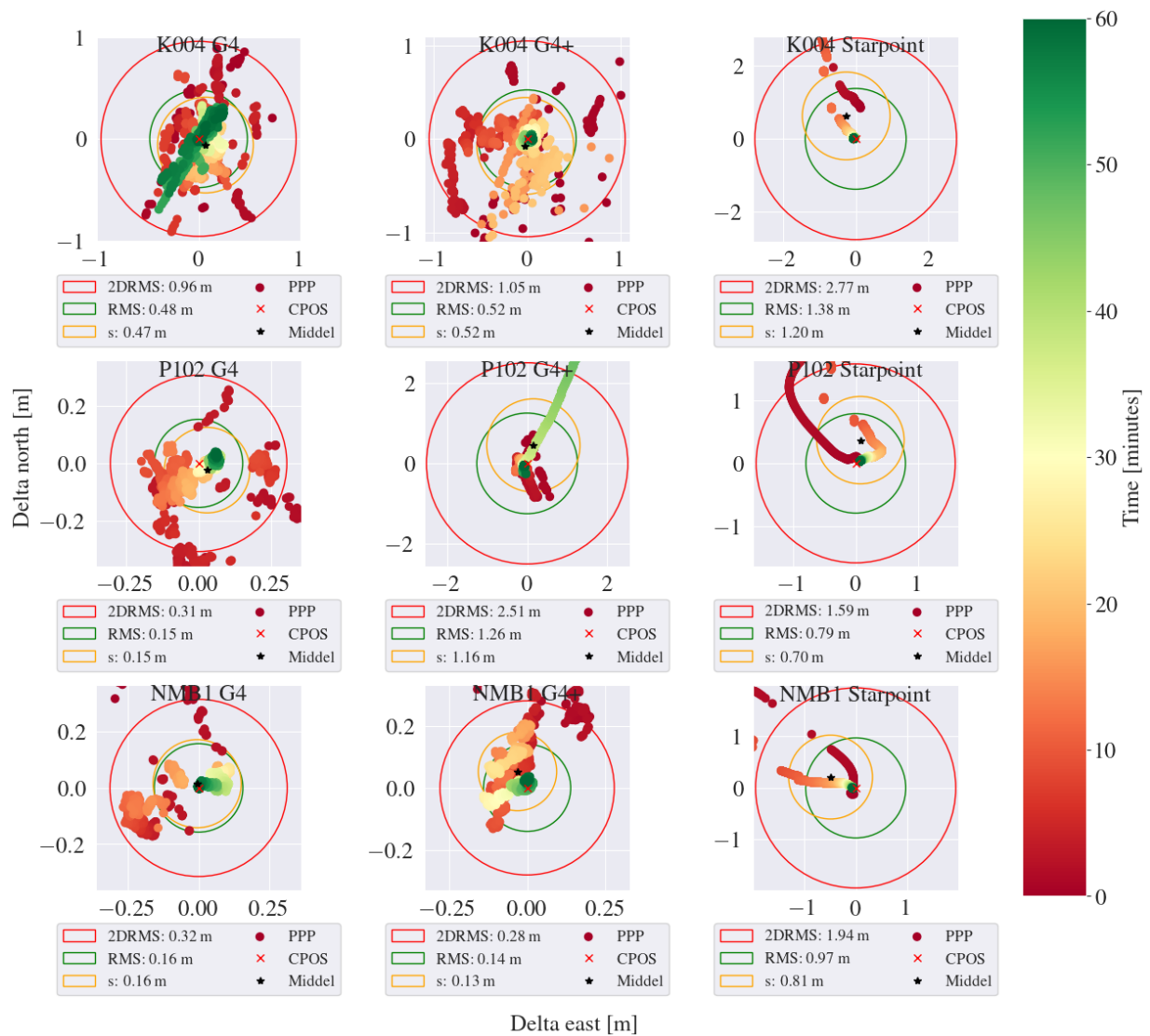
**Figur 4.2:** Et søylediagram som viser standardavvik i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter.

## 4.1.2 Presisjon og nøyaktighet

Presisjon og nøyaktighet er plottet for alle 1-sekund estimatene mot den sanne verdien fra CPOS-målingene. Det er beregnet RMS-verdier og standardavvik i grunnriss for hele måleserien. I tabell 4.3 er det plottet for målingene med avbrutt konvergens. Tabell 4.4 viser plott med midlede 1 sekund estimater for alle målingene til punktene og tjenestene.



**Figur 4.3:** 1 sekund estimater (prikkene) for målingene med avbrutt konvergens. Plottene viser differanser i øst og nord og beregnede RMS-verdier og standardavvik i grunnriss. Rødt kryss (x) i origo er sann verdi fra CPOS-målinger og svart stjerne (\*) er midlede av estimatene. Fargeskalaen til høyre viser tiden det har gått for 1 sekund estimatene, oppgitt i minutter.

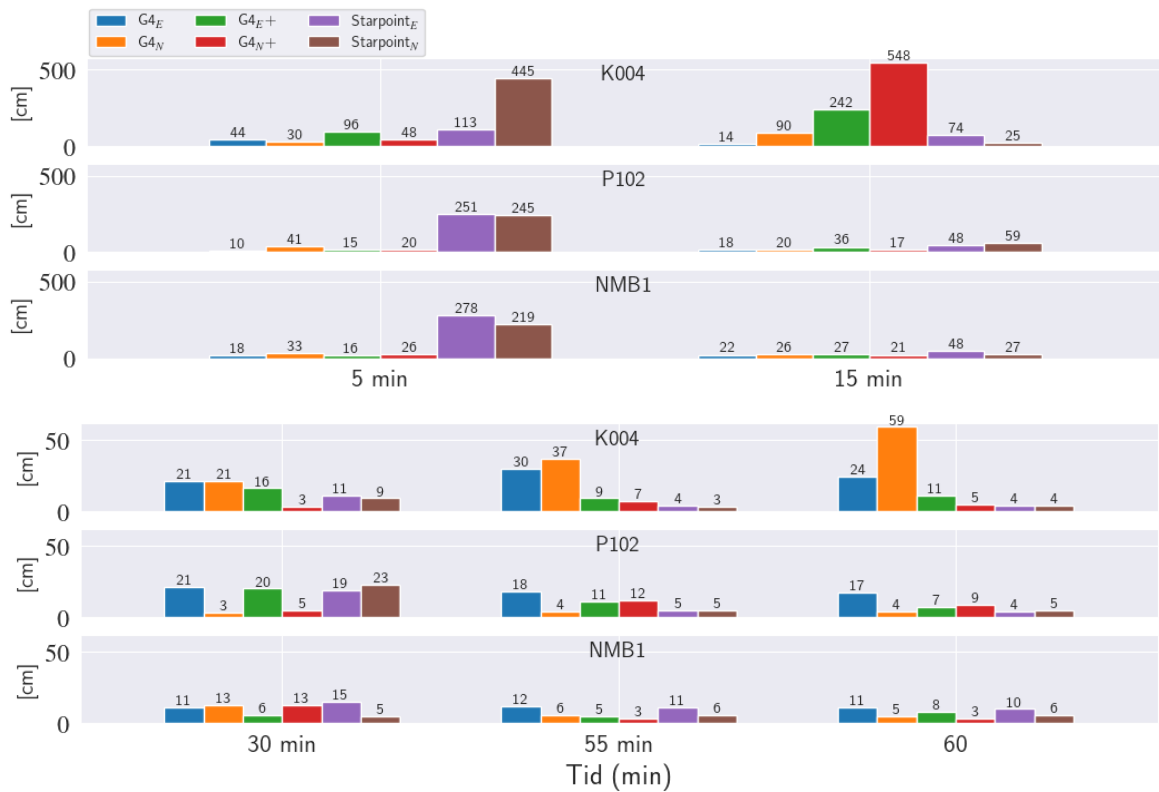


**Figur 4.4:** Midlede 1 sekund estimerer for alle målingene til punktene og tjenestene. Plottene viser differanser i øst og nord og beregnede RMS-verdier og standardavvik i grunnriss. Rødt kryss (x) i origo er sann verdi fra CPOS-målinger og svart stjerne (\*) er middel av estimatene. Fargeskalaen til høyre viser tiden det har gått for 1 sekund estimatene, oppgitt i minutter.

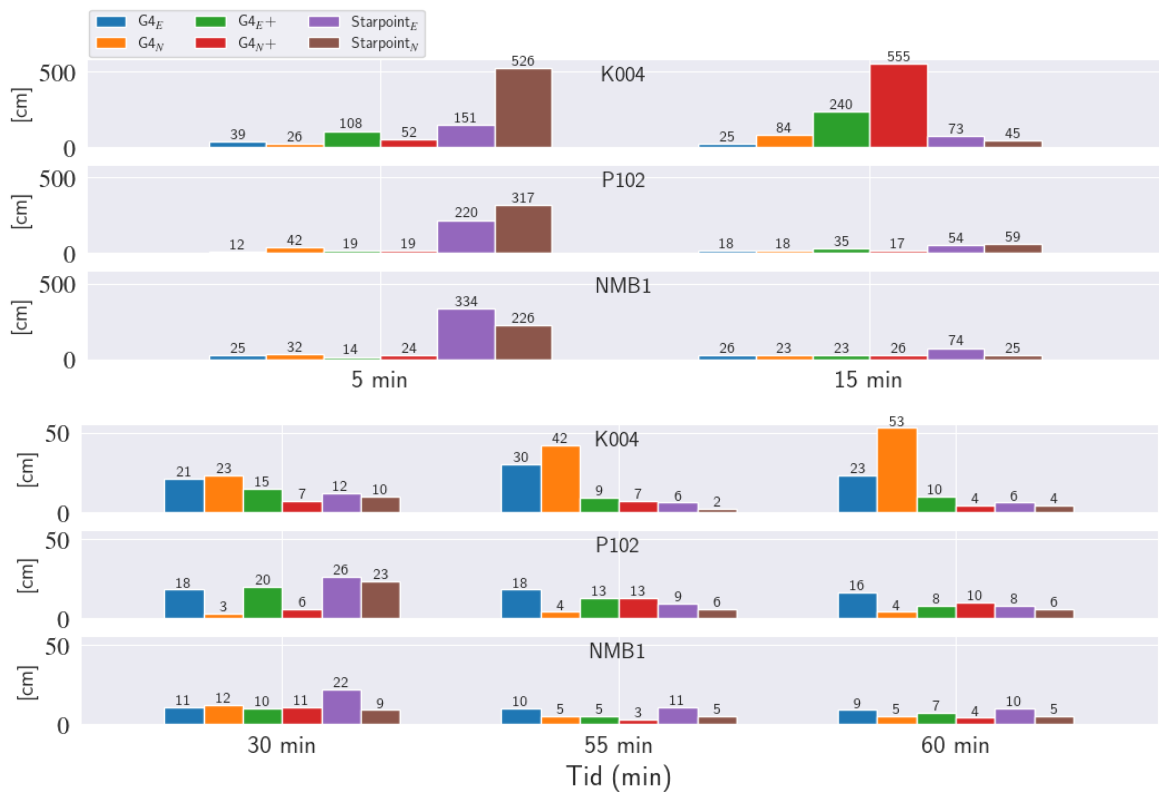
### 4.1.3 RMS & Standardavvik

Beregnete RMS og standardavvik mellom de uavhengige målingene for tjenestene G4, G4+ og Starpoint Pro. RMS og standardavvikene for øst- og nordkomponenten samt grunnriss, høyde og deres største avvik er presentert i et stående søylediagram og en tabell for de ulike konvergenstidene.





**Figur 4.5:** Et søylediagram som viser standardavvik for øst- og nordkomponenten ( $G4_E$ ,  $G4_N$ ,  $G4_{E+}$ ,  $G4_{N+}$ ,  $Starpoint_E$ ,  $Starpoint_N$ ) til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter.



**Figur 4.6:** Et søylediagram som viser RMS for øst- og nordkomponenten ( $G4_E$ ,  $G4_N$ ,  $G4_{E+}$ ,  $G4_{N+}$ ,  $Starpoint_E$ ,  $Starpoint_N$ ) til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, i centimeter.

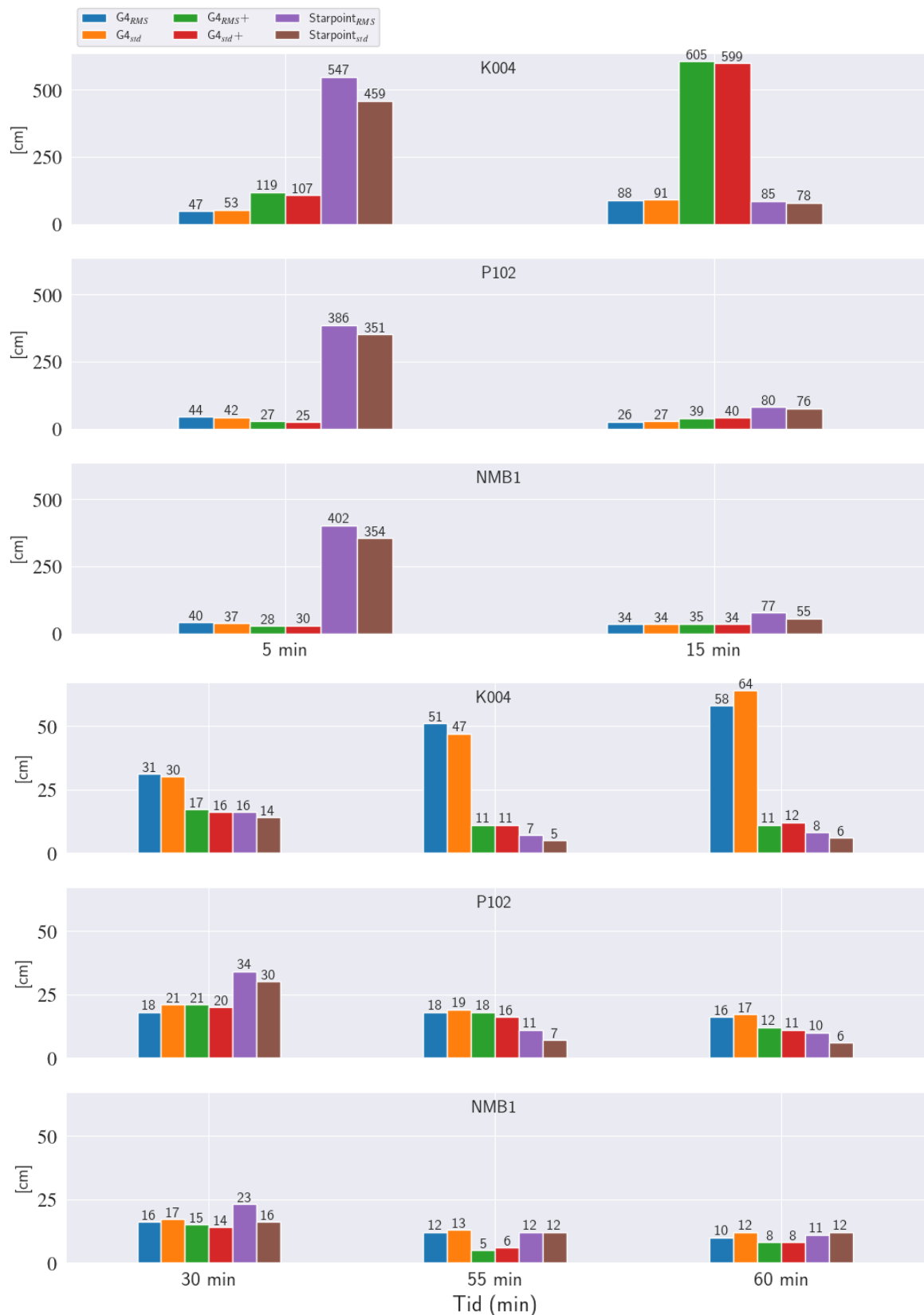
**Tabell 4.5:** Tabell over RMS ( $RMS_E$ ,  $RMS_N$ ) verdier, standardavvik ( $sE$ ,  $sN$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten til øst- og nordkomponenten for både alle tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens.

Min	K004												
	G4						G4+						
	$RMS_E$	$Bias$	$sE$	$RMS_N$	$Bias$	$sN$	$RMS_E$	$Bias$	$sE$	$RMS_N$	$Bias$	$sN$	
5	39	9	44	26	3	30	108	69	96	52	31	48	
15	25	22	14	84	32	90	240	118	242	555	287	548	
30	21	9	21	23	15	21	15	7	16	7	7	3	
55	30	16	30	42	27	37	9	5	9	7	4	7	
60	23	8	24	53	14	59	10	3	11	4	1	5	
Min	P102												
	5	12	9	10	42	23	41	19	14	15	19	10	20
	15	18	9	18	18	7	20	35	17	36	17	8	17
	30	18	3	21	3	2	3	20	11	20	6	4	5
	55	18	8	18	4	1	4	13	9	11	13	9	12
	60	16	7	17	4	3	4	8	5	7	10	7	9
Min	NMB1												
	5	25	20	18	32	14	33	14	1	16	24	9	26
	15	26	17	22	23	5	26	23	2	27	26	19	21
	30	11	5	11	12	5	13	10	9	6	11	3	13
	55	10	2	12	5	2	6	5	1	5	3	2	3
	60	9	1	11	5	1	5	7	1	8	4	3	3

Min	Starpoint												
	K004						P102						
	$RMS_E$	$Bias$	$sE$	$RMS_N$	$Bias$	$sN$	$RMS_E$	$Bias$	$sE$	$RMS_N$	$Bias$	$sN$	
5	151	116	113	526	358	445	220	32	251	317	236	245	
15	73	35	74	45	39	25	54	35	48	59	29	59	
30	12	8	11	10	6	9	26	20	19	23	11	23	
55	6	5	4	2	1	3	9	8	5	6	5	5	
60	6	6	4	4	2	4	8	8	4	6	4	5	
Min	NMB1												
	5	334	231	278	226	123	219						
	15	74	61	48	25	9	27						
	30	22	17	15	9	8	5						
	55	11	7	11	5	1	6						
	60	10	6	10	5	1	6						

**Tabell 4.6:** Største avvikene fra RMS verdiene ( $E_{max}$ ,  $N_{max}$ ) og standardavvikene ( $sE_{max}$ ,  $sN_{max}$ ) til øst- og nordkomponenten for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens.

Min	K004												
	G4				G4+				Starpoint				
	$E_{max}$	$sE_{max}$	$N_{max}$	$sN_{max}$	$E_{max}$	$sE_{max}$	$N_{max}$	$sN_{max}$	$E_{max}$	$sE_{max}$	$N_{max}$	$sN_{max}$	
5	61	56	45	42	178	110	100	70	235	119	992	635	
15	37	15	140	109	480	362	1104	817	142	107	61	33	
30	33	27	34	21	19	23	9	5	20	12	13	13	
55	59	44	80	53	13	10	9	10	10	5	3	3	
60	40	33	100	86	15	12	6	6	10	5	8	6	
Min	P102												
	5	22	13	62	54	28	21	26	28	335	304	583	347
	15	27	19	34	28	59	45	30	22	105	70	115	86
	30	29	27	4	3	39	29	11	8	45	26	44	34
	55	34	27	5	5	22	14	22	14	11	5	11	7
	60	31	25	6	5	15	10	16	10	11	5	10	6
Min	NMB1												
	5	42	22	60	46	23	23	33	37	623	393	422	300
	15	44	27	42	37	36	35	48	30	113	64	35	28
	30	20	16	23	19	14	8	16	13	31	19	12	7
	55	17	16	8	7	7	7	6	4	16	12	9	9
	60	15	14	6	6	9	9	6	4	15	12	9	8



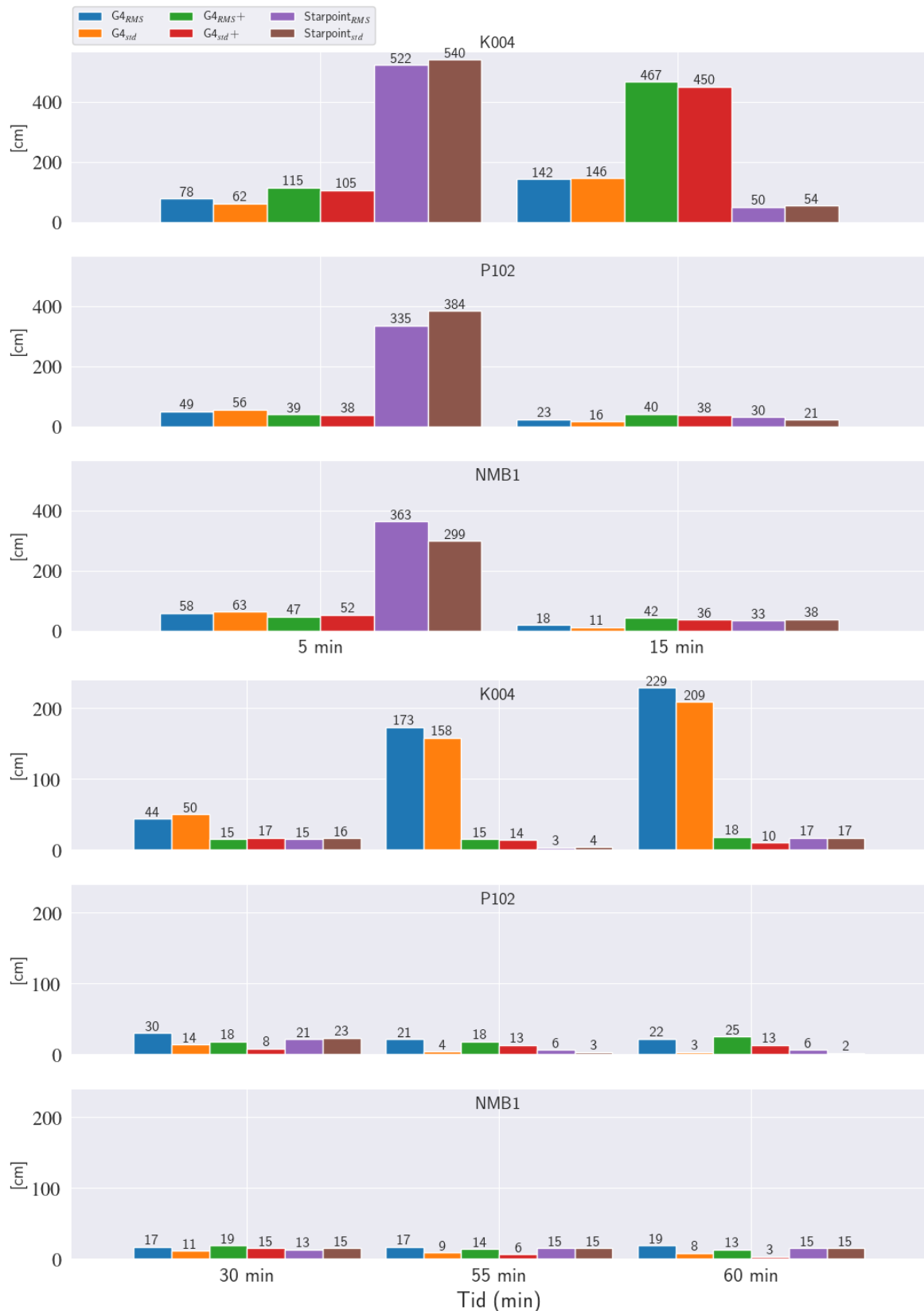
**Figur 4.7:** Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ ,  $G4_{RMS+}$ ,  $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ ,  $G4_{std+}$ ,  $Starpoint_{std}$ ) i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter.

**Tabell 4.7:** Tabell over RMS ( $RMS_{gr}$ ) og standardavvik ( $s_{gr}$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten i grunnriss for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt: Avbrutt konvergens.

K004									
	G4			G4+			Starpoint		
Min	$RMS_{gr}$	$Bias$	$s_{gr}$	$RMS_{gr}$	$Bias$	$s_{gr}$	$RMS_{gr}$	$Bias$	$s_{gr}$
5	47	4	53	119	25	107	547	346	459
15	88	30	91	605	275	599	85	36	78
30	31	15	30	17	7	16	16	6	14
55	51	28	47	11	5	11	7	1	5
60	58	15	64	11	1	12	8	2	6
P102									
5	44	24	42	27	11	25	386	232	351
15	26	8	27	39	7	40	80	32	76
30	18	1	21	21	5	20	34	12	30
55	18	2	19	18	10	16	11	5	7
60	16	4	17	12	7	11	10	5	6
NMB1									
5	40	16	37	28	9	30	402	102	354
15	34	7	34	35	19	34	77	4	55
30	16	5	17	15	3	14	23	6	16
55	12	2	13	5	2	6	12	1	12
60	10	1	12	8	3	8	11	2	12

**Tabell 4.8:** Største avvikene fra RMS verdiene ( $Gr_{max}$ ) og standardavvikene ( $sGr_{max}$ ) i grunnriss for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt: tidspunktet med avbrutt konvergens.

K004						
	G4		G4+		Starpoint	
Min	$Gr_{max}$	$sGr_{max}$	$Gr_{max}$	$sGr_{max}$	$Gr_{max}$	$sGr_{max}$
5	65	69	178	118	1009	639
15	145	110	1204	894	152	109
30	47	34	21	24	22	17
55	99	69	14	11	10	6
60	107	92	15	12	10	7
P102						
5	62	55	33	29	598	384
15	40	30	60	50	117	87
30	29	27	40	30	49	34
55	35	27	31	19	16	8
60	32	25	22	14	14	7
NMB1						
5	73	51	40	37	753	494
15	48	38	60	45	118	67
30	31	25	21	14	34	19
55	19	17	9	8	18	13
60	16	15	11	10	17	13



**Figur 4.8:** Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ ,  $G4_{RMS+}$ ,  $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ ,  $G4_{std+}$ ,  $Starpoint_{std}$ ) i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter.

**Tabell 4.9:** Tabell over RMS ( $RMS_h$ ) og standardavvik ( $s_h$ ) og feilene ( $Bias$ ) ut i fra snittet og fasiten i høyde for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens.

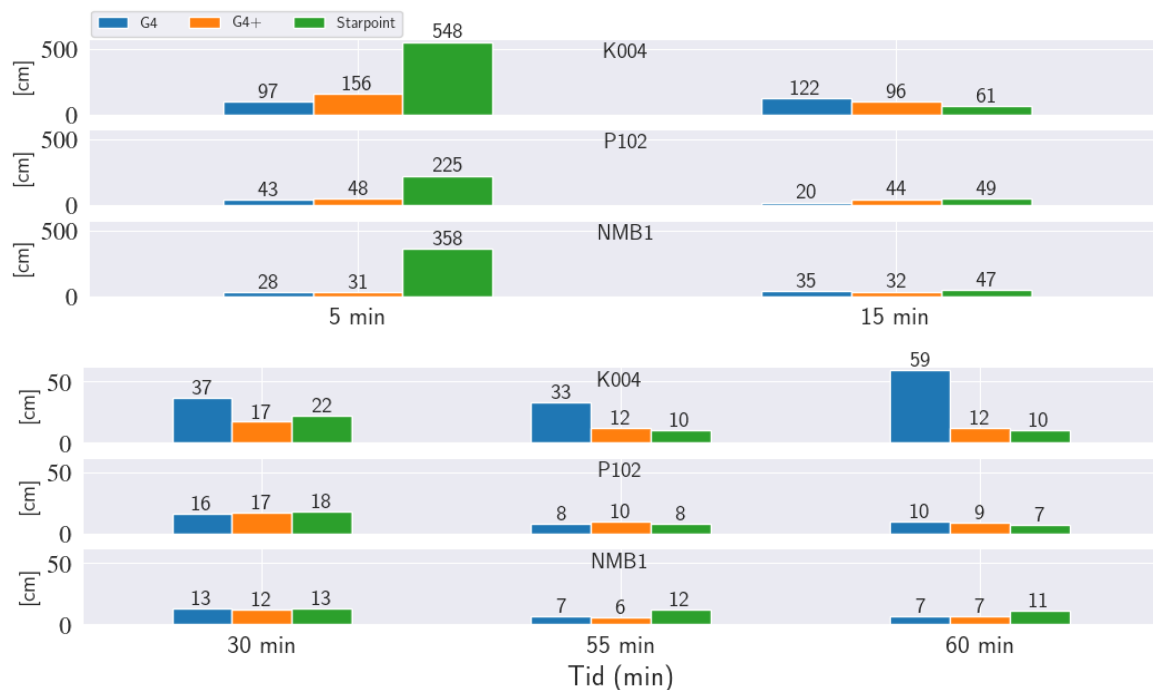
Min	K004								
	G4			G4+			Starpoint		
	$RMS_h$	$Bias$	$s_h$	$RMS_h$	$Bias$	$s_h$	$RMS_h$	$Bias$	$s_h$
5	78	56	62	115	71	105	522	232	540
15	142	65	146	467	258	450	50	16	54
30	44	8	50	15	1	17	15	4	16
55	173	106	158	15	10	14	3	2	4
60	229	141	209	18	15	10	17	8	17
	P102								
5	49	7	56	39	21	38	335	45	384
15	23	18	16	40	24	38	30	24	21
30	30	28	14	18	17	8	21	9	23
55	21	21	4	18	14	13	6	6	3
60	22	22	3	25	23	13	6	6	2
	NMB1								
5	58	21	63	47	13	52	363	255	299
15	18	15	11	42	29	36	33	6	38
30	17	14	11	19	14	15	13	3	15
55	17	16	9	14	14	6	15	8	15
60	19	18	8	13	13	3	15	9	15

**Tabell 4.10:** Største avvikene fra RMS verdiene ( $h_{max}$ ) og standardavvikene ( $sh_{max}$ ) i høyde for både de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter. Rødt indikerer tidspunktet med avbrutt konvergens.

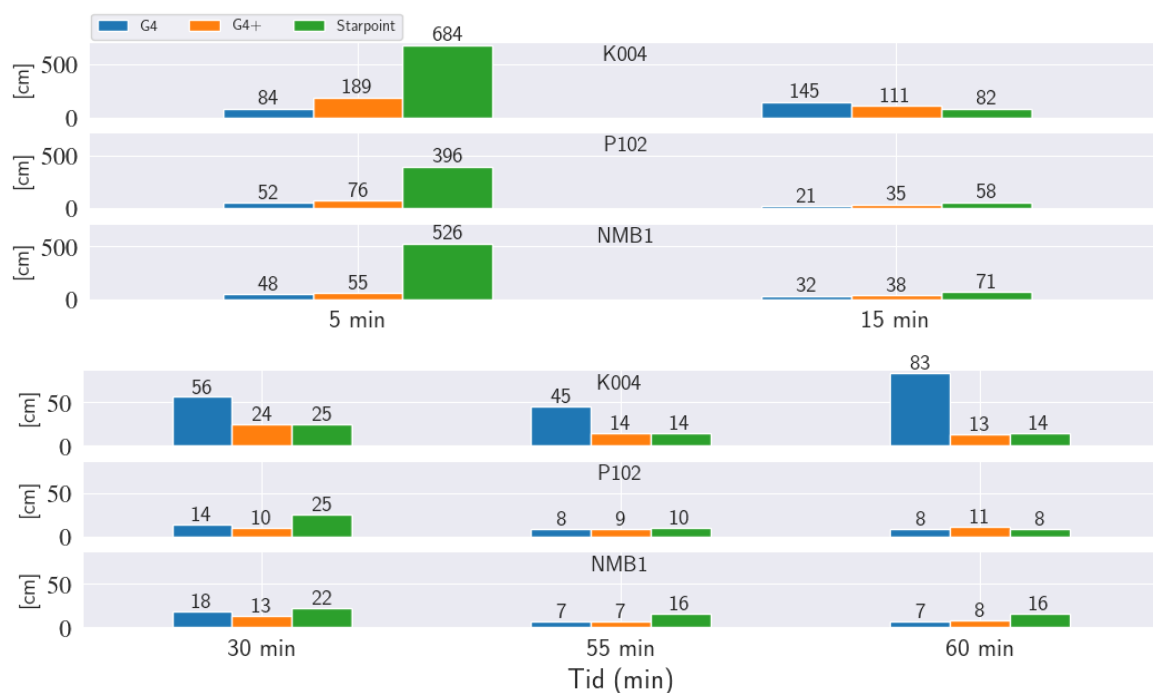
Min	K004					
	G4		G4+		Starpoint	
	$h_{max}$	$sh_{max}$	$h_{max}$	$sh_{max}$	$h_{max}$	$sh_{max}$
5	122	67	186	136	1016	784
15	243	179	919	661	86	71
30	66	59	23	22	18	18
55	342	236	25	16	5	4
60	450	310	25	10	32	25
	P102					
5	84	78	61	47	517	472
15	32	23	71	48	51	27
30	43	16	27	10	29	29
55	27	6	24	19	9	4
60	25	3	37	14	8	3
	NMB1					
5	95	75	62	49	558	313
15	30	16	81	52	56	51
30	25	14	31	18	16	18
55	25	10	22	9	30	22
60	27	10	17	4	29	21

#### 4.1.4 Ytre Pålitelighet

Resultatene fra de ytre pålitelighetstestene fra GISLINE utført på de forskjellige punktene og tjenestene for både grunnriss og høyde.



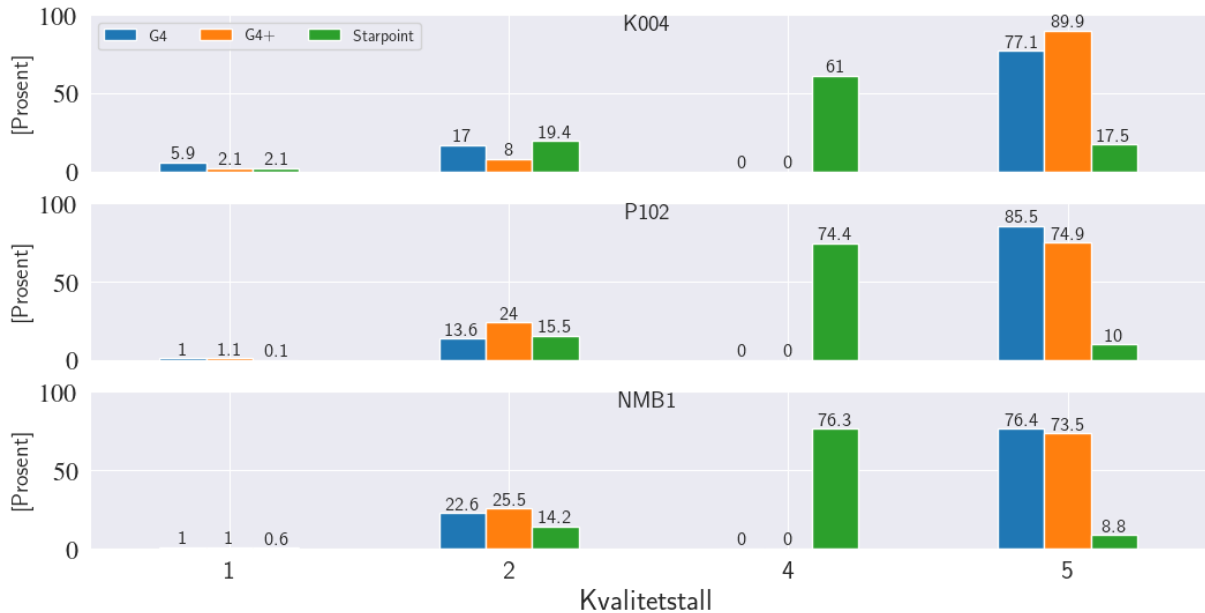
**Figur 4.9:** Ytre pålitelighet i grunnriss til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter.



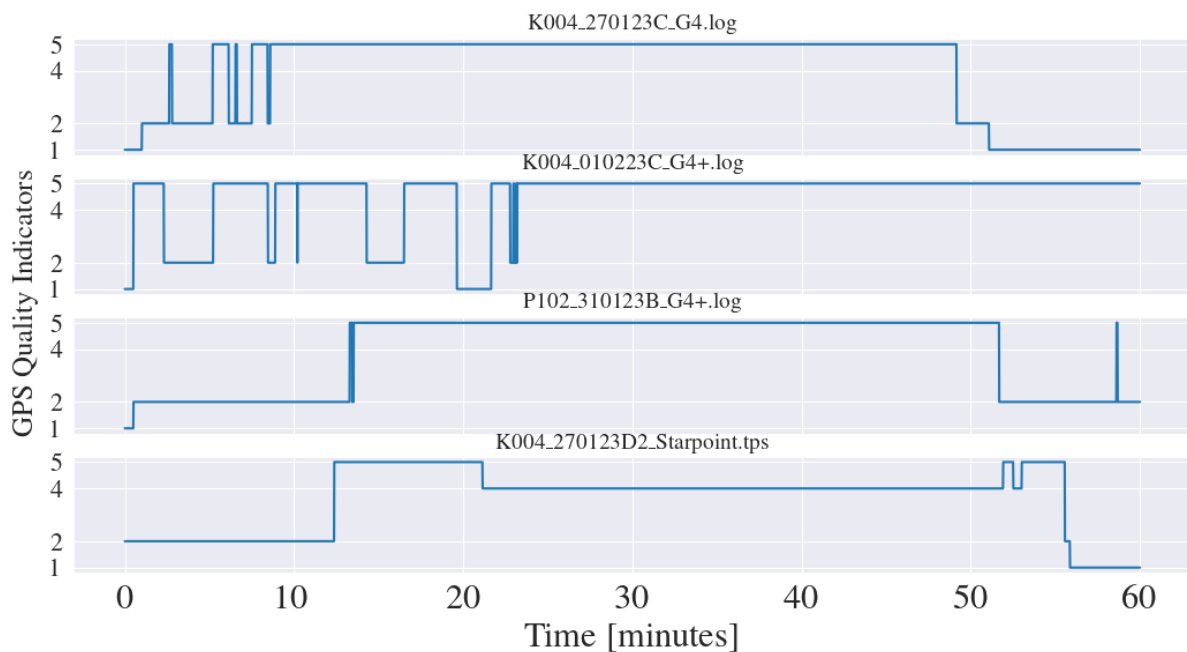
**Figur 4.10:** Ytre pålitelighet i høyde til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (K004, P102, NMB1), oppgitt i centimeter.

## 4.1.5 GNSS kvalitetstall

Resultater som tar for seg fordelingen av de ulike GNSS kvalitetstallene i løpet av alle de uavhengige målingene til hvert punkt fordelt ut på de ulike tjenestene. Se nærmere på tabell 2.22 for en beskrivelse av GNSS kvalitetstallene. Legg merke til at G4 og G4+ aldri vil oppnå kvalitetstallet 4 på grunn av sin float-løsning.



**Figur 4.11:** Prosentvis fordeling av de ulike GNSS kvalitetstallene (1, 2, 4, 5) for de ulike tjenestene og punktene.



**Figur 4.12:** Fordelingen av GNSS kvalitetstallene (1, 2, 4, 5) for de målingene som gjorde det dårligst med hensyn til de formelle nøyaktighetstallene, se delkapittel 4.1.1.



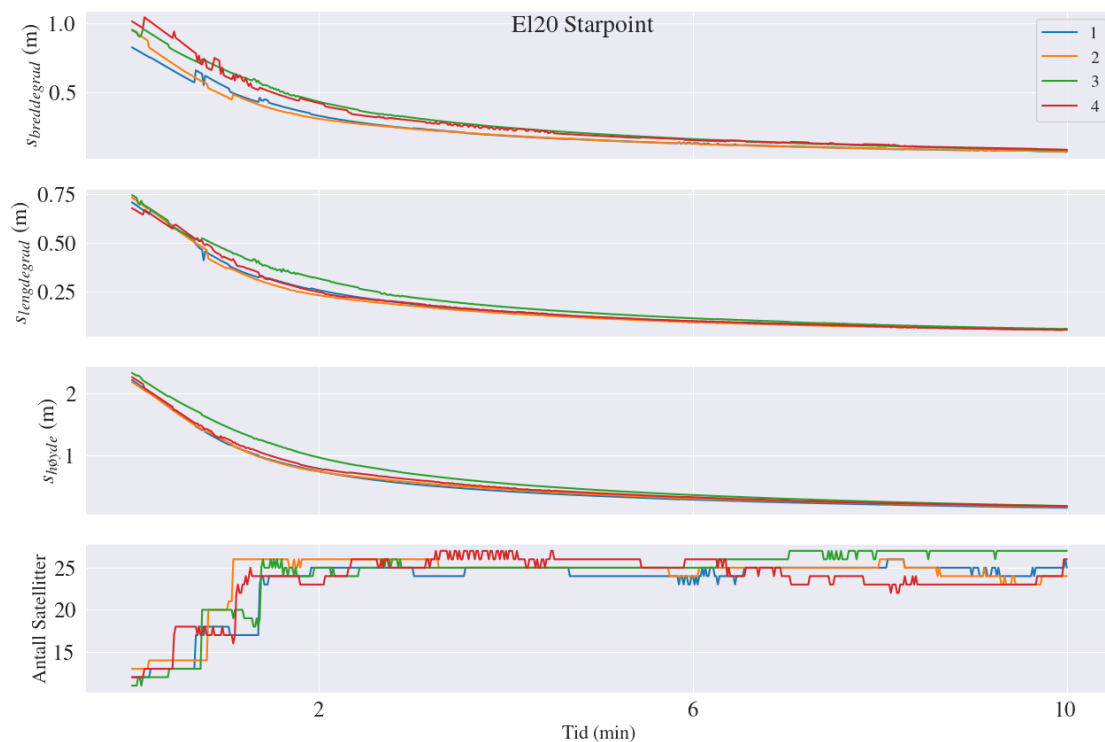
## 4.2 Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås

Målte NMEA-meldinger fra tjenestene G4, G4+ og Starpoint for punktene El20, El21 og El22 blir sammenlignet med hverandre for formelle nøyaktighetstall. I tillegg er det vist beregnede RMS-verdier og standardavvik mellom målingene, ytre pålitelighetstall, samt plott for parameterne signalkvalitet og alder på siste mottatte melding fra Eshail 1.

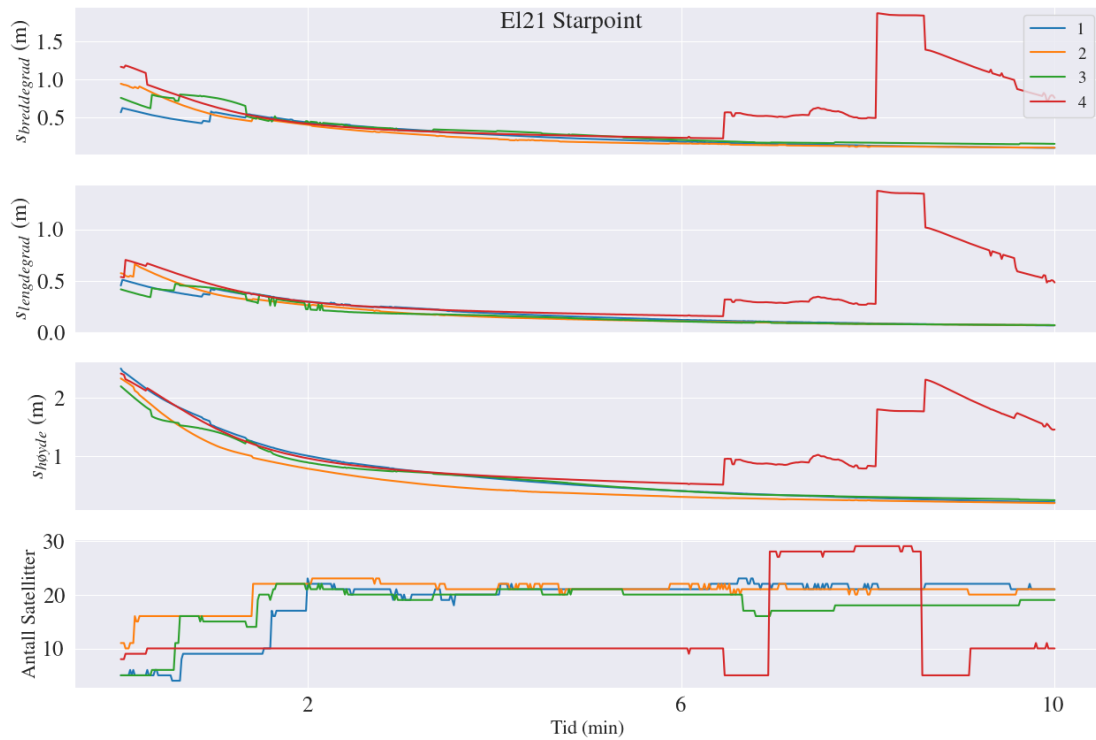
Alle verdiene nedenfor er rundet opp til nærmeste heltall i centimeter, for å vise hvilke kvalitetstall tjenestene klarer å komme under.

### 4.2.1 Formelle nøyaktighetstall

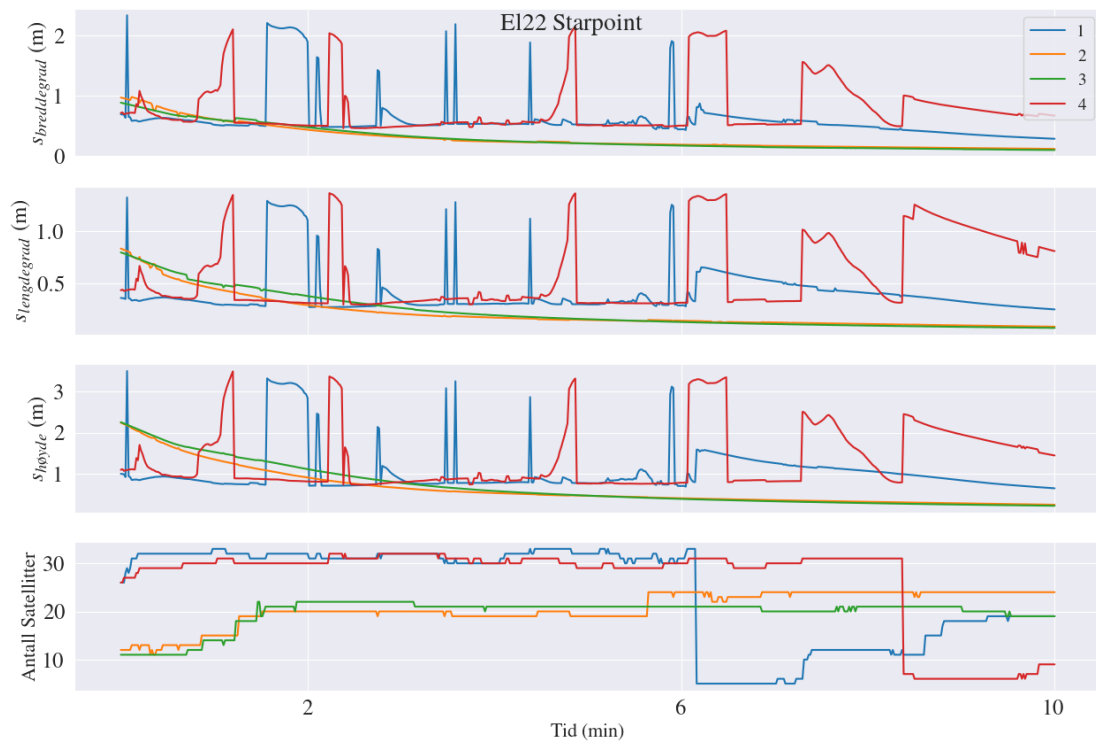
Formelle nøyaktighetstall fra GNSS-beregningene blir presentert for alle punktene målt med tjenesten Starpoint Pro. Standardavvik i breddegrad, lengdegrad, høyde og grunnriss blir presentert som plott og stående søylediagram med konvergenstidene 2, 6, og 10 minutter.



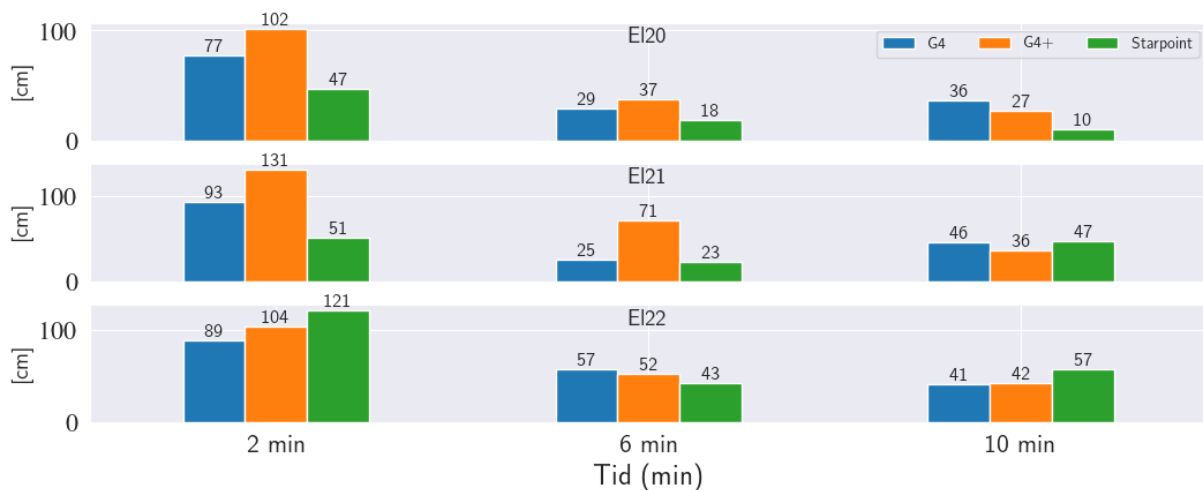
**Figur 4.13:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El20.



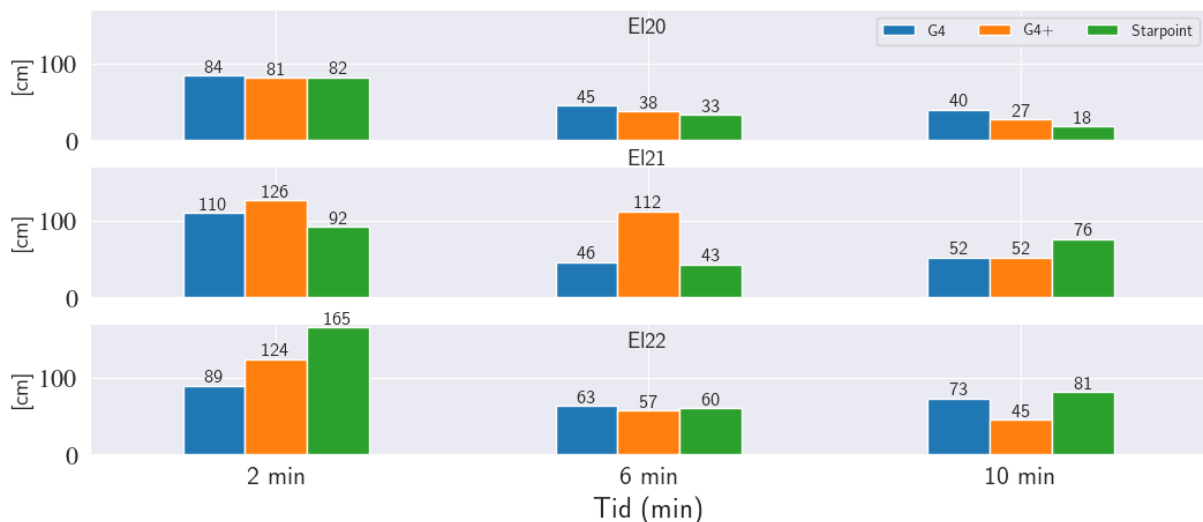
**Figur 4.14:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El21.



**Figur 4.15:** Standardavviket for breddegrad, lengdegrad og høyde samt antall satellitter av 4 uavhengige målinger (1, 2, 3, 4) oppgitt i plott for tjenesten Starpoint og punktet El22.



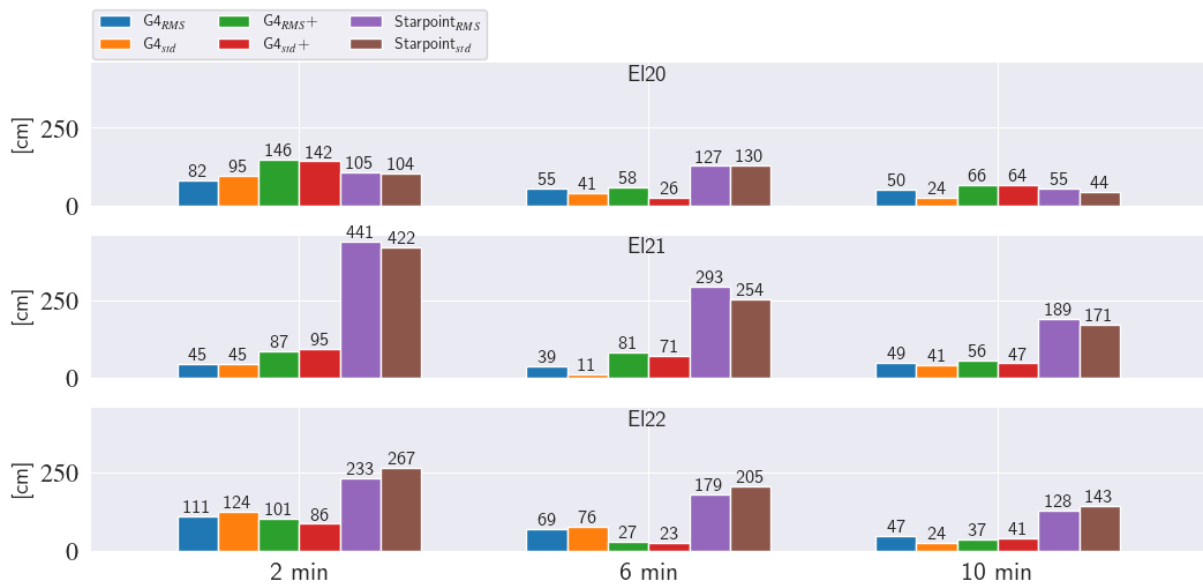
**Figur 4.16:** Et søylediagram som viser standardavvik i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (E120, E121, E122), oppgitt i centimeter.



**Figur 4.17:** Et søylediagram som viser standardavvik i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (E120, E121, E122), oppgitt i centimeter.

## 4.2.2 RMS & standardavvik

Beregnete RMS og standardavvik mellom de uavhengige målingene for tjenestene G4, G4+ og Starpoint Pro. RMS og standardavvikene for grunnriss og høyde er presentert i et stående søylediagram for de ulike konvergenstidene.



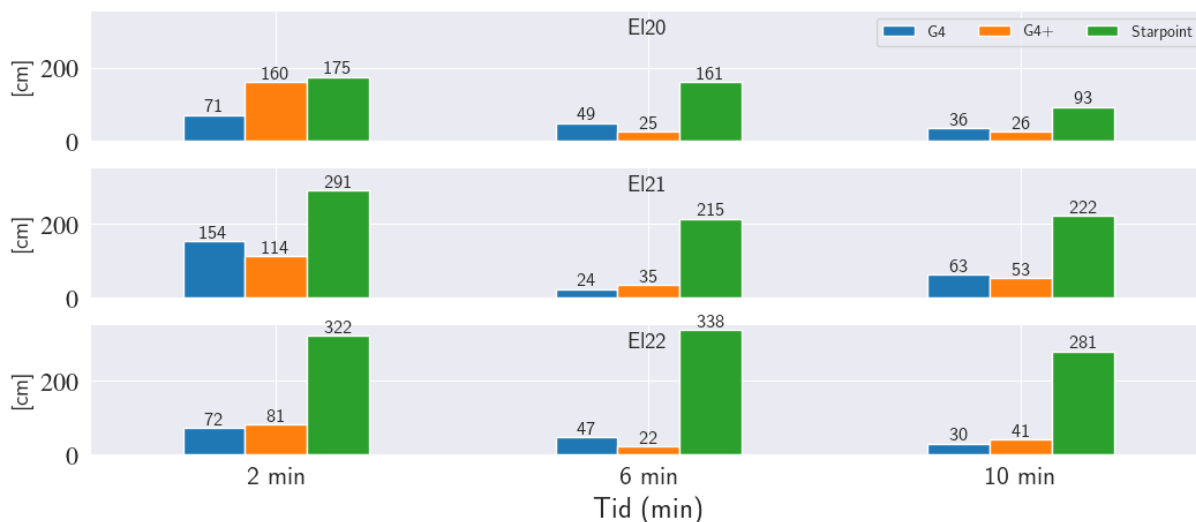
**Figur 4.18:** Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ ,  $G4_{RMS+}$ ,  $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ ,  $G4_{std+}$ ,  $Starpoint_{std}$ ) i grunnriss til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter.



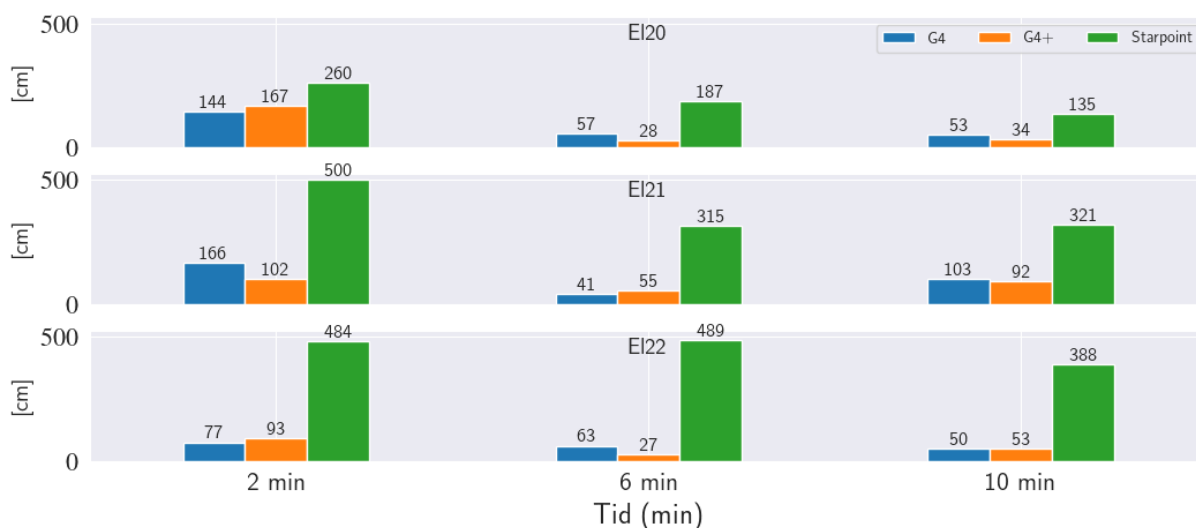
**Figur 4.19:** Et søylediagram som viser RMS ( $G4_{RMS}$ ,  $G4_{RMS+}$ ,  $Starpoint_{RMS}$ ) og standardavvik ( $G4_{std}$ ,  $G4_{std+}$ ,  $Starpoint_{std}$ ) i høyde til ulike konvergenstider både for de ulike tjenestene og punktene, oppgitt i centimeter.

### 4.2.3 Ytre pålitelighet

Resultatene fra de ytre pålitelighetstestene fra GISLINE utført på de forskjellige punktene og tjenestene for både grunnriss og høyde.



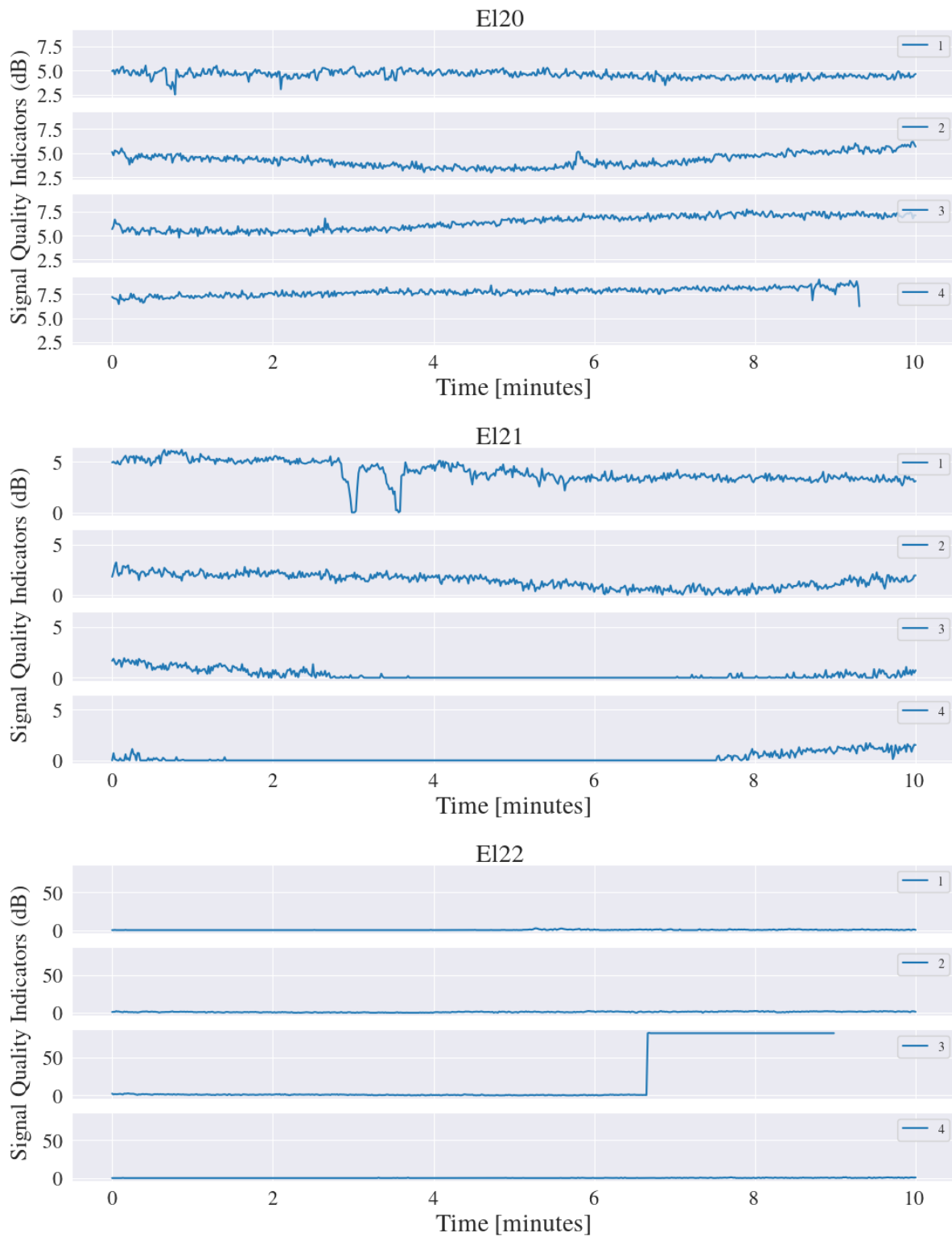
**Figur 4.20:** Ytre pålitelighet i grunnriss til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter.



**Figur 4.21:** Ytre pålitelighet i høyde til ulike konvergenstider både for de forskjellige tjenestene (G4, G4+, Starpoint) og punktene (El20, El21, El22), oppgitt i centimeter.

#### 4.2.4 Signal quality indicator

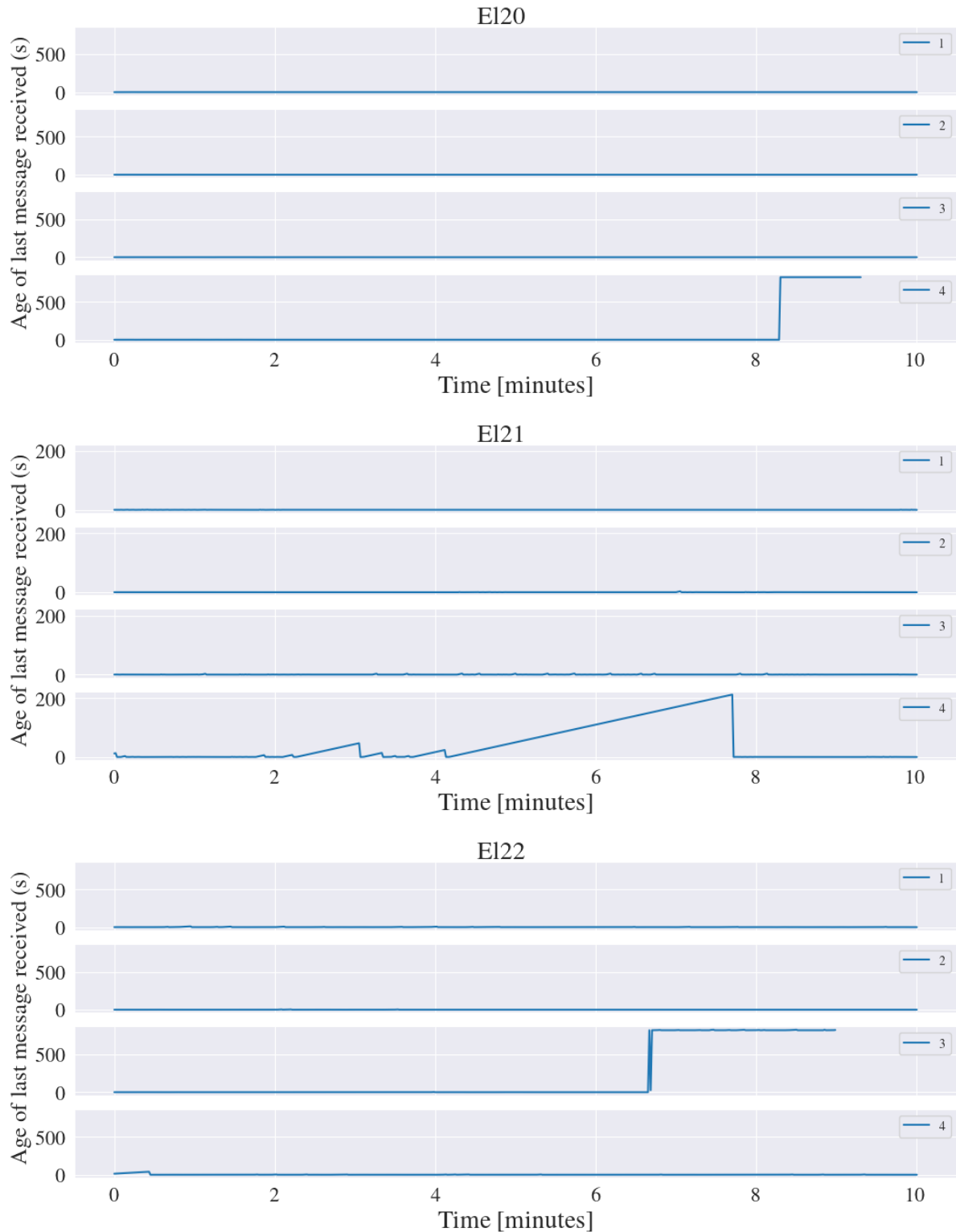
Med LB-meldingen fra Topcon mottakeren er det plottet parameteren for signalkvalitet i desibel (dB) mot tiden for punktene El20, El21 og El22.



**Figur 4.22:** Plott av parameteren for signalkvalitet for alle de uavhengige målingene (1, 2, 3, 4) til punktene mot tiden i minutter, oppgitt i desibel (dB).

## 4.2.5 Age of last message

LB-meldingen inneholder alder på siste mottatte korreksjonsmelding, denne parameteren er oppgitt i sekunder og plottet mot tiden av alle de uavhengige målingene til punktene.



**Figur 4.23:** Alder på siste mottatte korreksjonsmelding oppgitt i sekunder (s) plottet mot tiden i minutter for de uavhengige målingene (1, 2, 3, 4).

# Kapittel 5: Diskusjon

Dette kapitlet tar for seg diskusjon av resultatene. Det har blitt gjennomført to ulike analyser; en RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås og en analyse for hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås.

## 5.1 RT-PPP kvalitet analyse av tre punkt i Ås

### 5.1.1 Formelle nøyaktighetstall

Tabellene 4.1, 4.2 og 4.4 viser at K004 er et krevende punkt å måle for alle tjenestene. Fra de fire uavhengige målingene var det minst en måling som fikk uavbrutt konvergens. For tjenesten G4 var det måling nummer 3 som ga store utslag i presisjon rundt det 50 minuttet, med store standardavvik opptil 7.5, 6 og 15 meter i breddegrad, lengdegrad og høyde. Dette skyldes et drastisk nedfall i målinger til antall satellitter, fra å ha kontakt med over 15 satellitter ned til under 10. GNSS kvalitetstallet fra figur 4.12 skifter fra tallet 5 raskt til 2 og ned igjen til 1, der løsningen startet. For tjenesten G4+ var det også måling nummer 3 som ga store utslag, med store standardavvik opptil 12, 7.5 og 20 meter i breddegrad, lengdegrad og høyde rundt det 15 minuttet, der kvalitetstallet gikk fra 5 til 2. Konvergens gikk relativt fort ned igjen etter å ha bli avbrutt, men gikk litt opp igjen rundt det tjuende minuttet, der kvalitetstallet stupte ned til 1 i par minutter, før det gikk tilbake til 5 igjen. Tjenesten Starpoint Pro ga mindre utslag i presisjon etter 55 minutter, med standardavvik opptil 1.5, 1 og 3 meter i breddegrad, lengdegrad og høyde. Årsaken er at mottakeren gikk fra å ha kontakt med 20 satellitter til under 10 satellitter. Kvalitetstallet fra figur 4.12 gikk fra 5 raskt til 2 og ned til 1.

G4+ er den eneste tjenesten som sliter å måle punkt P102 fra figur 4.3. Det er måling 2 som fikk avbrutt konvergens litt før 55 minutter med standardavvik opptil 0.7, 0.7 og 1.5 meter i breddegrad, lengdegrad og høyde. Kvalitetstallet fra figur 4.12 gikk fra 5 til 2. En stor feilkilde med denne målingen er at litt over 30 minutter ut i måleøkten ga NMEA-meldingen NaN (Not a Number) verdier for standardavvikene i 10-15 minutter. Dataene fra meldingen ga ingen indikasjon at det er noe feil i denne perioden, når kontakt med nok satellitter var tilfredsstillt og GNSS kvalitetstallet holder seg på 5. I den perioden med NaN verdier er melding ID-feltet markert med GN, som tilsvarer at dataene kommer fra både systemene GPS og GLONASS. Når standardavvikene endelig fikk verdiene tilbake, byttet melding ID-feltet til GP, som er kun GPS. Kvalitetstallet forble på 2 ut målingen med kun GPS.



I figur 4.1 og 4.2 er det presentert standardavvik i grunnriss og høyde. Av de alle tjenestene er det Starpoint Pro som har raskest konvergenstid og høyest presisjon for både høyde og grunnriss, når man ser bort fra de målingene med avbrutt konvergens. For tjenestene til Starfix, er det G4+ som har lavere presisjon sammenlignet med alle konvergenstidene og punktene. Etter 15 minutter vil Starpoint Pro ha formelle nøyaktighetstall i grunnriss på under 10, 7 og 7 centimeter for punktene K004, P102 og NMB1, mens høydene vil være på under 15, 11, 10 centimeter. I det 30 minuttet av måleøkten vil standardavvikene ligge under 22 og 25 centimeter for alle tjenestene og punktene i grunnriss og høyde. For det best egnede punktet NMB1, uten målinger med avbrutt konvergens, vil tallene ligge under 5 centimeter i både grunnriss og høyde etter 60 minutter med logging.

### 5.1.2 Presisjon og nøyaktighet

Tatt utgangspunkt i de dårlige målingene med avbrutt konvergens i figur 4.3, er det interessant å se på forplantingen av feilene i forhold til den sanne verdien målt med CPOS. For den tredje målingen av punkt K004 med tjenesten G4, vil estimatene få en stor spredning i det konvergensen blir avbrutt. RMS-verdien og standardavviket vil ligge på 1.6 meter. Det samme gjelder tjenesten G4+ for det samme punktet, der vil også estimatene få stor spredning ved avbrutt konvergens. Her vil RMS-verdien og standardavviket ligge på 1.81 og 1.8 meter. Den tredje målingen med tjenesten G4+ for punktet P102, dukket det opp NaN-verdier til standardavvikene i NMEA-meldingen, for en kort periode i måleøkten. I måleskiven begynner estimatene å bevege seg lenger fra den sanne verdiene etter det 30 minuttet, helt til det ender utenfor 2DRMS på 10.18 meter. I det ID-feltet går fra GN til GP faller estimatene umiddelbart tilbake til origo, nærmere den sanne verdien. Det er vanskelig å beskrive hva som foresaket denne feilen uten å ha data fra den geostasjonære satellitten Alphasat. Slike feil må behandles som en artefakt, som kan skyldes feil ved apparat og metodefeil. For tjenesten Starpoint Pro vil måling 3 til punktet K004 få en avbrutt konvergens etter 55 minutter, men overraskende nok klare å holde estimatene nærme den sanne verdien. Denne målingen vil ha RMS-verdi og standardavvik på 1.4 og 1.14 meter.

En samlet beregning for hele måleøkten av verdier for RMS og standardavvik ble gjort for alle målingene til både punktene og tjenestene i figur 4.4. Ut i fra figuren er det punktet K004 som gjør det dårligst for hele måleøkten og tjenestene samlet. Det er tjenesten G4 som har lavest RMS verdi og standardavvik på 0.48 og 0.47 meter, G4+ har 0.52 meter for begge og Starpoint Pro ligger på 1.38 og 1.2 meter. For punkt P102 er det igjen tjenesten G4 som gjør det best med RMS og standardavvik på 0.15 meter, G4+ kommer dårligst ut med 1.26 og 1.16 meter og Starpoint på 0.79 og 0.70 meter. G4+ gjør det naturligvis dårligst grunnet sin svake måling nummer 2. Tjenestene G4 og G4+ gjør det best samlet i punktet NMB1, med RMS verdi og standardavvik på 0.16 meter for G4 og 0.14 og 0.13 meter for G4+. For Starpoint Pro er disse verdiene på 0.97 og 0.81 meter, og dermed gjør tjenesten Starpoint Pro sine beste målinger i punkt P102.

### 5.1.3 RMS & standardavvik

Beregnete RMS og standardavvik og største avvik til øst- og nordkomponenten ble gjort mellom de uavhengige målingene for alle punktene og tjenestene i figurene 4.5, 4.6 og tabell 4.5. Ut i fra figuren er RMS og standardavviket for tjenestene G4 og G4+ lavere enn Starpoint Pro etter 5 minutter for alle punktene. Etter 15 minutter er det kun punktene P102 og NMB1 som gjør det bedre for begge komponentene for Starfix tjenestene. De store RMS-verdiene standardavvikene i punkt K004 for G4+ skyldes den avbrutte konvergensten. Det er ikke før enn det har gått 30 minutter at alle komponentene får en RMS-verdi og et standardavvik under 26 cm. RMS-en og Standardavviket vil bikke under 18 cm etter 55 minutter, med unntak fra den målingen med avbrutt konvergensten i punktet K004 for tjenesten G4, se figur 4.1. I det 60 minuttet kommer Starpoint best ut med lave standardavvik under 5 cm for punktene K004 og P102 og RMS under 8 cm. For G4+ er RMS og standardavvikene lavere enn 10 cm og 9 cm for tilsvarende punkt.

Fra tabell 4.5 vil feilene ligge under 14 cm med tjenesten G4 for alle punktene etter 60 minutter, der NMB1 kommer best ut med en feil på 1 cm for både øst- og nordkomponenten. Tjenesten G4+ vil ligge under 7 cm for alle punktene og komponentene etter 60 minutter, mens for Starpoint Pro vil den verdien ligge på 8 cm. I de fleste tilfellene vil verdiene for RMS og standardavvik være høyere for nordkomponenten. De første 15 minuttene vil største avvikene til alle komponentene for både alle punktene og tjenestene være store i tabell 4.6, og det er ikke før enn det har gått 30 minutter at alle største avvikene vil ligge under 45 cm. For punkt NMB1 vil det største avviket være 15 cm for alle tjenestene etter 60 minutter. Tjenestene G4 og G4+ gjør det best i punkt NMB1 for alle de største avvikene, mens Starpoint Pro gjør det best i punkt K004.

I figur 4.7 vil verdiene for RMS og standardavvik ligge under 80 cm for punktene P102 og NMB1 etter 15 minutter i grunnrisset. Det er ikke før det har gått 55 minutter til alle verdiene er under 19 cm for alle punktene, utenom tjenesten til G4 i punkt K004. På slutten av måletiden er verdiene ned på 17 cm for både alle tjenestene og punktene. G4 og G4+ gjør det best i punkt NMB1, nest best i P102 og dårligst i K004. Starpoint derimot gjør det best i K004, nest best i P102 og dårligst i NMB1. RMS verdiene og standardavvikene vil avvike lite fra hverandre. Fra tabell 4.7 så vil feilene ligge under 15 cm i det 30 minuttet for både alle tjenestene og punktene. Etter 55 minutter vil denne verdien være under 5 cm, utenom punktet K004 og tjenesten G4 og punktet P102 og G4+, som hadde en avbrutt konvergensten. G4 og G4+ har lavest RMS-verdi, feil og standardavvik i NMB1, mens for Starpoint vil det være K004. Det største avviket fra RMS og standardavviket for Starpoint er på 1009 og 639 cm i K004 etter 5 minutter, se tabell 4.8. Starpoint har større avvik for de korte konvergenstidene 5 og 15 minutter sammenlignet med G4 og G4+. I det 60 minuttet vil det største avviket ligge under 32 cm for alle tjenestene og punktene. G4 har sitt laveste største avvik i NMB1 på 16 og 15 cm, for G4+ er det 11 og 10 cm og Starpoint sin er 17 og 13 cm. Starpoint har sine laveste største avvik i K004 på 10 og 6 cm etter 55 minutter.

RMS-verdien og standardavviket på høyden vil være under 146 cm for alle tjenestene og punktene etter 15 minutter i figur 4.8, sett bort fra den med avbrutt konvergensten. Etter 30 minutter er verdien på under 50 cm, og etter 60 minutter er den på under 25 cm. For høyden er RMS-verdiene vesentlig større enn standardavvikene, at nøyaktigheten er dårligere enn presisjonen. I tabell 4.9 er feilen under 28 cm etter 30 minutter for både

alle tjenestene og punktene, etter 60 minutter vil den verdien være på 22 cm. G4 og G4+ gjør det aller best for NMB1, mens for Starpoint gjør P102 det best. Fra tabell 4.10 er det K004 og Starpoint som gjør det dårligst med det største avviket fra RMS og standardavviket på 1016 og 784 cm etter 5 minutter. Det avviket vil ligge under 66 cm for alle punktene og tjenestene etter 30 minutter, mens etter 55 minutter vil den verdien ligge under 30 cm og 29 cm etter 60 minutter. Det minste største avvikene er på 5 og 4 cm for K004 målt av Starpoint etter 55 minutter. G4+ sitt minste største avvik er på 17 og 4 cm etter 60 minutter for NMB1 og G4 sitt er på 25 og 3 cm for P102 etter 60 minutter.

#### 5.1.4 Ytre pålitelighet

En ytre pålitelighetstest ble kjørt i GISLINE i grunnriss og høyde i figurene 4.9 og 4.10 og sammenlignet med stedfestningsstandarder i figur 2.20. Etter 5 minutter klarer kun punkt P102 og NMB1 for tjenestene G4 og G4+ kravene til eiendomsnormen for områdetypene 3b og 4 på 0.5 meter i grunnrisset. I det 15 minuttet klarer Starpoint også å oppfylle det samme kravet for punkt P102 og NMB1. Kravene for områdetypene 1, 2 og 3a blir ikke oppfylt før enn etter 55 minutter, hvor Starpoint er den eneste tjenesten som klarer å komme under disse områdetypene på 0.10 meter for punktet K004. I punkt P102 klarer alle tjenestene å oppfylle alle kravene i grunnriss, mens i NMB1 er Starpoint den eneste tjenesten som ikke godtas av områdetypene på 0.10 meter.

For høyden klarer kun G4 i punkt NMB1 å godtas av områdetypene 3b og 4 etter 5 minutter. Etter 15 minutter vil disse områdetypene godtas av tjenestene G4 og G4+ i P102 og NMB1. Det er ikke før etter 30 minutter at både alle tjenestene og punktene klarer å være under kravet på 0.50 meter, sett bort fra G4 i punkt K004. Tjenesten G4+ i P102 er eneste som klarer områdetypene 1, 2 og 3a etter 30 minutter. I det 55 minuttet klarer alle tjenestene kravene i eiendomsnormen for punkt P102, mens for NMB1 er det kun tjenestene G4 og G4+. For å både oppfylle kravene for områdetypene 3b og 4 på 0.50 meter i grunnriss og høyde, er det nødvendig med en konvergenstid på minst 30 minutter for alle tjenestene og 55 minutter for å oppfylle områdetypene 1, 2 og 3a på 0.10 meter. G4 og G4+ klarer å oppfylle områdetypene 3b og 4 i P102 og NMB1 i det 15 minuttet for både grunnriss og høyde.

#### 5.1.5 GNSS kvalitetstall

Den prosentvise fordelingen av de GNSS kvalitetstallene 1, 2, 4 og 5 for punktene ble plottet for hele måleøkten samlet for alle de uavhengige målingene i figur 4.11. K004 er det punktet som holder lengst i løsningen med tallet 1 for alle tjenestene, sammenlignet med P102 og NMB1. Starpoint i K004, P102 og NMB1 har prosentvis fordeling mellom tallet 4 fix og 5 float på 61 % og 17.5 %, 74.4 % og 10 %, 76.3 % og 8.8 %. For G4 er denne fordelingen mellom tallet 2 og 5 på 17 % og 77.1 %, 13.6 % og 85.5 %, 22.6 % og 76.4 %. Tilsvarende for G4+ er på 8 % og 89.9 %, 24 % og 74.9 %, 25.5 % og 73.5 %. I K004 bruker Starpoint gjennomsnittlig 12.9 minutter i løsningen med tallet 1 og 2 og resterende 47.1 minuttene i 4 og 5. For G4 i det samme punktet er løsningen tilsvarende på 13.7 og

46.3 minutter, mens G4+ er på 6.7 og 53.3 minutter. I P102 er denne fordelingen på 9.4 og 50.6 minutter for Starpoint, 8.7 og 51.3 minutter for G4 og 15.1 og 44.9 minutter for G4+. NMB1 har en fordeling for Starpoint på 8.9 og 51.1 minutter, 14.2 og 45.8 minutter for G4 og 15.9 og 44.1 minutter for G4+.

De dårligste målingene med avbrutt konvergens blir presentert som plott i figur 4.12, fordelt ut på GNSS kvalitetstallene. I tredje måling for G4 i K004, gikk løsningen opp fra 1 til 5 under 10 minutter, før den gikk tilbake til 1 etter 50 minutter. Tredje måling i K004 for G4+ varierte løsningen mellom 2 og 5 fra start fram til det 15 minuttet, og gikk raskt ned til 1 litt før 20 minutter og forble der i 3-5 minutter, før den gikk tilbake til 5. Andre målingen i P102 med G4+, gikk løsningen opp til 5 på under 15 minutter og holder seg stabilt der før den faller ned igjen til 2 etter 50 minutter. Fjerde målingen i K004 med Starpoint gikk løsningen opp til 4 på under 25 minutter og faller ned igjen til 1 etter 55 minutter.

## 5.2 Hindring i sikt til geostasjonær satellitt i Ås

Legg merke til at dataene for G4 og G4+ ikke er representative for ulike hindringer i sikt til sin geostasjonær satellitt, grunnet en stor inklinasjonsvinkel for Alphasat, som gir store variasjoner i elevasjonsvinkel på døgnet.

### 5.2.1 Formelle nøyaktighetstall

For punkt El20 fra figur 4.13 klarer alle de fire uavhengige målingene å konvergere, mens i figur 4.14 for punkt El21 er det måling nummer 4 som får avbrutt konvergens etter 6 minutter. Punktet El22 fra figur 4.15 er det måling 1 og 4 som får avbrutt konvergens for hele måleøkten.

For standardavvikene i grunnriss fra figur 4.16 er det tydelig å se at målingene med Starpoint gjør det verre for hver økende grad i hindring i sikt til geostasjonær satellitt fra El20 til El21 og El21 til El22. Dette er ikke tilfellet med G4 og G4+, hvor El21 er det verste punktet for alle konvergenstidene. Årsaken til at tjenestene til Starfix gjør det plutselig bedre i El22 enn El21, er grunnet den store inklinasjonsvinkelen til Alphasat på 2.8 grader, som gir ulik elevasjonsvinkel på døgnet, se figur 3.11.

### 5.2.2 RMS & Standardavvik

For RMS og standardavvikene i grunnriss for punktene El20, El21 og El22 vist i figur 4.18, er det El20 som har de laveste tallene for Starpoint. El22 gjør det derimot bedre for alle konvergenstidene for Starpoint sammenlignet med El21.

I høyden vil RMS og standardavvikene være lavest for El20 for Starpoint til alle konvergenstidene, vist i figur 4.19. El21 gjør det dårligst etter 2 og 6 minutter, mens El22 gjør det dårligst etter 10 minutter for Starpoint.

### 5.2.3 Ytre pålitelighet

For ytre påliteligheten i grunnriss og høyde fra figurene 4.20 og 4.21, er det tydelig å se at målingene med Starpoint gjør det verre for hver økende grad i hindring i sikt til geostasjonær satellitt fra El20 til El21 og El21 til El22. En endring i hindring i sikt til Eshail har en effekt på kvalitetsmålene for Starpoint. Etter 10 minutter er ytre påliteligheten for tjenesten Starpoint og punktene El20, El21 og El22 på 93, 222 og 281 cm i grunnriss, og 135, 321 og 388 cm i høyde.

### 5.2.4 Signal Quality Indicator

Fra figur 4.22 er verdiene for signalkvalitet til geostasjonære satellitten Eshail 1 plottet mot tiden for punktene El20, El21 og El22. Topcon anbefaler at denne verdien er på 9 dB eller høyere for aktivering og til bruk. For alle de fire uavhengige målingene i El20 varierte signalkvaliteten fra 9 til 2.5 dB. Måling 4 slutter å motta korreksjoner på slutten, grunnet en feil i sjekksummen i meldingen.

I El21 varierte signalkvaliteten til de fire uavhengige målingene fra 6 til 0 dB. Ut i måling 3 var signalkvaliteten på 0 dB i over 2 minutter og tilsvarende over 4 minutter for måling 4. Signalkvaliteten er signifikant lavere over hele måleøkten for alle målingene i El21 sammenlignet med El20.

Det dårligste egnede punktet El22 med hindring i sikt med en elevasjonsvinkel på 22 grader, fikk de laveste signalkvalitet verdiene for alle målingene fra 2.5 ned til 0 dB. I måling 3 får signalkvalitet verdien usedvanlig høy verdi på over 50 dB etter 6 minutter, grunnet en feil i sjekksummen i meldingen. Det medførte at mottakelse av korreksjoner for signalkvalitet stoppet opp litt før 9 minutter i løpet av måleøkten.

### 5.2.5 Age of last message

Fra figur 4.23 er verdiene for alder på siste mottatte korreksjonsmelding til geostasjonære satellitten Eshail 1 plottet mot tiden for punktene El20, El21 og El22. For alle de fire uavhengige målingene i El20, varierte alder på siste mottatte korreksjonsmelding fra 0.6 til 0.0 sekunder, utenom måling 4 som ga usedvanlige høye verdier på 800 sekunder etter 8 minutter, grunnet en feil i sjekksummen i meldingen.

I El21 varierte siste mottatte korreksjonsmelding til de fire uavhengige målingene fra 200 til 0 sekunder. Måling nummer 4 gjorde det dårligere enn de tre første med verdier opp til 200 sekunder, mens de andre hadde verdier fra 3.5 til 0 sekunder.

Punktet El22 fikk høye verdier for alder på siste mottatte korreksjonsmelding fra 40 til 0 sekunder. I måling 3 får alder på siste mottatte korreksjonsmelding usedvanlig høy verdi på over 800 sekunder etter 6 minutter, grunnet en feil i sjekksummen i meldingen. Det medførte at mottakelse av korreksjoner for signalkvalitet stoppet opp litt før 9 minutter i løpet av måleøkten.

## 5.3 Videre arbeid

Når det gjelder videre arbeid hadde det vært interessant å måle lengre og flere måleserier for punktene K004, P102 og NMB1 og se hvor bedre kvalitetstallene blir. En annen interessant ting å undersøke er så hvilke kvalitetstall det er mulig å oppnå med kinematiske målinger, der mottakeren er i bevegelse. Det hadde også vært mulig å foreta en etterprosessering med sluttproduktene til IGS og sammenligne de med sanntids kvalitetstallene.

# Kapittel 6: Konklusjon

I introduksjonen i denne avhandlingen ble følgende to spørsmål konkretisert:

1. Hvilke kvalitetsmål er oppnåelig til tjenestene for de ulike konvergenstidene 5, 15, 30, 55 og 60 minutter?
2. Har en ulik hindring i sikt til geostasjonær satellitt for mottakelse av korreksjoner i RT-PPP løsningen påvirkning på kvalitetsmålene?

Resultatene fra de formelle nøyaktighetstallene viste at K004 var et krevende punkt for alle tjenestene å måle, og alle tjenestene fikk en måling med avbrutt konvergens i det punktet. Det var nødvendig med en konvergenstid på 30 minutter, for å oppnå presisjon under 11 cm for punktene P102 og NMB1 i grunnriss og høyde.

Den beste sammenhengende nøyaktigheten og presisjonen til hele måleserien for alle uavhengige målingene og tjenestene var det NMB1 som gjorde det best, P102 nest best og K004 dårligst.

For å oppnå RMS og standardavvik under 20 cm for alle tjenestene og punktene var det nødvendig med en konvergenstid på 55 minutter i grunnriss og høyde. Den største feilen i grunnriss var på 5 cm og 21 cm i høyde etter 55 minutter. Starpoint hadde lengre konvergenstid de første 5 minuttene veid opp mot kvalitetsmålene i forhold til G4 og G4+.

En nødvendig konvergenstid for å oppfylle områdetypene 3b og 4 i stedfestingsstandarden på 0.50 meter i grunnriss og høyde for alle tjenestene var på 30 minutter. Områdetypene 1, 2 og 3a på 0.10 meter var oppfylt etter 55 minutter. Det er nødvendig med en lang konvergenstid til å bestemme nye koordinater i henhold til standarden i eiendomsnormen.

Kvalitetsmålene til G4 og G4+ var ikke representative for ulike hindringer i sikt til sin geostasjonær satellitt Alphasat, grunnet dens store inklinasjonsvinkel på 2.8 grader, som ga ulik elevasjonsvinkel på døgnet. Starpoint derimot fikk dårligere kvalitetsmål for økende grad av hindring i sikt til sin geostasjonære satellitt Eshail 1. De formelle nøyaktighetstallene, RMS og standardavvikene mellom målingene og ytre påliteligheten gjorde det dårligere for alle sine konvergenstider for økt hindring i sikt.

# Bibliografi

- Abou-Galala, M., Rabah, M., Kaloop, M., & Zidan, Z. M. (2018). Assessment of the accuracy and convergence period of precise point positioning. *Alexandria engineering journal*, *57*(3), 1721–1726. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.04.019>
- Alle eiendomsgrenser i matrikkelen har god nøyaktighet. (2021). <https://www.kartverket.no/eiendom/lokal-matrikkelmyndighet/datakvalitet/myter/alle-eiendomsgrenser-i-matrikkelen-har-god-noyaktighet#heading-12314>
- Anderle, R. J. (1976). Point positioning concept using precise ephemeris. *Satellite Doppler Positioning*, *1*, 47–75. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1976sdp..conf...47A>
- Caissy, M., Agrotis, L., Weber, G., Pajares, M., & Hugentobler, U. (2012). The international gnss real-time service. *GPS World*, *23*, 52–58.
- EUSPA. (2019). *Ppp-rtk market and technology report* (Report). [https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/calls\\_for\\_proposals/rd.03\\_-\\_ppp-rtk\\_market\\_and\\_technology\\_report.pdf](https://www.euspa.europa.eu/sites/default/files/calls_for_proposals/rd.03_-_ppp-rtk_market_and_technology_report.pdf)
- Galileo high accuracy service. (2020). <https://www.gsc-europa.eu/galileo/services/galileo-high-accuracy-service-has>
- Gao, Y., & Chen, K. (2004). Performance analysis of precise point positioning using real-time orbit and clock products. *Journal of Global Positioning Systems*, *3*, 95–100. <https://doi.org/10.5081/jgps.3.1.95>
- GEONORGE. (2022). Epsg koder. <https://register.geonorge.no/epsg-koder?page=1>
- Ghilani, C. D. (2018). *Adjustment computations : Spatial data analysis* (Sixth edition.). Wiley.



- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *Gnss : Global navigation satellite systems : Gps, glonass, galileo and more*. Springer.
- IGS. (2023a). Gps satellite ephemerides / satellite & station clocks. <https://igs.org/products/>
- IGS. (2023b). Igs network. <https://network.igs.org/>
- Kouba, J., & Héroux, P. (2001). Precise point positioning using igs orbit and clock products [Export Date: 04 April 2023; Cited By: 1154]. *GPS Solutions*, 5(2), 12–28. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>
- Lachapelle, G., Petovello, M., Gao, Y., & Garin, L. (2006). Precise point positioning and its challenges, aided-gnss and signal tracking. *Inside GNSS*, 1, 16–21.
- Li, X., Ge, M., Dai, X., Ren, X., Fritsche, M., Wickert, J., & Schuh, H. (2015). Accuracy and reliability of multi-gnss real-time precise positioning: Gps, glonass, beidou, and galileo. *Journal of geodesy*, 89(6), 607–635.
- Li, X., Huang, J., Li, X., Lyu, H., Wang, B., Xiong, Y., & Xie, W. (2021). Multi-constellation gnss ppp instantaneous ambiguity resolution with precise atmospheric corrections augmentation. *GPS Solutions*, 25(3), 107.
- Li, X., Li, X., Yuan, Y., Zhang, K., Zhang, X., & Wickert, J. (2018). Multi-gnss phase delay estimation and ppp ambiguity resolution: Gps, bds, glonass, galileo. *Journal of geodesy*, 92, 579–608.
- Løvås, G. G. (2013). *Statistikk for universiteter og høyskoler* (3.). Universitetsforl.
- N2YO. (2023a). Alphasat (inmarsat 4a-f4). <https://www.n2yo.com/satellite/?s=39215>
- N2YO. (2023b). Eutelsat 25b (es'hail 1). <https://www.n2yo.com/satellite/?s=39233>
- NOAA. (2023). Space segment. <https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- Norkart. (2005). Kof spesifikasjon. <http://www.anleggsdata.no/wp-content/uploads/2018/04/KOF-BESKRIVELSE-Oppdatert2005.pdf>
- NovAtel. (2003). Gps position accuracy measures. [https://www.gnss.ca/app\\_notes/APN-029\\_GPS\\_Position\\_Accuracy\\_Measures\\_Application\\_Note.html](https://www.gnss.ca/app_notes/APN-029_GPS_Position_Accuracy_Measures_Application_Note.html)

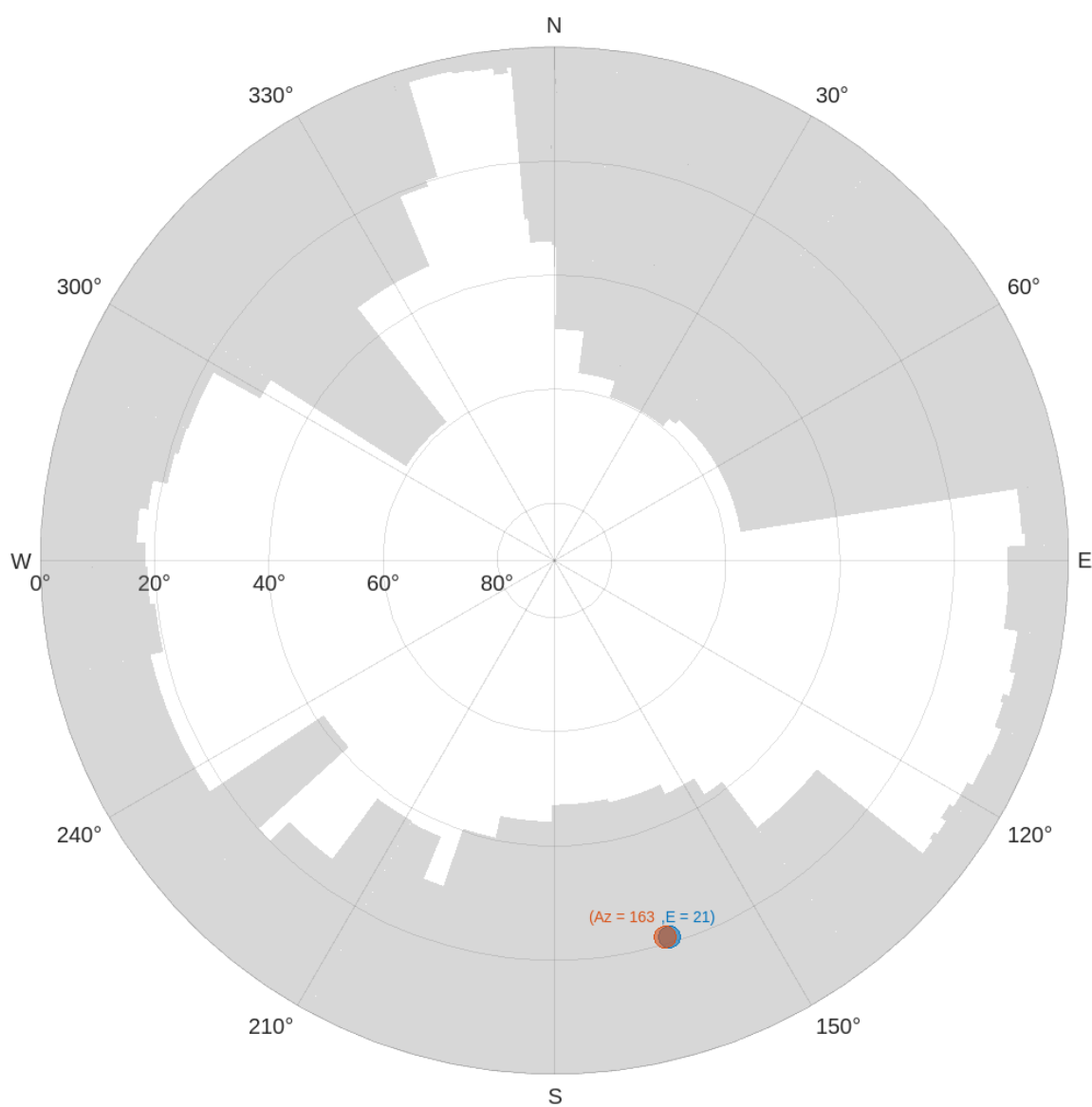
- Ordbok for kart og oppmåling. (1989). <https://kartverket.no/globalassets/geodataarbeid/standardisering/standarder/standarder-geografisk-informasjon/kart-og-geodata-2.0-standarder-geografisk-informasjon.pdf>
- Proj. (2023). <https://proj.org/>
- Rost, C. (2022a). Forelesningsnotat: Fasemodulering - bpsk. <https://nmbu.instructure.com/courses/7166/files/folder/Forelesning/v%C3%A5r%202022?preview=1530453>
- Rost, C. (2022b). Forelesningsnotat: Posisjonsbestemmelse med gnss. <https://nmbu.instructure.com/courses/7166/files/folder/Forelesning/v%C3%A5r%202022?preview=1535730>
- Soler, T., & Eisemann, D. W. (1994). Determination of look angles to geostationary communication satellites [Ny028 Times Cited:13 Cited References Count:0]. *Journal of Surveying Engineering-Asce*, 120(3), 115–127. [https://doi.org/Doi10.1061/\(Asce\)0733-9453\(1994\)120:3\(115\)](https://doi.org/Doi10.1061/(Asce)0733-9453(1994)120:3(115))
- St. Olaf College, (n.d.). Precision vs. accuracy. <https://wp.stolaf.edu/it/gis-precision-accuracy/>
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J., & Hernández-Pajares, M. (2013). Gnss data processing. [https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS\\_Book/ESA\\_GNSS-Book\\_TM-23\\_Vol\\_I.pdf](https://gssc.esa.int/navipedia/GNSS_Book/ESA_GNSS-Book_TM-23_Vol_I.pdf)
- SV1XV. (2013). Accuracy (trueness and precision). [https://en.wikipedia.org/wiki/File:Accuracy\\_\(trueness\\_and\\_precision\).svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Accuracy_(trueness_and_precision).svg)
- Tallysman. (2023). Gnss positioning techniques; precise point positioning. <https://www.tallysman.com/gnss-positioning-techniques/>
- Tegedor, J., Ørpen, O., Melgård, T., Lapucha, D., & Visser, H. (2017). G4 multi-constellation precise point positioning service for high accuracy offshore navigation. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 11(3).
- Tegedor, J., Lapucha, D., Melgård, T., Vigen, E., & Strandli, R. (2015). The new g4: Multi-constellation precise point positioning using gps, glonass, galileo and beidou.

- Tegedor, J., & Ørpen, O. (2015). Siste nytt i høypresis satellittnavigasjon: Bruk av flere satellittsystemer og bestemmelse av heltallsflertydigheter ved nøyaktig punktbestemmelse.
- Test & assessment research center. (2023). <http://www.csno-tarc.cn/en/system/constellation>
- Teunissen, P., & Montenbruck, O. (2017). Springer handbook of global navigation satellite systems.
- Toews., M. W. (2007). Standard deviation diagram. [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard\\_deviation\\_diagram.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Standard_deviation_diagram.svg)
- Topcon. (2022). Topnet live: Starpoint/skybridge general information. <https://www.topconpositioning.com/na/support/article/topnet-live-starpoint-skybridge-general-information>
- Trimble. (2023). Nmea-0183 messages: Overview. [https://receiverhelp.trimble.com/alloy-gnss/en-us/NMEA-0183messages\\_MessageOverview.html](https://receiverhelp.trimble.com/alloy-gnss/en-us/NMEA-0183messages_MessageOverview.html)
- Wikipedia. (2022). Inmarsat-4a f4. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inmarsat-4A\\_F4&oldid=1105602123](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Inmarsat-4A_F4&oldid=1105602123)
- Wikipedia. (2023). Eutelsat 25b/es'hail 1. [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eutelsat\\_25B/Es%27hail\\_1&oldid=1142076555](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Eutelsat_25B/Es%27hail_1&oldid=1142076555)
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997a). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. <https://doi.org/https://doi.org/10.1029/96JB03860>
- Zumberge, J. F., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M. M., & Webb, F. H. (1997b). Precise point positioning for the efficient and robust analysis of gps data from large networks [Export Date: 04 April 2023; Cited By: 2673]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3), 5005–5017. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-0030861167&partnerID=40&md5=ab11f06c208ef68cb9f413b3b9812776>

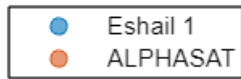
ZUMBERGE, J. F., WATKINS, M. M., & WEBB, F. H. (1997). Characteristics and applications of precise gps clock solutions every 30 seconds. *NAVIGATION*, 44(4), 449–456. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/j.2161-4296.1997.tb02360.x>

# Vedlegg

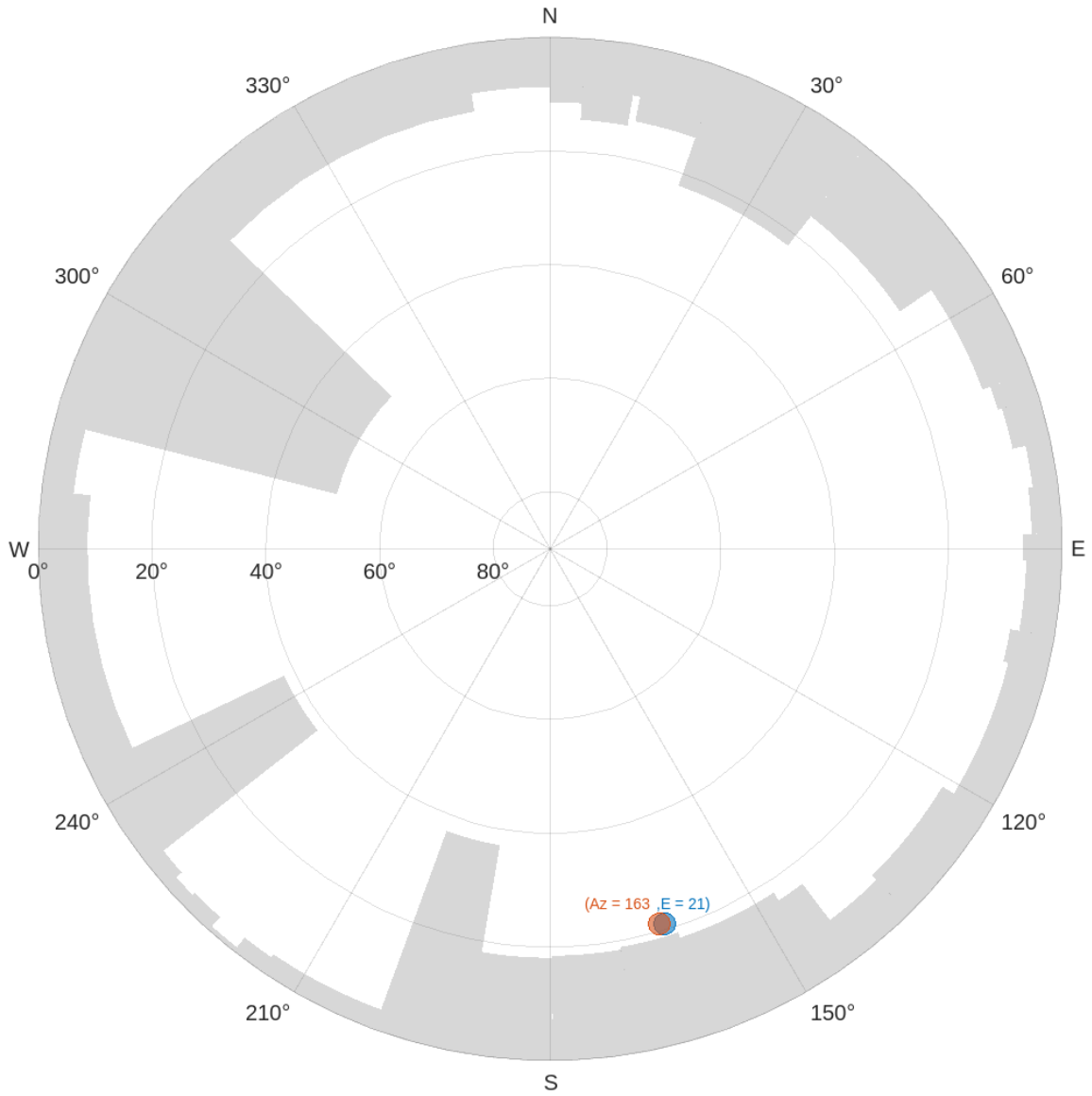
# Vedlegg A: Obstruksjonsplot



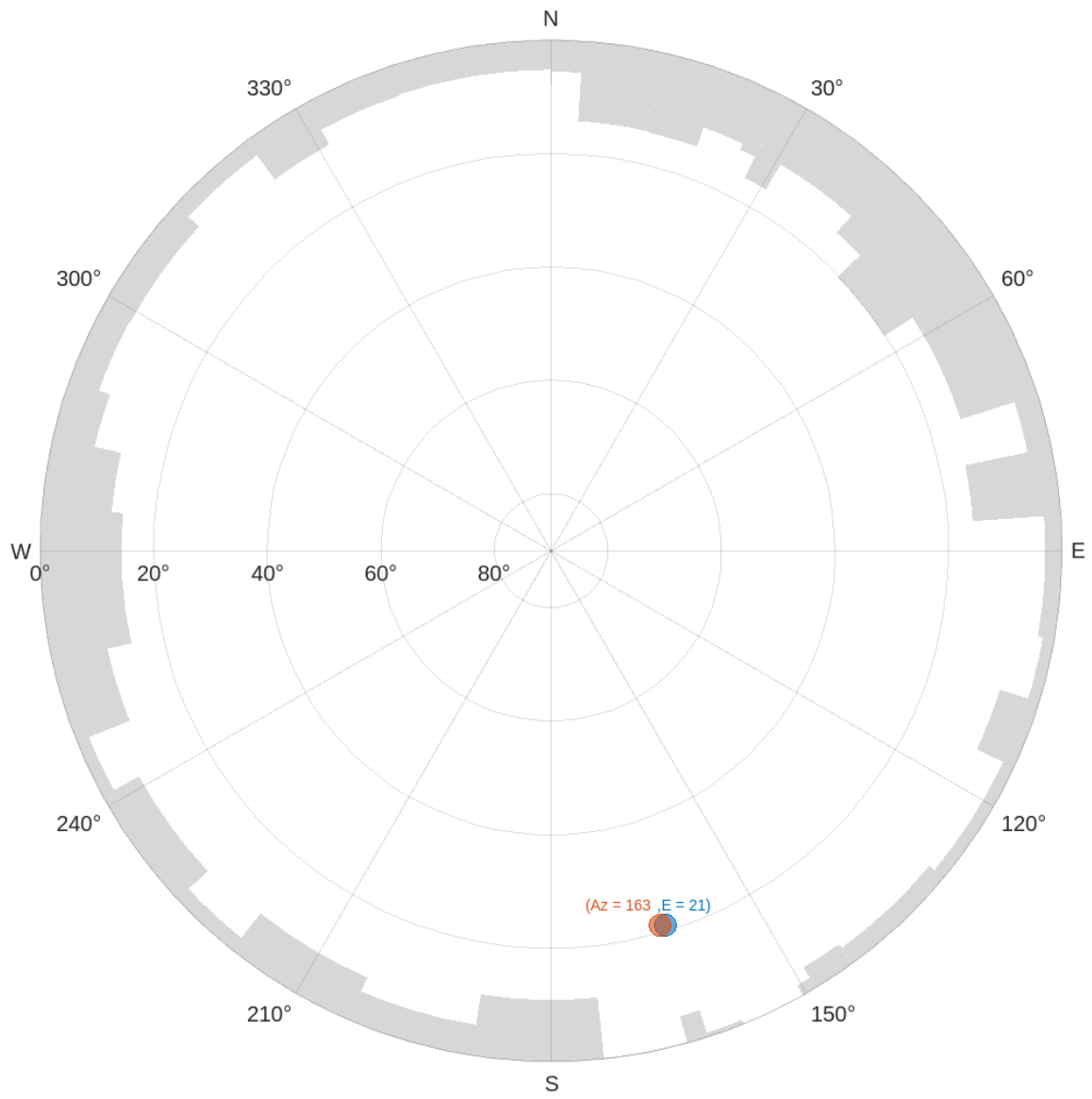
Figur A.1: Obstruksjonsplott av K004.



**Figur A.2:** Label til alle obstruksjonsplottene.

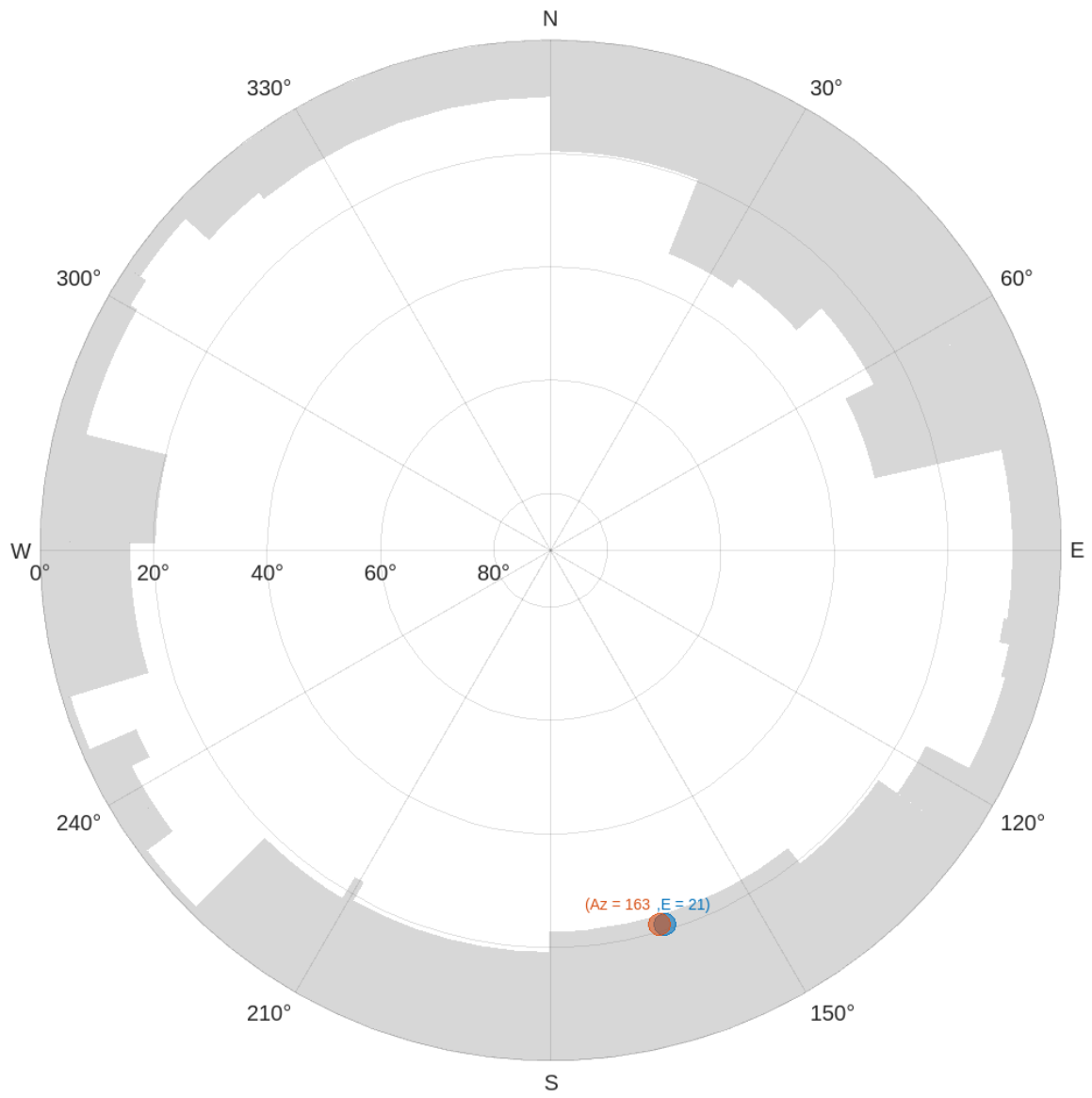


**Figur A.3:** Obstruksjonsplott av P102.

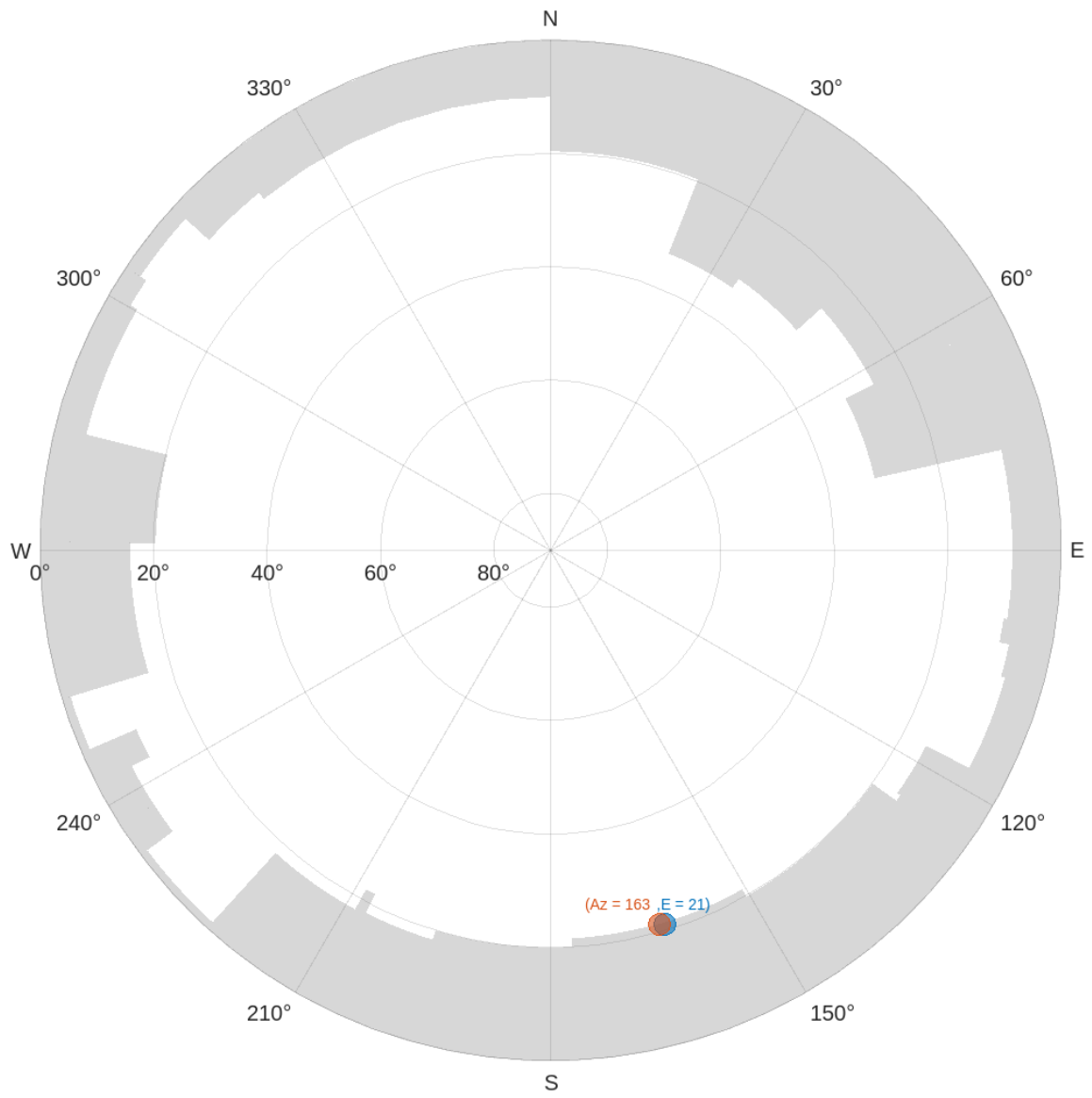


**Figur A.4:** Obstruksjonsplott av NMB1.

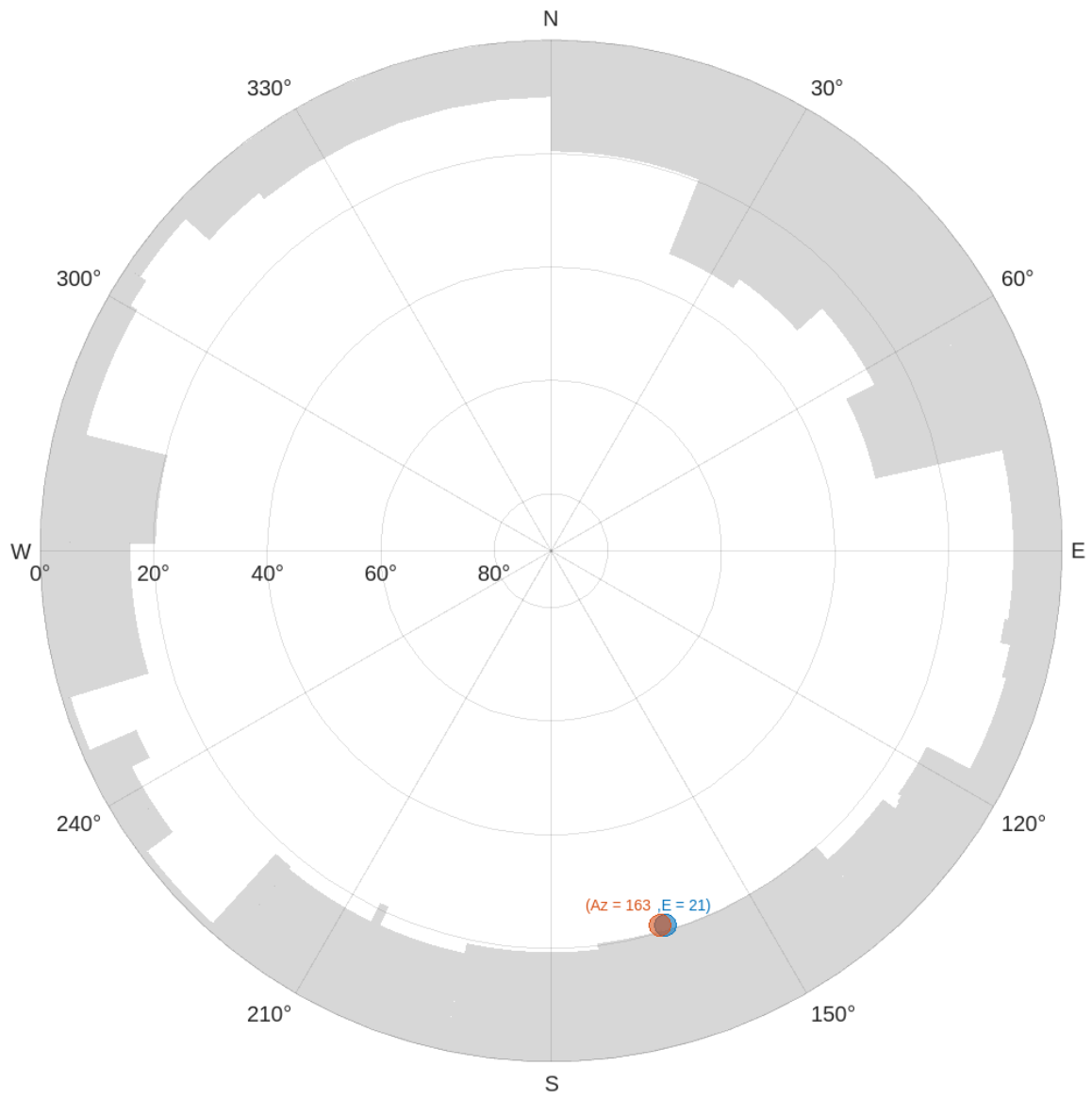




**Figur A.5:** Obstruksjonsplott av EI22.



**Figur A.6:** Obstruksjonsplott av EI21.



Figur A.7: Obstruksjonsplott av EI20.

# Vedlegg B: Feltrappport

## B.1 Utstyrliste

- Topcon HiPer VR
- Stativ med fotplate: Topcon
- Topcon GM-50 serien totalstasjon
- Slant Height Measure Mark
- Målebånd
- Festeskruer til NMB1-søyle
- CPOS Rover: Topcon HiPer VR med tilhørende målebok Topcon FC-5000
- Stang med libelle og støtteben
- Fugro G4/G4+ antenne: VeroStar VSP6037L Full GNSS antenna with L-band, multi GNSS, multi frequency with Fugro firmware
- Fugro G4/G4+ mottaker: Trimble BX992
- Nettverkskabel
- Pc med lader
- Biltema fritidsbatteri marine, 12 V, 64 Ah
- Biltema spenningsomformer 12V til 240V
- Hammer
- 3 stk. 60 x 10 mm betongskruer

## B.2 Feltlogg

**20.01.2023:**

De tre koordinatene El20, El21 og El22 ble etablert foran den nordlige fasaden til NIBIO bygget med CPOS. Hvite bøtter ble lagt opp på for å skjerme punktene fra snø.



**Figur B.1:** Nyetablerte koordinatene El20, El21 og El22.

**23.01.2023:**

6 fastmerker rundt på Campus ble målt 3-4 ganger med 45 minutters mellomrom. Punktene P102, EL20, EL21, EL22 og K004 ble målt 4 ganger, mens NMB1 ble målt 3 ganger. Årsaken til at NMB1 ble kun målt 3 ganger skyldes at topplaget av metallplaten var fryst. To vaskebøtter fylt opp med glovarmt vann ble brukt til å fjerne islaget.



(a) Med is



(b) Uten is

#### **24.01.2023:**

Aktiverte Topcon PPP Starpoint Pro abonnement. Testet utstyret med å logge foran NIBIO bygget, men mottakeren nektet å lagre filene på grunn av feil innstillinger i programvaren TRU. Logget 2 stk. 1-timer data i NMB1 med Fugro G4, disse dataene mottok ikke korreksjoner fra den geostasjonære satellitten grunnet utgått abonnement.

#### **25.01.2023:**

Logget en time med Fugro for å verifisere dårlige data fra 24.01.2023. Kontaktet Leif-Morten i Fugro for å sjekke om det fortsatt var et aktivt Fugro abonnement i mottakeren, som det ikke var. Fikk aktivert et nytt Fugro abonnement. Logget 4 stk. 1-time segmenter med Starpoint. Samme problemstilling angående lagring av filer i TRU forekom. Oppstart gjennom Magnet Field ødela oppsettet i TRU og nektet å logge datafiler. Etter en telefon med Rolf fra Blinken ble vi enige om å kun logge via TRU, uten å berøre Magnet Field. Kort oppsummert ble det mange små ting som måtte ordnes og denne måledagen gikk ikke som forventet. Alt av oppsett skal være i orden nå.

#### **26.01.2023:**

4 stk. 1-time målinger i både NMB1 og P102 ble gjort med Starpoint Pro, 8 totalt. 4 stk. 1-time målinger ble utført i P102 og 2 i NMB1 for Fugro G4. Det ble en lang dag med totalt 14 timer logging.





**Figur B.3:** Bilder av punktet P102.

**27.01.2023:**

De siste 2 stk. 1-time målingene i NMB1 ble gjort med Fugro G4. I K004 ble det gjort 4 stk. 1-time målinger både for Fugro G4 og Starpoint Pro. Foran NIBIO bygningen testet jeg signalstyrken fra den geostasjonære satellitten ved å gå fram og tilbake med Topcon mottaker og målebok.



**Figur B.4:** Bilde av punkt K004.

**30.01.2023:**

4 stk. 10 minutter målinger ble utført med både Fugro G4 og Topcon Starpoint Pro



i El20, El21 og El22, alt i alt 24 målinger. Stativet drev og sank stadig ned ettersom bakken smeltet, som gjorde at stativet måtte justeres underveis til å få libellen i vater. I etterkant av målingene viste seg at Starpoint Pro abonnementet ikke hadde blitt aktivert for periode 2. Slutten av dagen ble brukt til å måle vinkler til obstruksjoner ved hjelp av en totalstasjon.



**Figur B.5:** Bilder foran nordsiden av NIBIO fasaden.

### 31.01.2023:

Starten av dagen ble brukt til å aktivere Starpoint Pro abonnement for periode 2. I tillegg ringte jeg Leif-Morten til å bytte fra float løsningen G4 til delvis fix løsningen G4+. Resten av dagen ble brukt til å logge 4 stk 1-time data med G4+ i P102. Det begynte å snø i løpet av den siste målingen.



**Figur B.6:** Bilde av punkt P102 etter at det har snødd.



**01.02.2023:**

4 stk. 1- time målinger ble gjort i både NMB1 og K004 med G4+, totalt 8 stk.

**02.02.2023:**

4 stk. 10 minutter målinger ble utført med både Fugro G4+ og Topcon Starpoint Pro i E120, E121 og E122, alt i alt 24 målinger. Det var minusgrader og frost som gjorde at stativet holdt seg stabilt under loggingen ift. målingene utført 30.01.23.



**Figur B.7:** Bilde foran NIBIO fasaden.

**03.02.2023:**

Målte vinkler i P102 og NMB1 til obstruksjoner med en totalstasjon.

**10.02.2023:**

Målte vinkler i K004 til obstruksjoner med en totalstasjon.

## B.3 Måleskjema

**Tabell B.1:** Måleskjemaer for P102, NMB1 og K004 for posisjonstjenestene G4, Starpoint Pro og G4+. Måletid lik 1 time.

<b>Fugro G4</b>				
<b>Punktnavn</b>	P102	NMB1		K004
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.59	0.17		1.58
<b>Data rate (s)</b>	1			
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10			
<b>Dato målt</b>	26.01.23		27.01.23	
<b>Day of year</b>	26		27	
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	07:51 - 08:56	12:32 - 13:34	-	11:43 - 12:48
	08:58 - 10:00	13:36 - 14:36	-	12:50 - 14:00
	10:02 - 11:03	-	07:56 - 08:57	14:01 - 15:03
	11:04 - 12:16	-	08:59 - 10:00	15:05 - 16:07
<b>Starpoint Pro</b>				
<b>Punktnavn</b>	P102	NMB1	K004	
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.48	0	1.48	
<b>Data rate (s)</b>	1			
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10			
<b>Dato målt</b>	26.01.23		27.01.23	
<b>Day of year</b>	26		27	
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	13:07 - 14:08	06:37 - 08:00	07:17 - 08:19	
	14:11 - 15:12	08:01 - 09:05	08:20 - 09:23	
	15:14 - 16:16	09:07 - 10:10	09:24 - 10:25	
	16:18 - 17:18	10:12 - 11:15	10:28 - 11:30	
<b>Fugro G4 +</b>				
<b>Punktnavn</b>	P102	NMB1	K004	
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.52	0.16	1.47	
<b>Data rate (s)</b>	1			
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10			
<b>Dato målt</b>	31.01.23	01.02.23		
<b>Day of year</b>	31	32		
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	10:35 - 11:36	08:11 - 09:12	12:36 - 13:37	
	11:38 - 12:39	09:13 - 10:14	13:38 - 14:39	
	12:40 - 13:41	10:16 - 11:17	14:40 - 15:56	
	13:43 - 14:46	11:18 - 12:19	15:47 - 16:49	

**Tabell B.2:** Måleskjemaer for El20, El21 og El22 for posisjonstjenestene G4, Starpoint Pro og G4+. Måletid lik 10 min.

<b>Fugro G4</b>			
<b>Punktnavn</b>	El20	El21	El22
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.35	1.45	1.47
<b>Data rate (s)</b>	1		
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10		
<b>Dato målt</b>	30.01.23		
<b>Day of year</b>	30		
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	11:32 - 11:42	10:30 - 10:43	12:35 - 12:47
	11:45 - 11:57	10:46 - 10:57	12:48 - 13:00
	11:59 - 12:10	10:59 - 11:11	13:01 - 13:12
	12:12 - 12:23	11:12 - 11:24	13:14 - 13:25
<b>Starpoint Pro</b>			
<b>Punktnavn</b>	El20	El21	El22
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.40	1.36	1.29
<b>Data rate (s)</b>	1		
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10		
<b>Dato målt</b>	02.02.23		
<b>Day of year</b>	33		
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	11:15 - 12:26	12:05 - 12:17	13:28 - 13:40
	11:27 - 11:38	12:18 - 12:29	13:41 - 13:52
	11:39 - 11:50	12:31 - 12:42	13:53 - 14:05
	11:51 - 12:02	12:43 - 12:54	14:06 - 14:17
<b>Fugro G4 +</b>			
<b>Punktnavn</b>	El20	El21	El22
<b>Høydeoffset (m)</b>	1.43	1.38	1.32
<b>Data rate (s)</b>	1		
<b>Elevasjonsgrense (°)</b>	10		
<b>Dato målt</b>	02.02.23		
<b>Day of year</b>	33		
<b>Start - Slutt (UTC)</b>	13:31 - 13:43	11:10 - 11:21	12:08 - 12:19
	13:44 - 13:55	11:23 - 11:34	12:20 - 12:32
	13:56 - 14:07	11:35 - 11:47	12:34 - 12:45
	14:08 - 14:20	11:48 - 12:00	12:46 - 12:57

# Vedlegg C: Resultater

## C.1 Ytre pålitelighet av fasitkoordinater

### DOKUMENTASJON UTJEVNINGSBEREGNINGER

\*\*\*\*\*

#### ADMINISTRATIVE DATA

Oppdrag : 23012023\_CPOS

#### GJENNOMSNITTSPARAMETRE

Geoidehøyde [m] : 40.000  
Rotasjon [gon] : 0.00000  
Målestokk [m/km] : 0.000  
Nordlig loddavvik [gon] : 0.00000  
Østlig loddavvik [gon] : 0.00000

#### DATUMPARAMETRE

System : EUREF89 - SONE 32  
Akse / Sone : 32  
Lang halvakse [m] : 6378137.000  
Flattrykning [1/f] : 298.2572221010000  
Tangeringsmeridian [deg] : 9.0000000000000  
Skalafaktor : 0.999600  
Addisjonskonst. nord [m] : 0.000  
Addisjonskonst. øst [m] : 500000.000  
Rotasjon [deg] : 0.000000

#### INSTRUMENTPARAMETRE

INSTRUMENT : 61: CPOS

Std.avvik	Konstantdel	Avstandsavhengig
Standardavvik grunnriss:	0.0200 m	
Standardavvik høyde :	0.0300 m	
Sentrering Grunnriss :	0.0010 m	
Sentrering Høyde :	0.0020 m	

Ingen kovariansfunksjon, punktobs er ukorrelert med hverandre

YTRE PÅLITELIGHET - KOORDINATER [meter]

KOORDINAT	Observasjon....[meter/gon]		Indre pål.	Ytre pål.
H ELE20	ELE20	2	H 0.023	0.007
P ELE20	ELE20	4	X 0.011	0.004
H ELE21	ELE21	2	H -0.021	-0.006
P ELE21	ELE21	3	X -0.013	0.004
H ELE22	ELE22	4	H 0.021	0.008
P ELE22	ELE22	4	Y 0.014	0.006
H K004	K004	3	H -0.040	-0.013
P K004	K004	3	X 0.017	0.007
H NMB1	NMB1	3	H -0.023	-0.009
P NMB1	NMB1	3	X 0.013	0.004
H P102	P102	3	H -0.021	-0.007
P P102	P102	1	Y -0.012	0.003

Normparametre:

Normtype : Stedfesting av matrikkelenhets- og råderettsgrenser  
Normklasse : 2 : Tettbygd/utbyggingsområder (k= 100 mm)

STATISTIKK

Antall iterasjoner : 1

Antall observasjoner grunnrisskoordinater : 46  
Antall observasjoner høydekoordinater : 23  
Antall observasjoner : 69

Antall ukjente grunnrisskoordinater : 12  
Antall ukjente høydekoordinater : 6  
Antall ukjente : 18

Antall overbestemmelser : 51

Antall korrelasjoner : 69

Feilkvadratsum : 174.31922919  
Beregnet std.avvik på vektsenheten 1.8488  
Antatt std.avvik på vektsenheten : 1.0000

NYBESTEMTE KOORDINATER MED MIDLERE FEIL [meter]

PUNKT	N	E	H	sN	sE	sH
ELE20	6615612.556	599912.413	98.615	0.002	0.002	0.004
ELE21	6615610.689	599912.521	98.466	0.002	0.001	0.004
ELE22	6615609.067	599912.674	98.305	0.002	0.001	0.004
K004	6615533.039	599458.433	82.728	0.004	0.002	0.006
NMB1	6615708.449	599809.067	103.175	0.002	0.001	0.004

P102	6615542.314	600043.417	97.520	0.002	0.001	0.003
------	-------------	------------	--------	-------	-------	-------



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

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway