



Forord

Med denne masteroppgaven fullfører jeg mine fem flotte år ved UMB og etterhvert NMBU. Gjennom studietiden har jeg opplevd mye spennende både faglig og sosialt, noe jeg vil takke både familie, venner og lærere for.

For arbeidet lagt bak denne oppgaven vil jeg først og fremst takke veileder Ola Øvstedal for god og grundig hjelp gjennom hele arbeidsprosessen. Jeg vil videre takke Jan Bjerketvedt for samarbeidet med innsamling av data og hjelpen jeg fikk rundt nøyaktighet av skogsanvendelser. Jeg vil takke Narve Kjørsvik Schipper for introduksjonen og oppfølgingen av programvaren TerraPos for etterprosessering. Jeg vil takke Ole Martin Bollandsås og INA for utlån av mottakere og antenner for innmåling av data og jeg vil takke Rolf Knoph v/Blinken a.s for eksportering av RTK-data med grundig oppfølging og behjelpelighet rundt spørsmål angående disse.

Ås
15/5-2014

Andreas Saxi Jensen

Sammendrag

Denne oppgaven tar utgangspunkt i Precise Point Positioning under degraderte skogstettheter. Gjennom beregning av sikt på bakgrunn av elevasjonsvinkler innmålt i feltarbeid, innmåling av posisjonsdata og beregninger gjort med etterprosesserings-tjenestene TerraPos og CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference system - Precise Point Positioning), indikerer resultatene en trend hvor posisjonsnøyaktigheten og initialiseringstiden forverres og øker i forhold til referansen (målt med RTK), i takt med fortetning av skog for fire graderte punktene A - D. Som punktet med høyest % fri sikt hadde A en romlig posisjonsnøyaktighet på 1,81cm (beregnet med TerraPos). Initialiseringstiden for A var en romlig nøyaktighet på 7 cm etter 30 min (TerraPos). Som punktet med lavest % fri sikt hadde D en endelig romlig posisjonsnøyaktighet med 1,5916m (beregnet med TerraPos), med en initialiseringstid på 2 timer med romlig nøyaktighet på 1,699m. Sammenlignet med dagens krav på nøyaktighet og initialisering for skogsanvendelser er kun posisjonsnøyaktigheten for punkt A og B gode nok. Kravet om måling i sanntid ble ikke testet fordi igr-rapid data ikke ble benyttet.

Abstract

This paper examines Precise Point Positioning under degraded forest conditions. Through calculations of the field of view based on elevation angles measured in the fieldwork, measurements of the positioning data and estimation done with post-processing services such as TerraPos and CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference system - Precise Point Positioning), the results indicate a trend where the position accuracy and convergence time degrades and prolongs compared to the reference (measured with RTK), in sync with the density of the forest for the four graded stations A - D. As the station with the highest calculated % of an open field of view A presented a spatial position accuracy of 1,81cm (processed with TerraPos). The convergence time for station A was a spatial accuracy at 7 cm after 30 minutes (TerraPos). As the station with the lowest calculated % of an open field of view the D presented a final spatial position accuracy of 1,5916m (measured with TerraPos), with a convergence time of 2 hours and a spatial position accuracy of 1,699m. Compared to the demands on accuracy and convergence time within the forest industry today, only the position accuracy of the station A and B were good enough. The demand of measuring these in real-time was not tested as igr-rapid data was not collected.

Figurer

3.1	Fire satellitter er nødvendig for å bestemme en posisjon i 3-dimensjonale rom [ublox, 2009]	23
3.2	Signalstruktur for et GPS signal generert med L1 frekvens [ublox, 2009]	25
3.3	Kontrollsegmentets fasiliteter spredt over hele kloden [GPS.gov, Februar,2014a]	27
3.4	Dataflyten i beregningen av kringkastede efemerider [Seeber, 2003] .	28
3.5	Ekvatoriale koordinatsystem hvor $X_1 - X_3$ er jordfaste akser og $X_1^0 - X_3^0$ er romfaste akser [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]	30
3.6	Atmosfærens oppdeling i henhold til ulike fenomen, for signalforplantning har en ionosfæren og troposfæren [Seeber, 2003]	35
3.7	Troposfærisk påvirkning (tørr, våt og total påvirkning i meter) ved forskjellige elevasjonsvinkler [Seeber, 2003]	36
3.8	Signal fra satellitten går via bakken eller et objekt, dempes og forsinkes, og forstyrrer innkommende uforstyrrede signaler	39
3.9	Satellittenes geometri blir beregnet i forhold til volumet av tetraederet satellittkonstellasjonen utformer. Venstre figur viser en dårlig DOP, høyre figur viser en god DOP	41
3.10	Ved innmåling av slope antennehøyde og beregning av vertikal antennehøyde relativt ARP må det tas høyde for vertikalt avvik og horisontalt avvik mellom antennekant og ARP	44
3.11	Nøyaktighet og presisjon demonstrert mot en sirket med treffpunkt X	46
3.12	Det finnes tre måter å danne en enkeldifferanse på: To satellitter fjerner mottakerklokkefeilen, to mottakere fjerner satellittklokkefeilen og måling over to epoker anvender doppler-effekten til N såfremt en ikke har fasebrudd	47
3.13	IGS' nettverk av monitoreringsstasjoner. To av disse er plassert på norsk jord [IGS, April 2014a].	50
3.14	Med heltalls-fixedverdi vil avviket umiddelbart falle ned til optimal verdi, mens en med flyttalls-floatverdi har en noe lengre initialiseringsringtid	52

3.15	Feilbidrag som må tas høyde for i henholdsvis PPP og DGPS [Rizos et al., 2012]	53
3.16	GNSS-sammenligning: Utdrag fra tabell [Wikipedia.org, April 2014]	55
5.1	Arbeidsområde for feltarbeid, Lardal [Kartverket, Januar 2014]	62
5.2	PPP-mottakere [Kartverket, Januar 2014]	66
5.3	PPP4, libelle indikerte at stativet var sklidd ut	70
6.1	Illustrasjonen av projisering fra elevasjonsvinkler til lukket polygon	74
6.2	Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP4 med gradering A beregnet med TerraPos	75
6.3	Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP1 med gradering B beregnet med TerraPos	76
6.4	Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP3 med gradering C beregnet med TerraPos	77
6.5	Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP2 med gradering D beregnet med TerraPos	78
6.6	Visualisering av differansen mellom beregnede data og referanse-data, 2d -og 3d rms, og oppgitte standardavvik av TerraPos for de fire stasjonene	81
6.7	Visualisering av differansen mellom beregnede data og referanse-data, 2d -og 3d rms, og oppgitte standardavvik av CSRS for de fire stasjonene	82
6.8	Initialiseringstid i grunnriss, beregnet i TerraPos, for de fire stasjonene/graderingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	87
6.9	Initialiseringstid i høyde, beregnet i TerraPos, for de fire stasjonene/graderingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	88
6.10	Initialiseringstid i grunnriss, beregnet i CSRS, for de fire stasjonene/graderingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	91
6.11	Initialiseringstid i høyde, beregnet i CSRS, for de fire stasjonene/graderingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	91
6.12	Sammenligning av initialiseringstid i grunnriss for TerraPos og CSRS, for PPP2 og PPP3 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	92
6.13	Sammenligning av initialiseringstid i grunnriss for TerraPos og CSRS, for PPP1 og PPP4 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	93

6.14	Sammenligning av initialiseringstid i høyde for TerraPos og CSRS, for PPP2 og PPP3 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	93
6.15	Sammenligning av initialiseringstid i høyde for TerraPos og CSRS, for PPP1 og PPP4 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen	94
6.16	Presentasjon av innmålt prosjekt hvor de røde punktene er RTK-innmålinger og trekantene er PPP-stasjoner	96
B.1	Stasjonene i geografisk rekkefølge med himmelretning	113

Tabeller

3.1	Satellittkonstellasjonsstatus pr. 13/05-14, [of Homeland Security, Februar, 2014]	24
3.2	Feilbidrag fra ionosfæren på signalene ved enkelfrekvens- og dobbel-frekvensobservasjoner [Hieber, 1983];[Seeber, 2003]	38
3.3	Versjonene av IGS-produkter [IGS, April 2014b]	51
6.1	Elevasjonsvinkler i grader over horisonten i åtte himmelretninger for hver stasjon/gradering	72
6.2	Projisering av punkt fra elevasjonsvinkler til plan hvor N, NØ, Ø, SØ, S, SV, V og NV er elevasjonsvinkelen ved aktuell himmelretningene gitt i grader, r er bestemt radius til enhets sirkelen og første punkt p1 er bestemt i nord og videre beraktninger med klokken 45° fra hverandre	73
6.3	% fri sikt i forhold til total fri sikt med elevasjonsvinkler for forstyrrelser på 0° i alle retninger, videre illustrert med skyplot i tillegg B .	73
6.4	Midling av innmålte RTK-CPOS punkt før og etter målesesjon, med innmåling 7/11- og 8/11-2013	79
6.5	Vektet middel av referansekoordinatene gitt i EUREF89 UTM sone 32N for horisontale koordinater med høydekoordinat i forhold til NN1954	80
6.6	Avviket mellom ellipsoidisk høyde og høydereferanseflaten beregnet med TerraPos etter høydereferansmodellen NN1954	80
6.7	Tabell for det formelle avviket mellom prosesserte koordinater og referansen, 2d rms og 3d rms og oppgitt standardavvik for de prosesserte koordinatene for de fire stasjonene med enhet meter	81
6.8	Tabell for det formelle avviket mellom prosesserte koordinater og referansen, 2d rms og 3d rms og oppgitt standardavvik for de prosesserte koordinatene for de fire stasjonene i enhet meter	83
6.9	Tid for start og slutt av måling den 08/11-13 for de ulike stasjonene, hvor Mål-Start/Mål-Slutt indikerer klokkeslett og Måletid indikerer målesesjonens varighet gitt i timer, minutter og sekunder	84

6.10	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt A, stasjon PPP4	85
6.11	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt B, stasjon PPP1	85
6.12	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt C, stasjon PPP3	86
6.13	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt D, stasjon PPP2	86
6.14	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt A, stasjon PPP4	89
6.15	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt B, stasjon PPP1	89
6.16	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt C, stasjon PPP3	90
6.17	Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt D, stasjon PPP2	90
6.18	Tiden det tok å fixed-løsning i hver stasjon/graderingspunkt beregnet på bakgrunn av en tidsmidling av omkringliggende punkt, hvor sanntid indikerer at det ble umiddelbart fix-løsning ved punktet målt før og etter stasjonspunkt	95
B.1	Måleparametre PPP1/B	114
B.2	Måleparametre PPP2/D	115
B.3	Måleparametre PPP3/C	116
B.4	Måleparametre PPP4/A	117

Innhold

1	Innledning	17
1.1	Historie	17
1.2	Motivasjon	18
2	Problemstilling	19
3	Teori	21
3.1	GPS	21
3.1.1	Romsegmentet	22
3.1.2	Kontrollsegmentet	27
3.1.3	Brukersegmentet	31
3.2	Feilbudsjett og korreksjoner	32
3.2.1	Jordrotasjon	33
3.2.2	Relativistiske effekter	33
3.2.3	Signalforplantning	34
3.2.4	Multipath/Flerveisinterferens	38
3.2.5	Satellittgeometri	39
3.2.6	Antennefasesenter og mottakerstøy	42
3.3	Posisjonsbestemmelse	44
3.3.1	Differensiell/Relativ posisjonsbestemmelse	46
3.3.2	Absolutt posisjonsbestemmelse	48
3.4	Precise Point Positioning	49
3.4.1	IGS	50
3.4.2	PPP vs. Differensiell/Relativ posisjonsbestemmelse	51
3.5	RINEX	54
3.6	GNSS - Øvrige system	55
4	Forsøksdesign	57
4.1	PPP ved degraderte forhold	57
4.2	PPP vs. DGPS	59

5	Datainnsamling	61
5.1	Arbeidsområde og planlegging	61
5.2	Utstyr	63
5.2.1	Referanseutstyr	63
5.2.2	Annet utstyr	63
5.3	Måling	64
5.4	Etterprosessering	66
5.4.1	PPP-data	66
5.4.2	RTK-data	68
5.5	Problemer/utfordringer	69
5.6	Forventninger	70
6	Resultat	71
6.1	PPP ved degraderte forhold	71
6.1.1	Nøyaktighet	79
6.1.2	Initialiseringstid	84
6.1.3	TerraPos vs. CSRS	90
6.2	PPP vs. DGPS	95
7	Diskusjon	97
7.1	PPP ved degraderte forhold	97
7.1.1	Nøyaktighet	98
7.1.2	Initialiseringstid	99
7.1.3	TerraPos vs. CSRS	101
7.2	PPP vs. DGPS	101
7.2.1	Arbeid med datainnsamling	102
7.2.2	Initialiseringstid	103
7.3	Potensielle utvidelser og videre analyse	104
8	Konklusjon	107
A	Produktspesifikasjoner	109
B	Punktbeskrivelse	113
B.1	PPP1/B - 8. November 2013	114
B.2	PPP2/D - 8. November 2013	115
B.3	PPP3/C - 8. November 2013	116
B.4	PPP4/A - 8. November 2013	117

Kapittel 1

Innledning

1.1 Historie

På slutten av 80-tallet uttrykte det amerikanske militæret bekymring rundt det globale posisjoneringssystemet GPS' tilgjengelighet til sivile verden over, og i mars 1990 ble Selective availability (SA) introdusert. Til tross for forespørsler fra det amerikanske flydirektoratet (Federal aviation administration), det amerikanske kystforsvaret (U.S Coast guard) og det amerikanske transportdepartementet (U.S department of transportation), ble denne ekstra feilkilden tillagt GPS-signalet [Wikipedia, April 2014]. I lys av denne innføringen ble utviklingen og introduksjonen av differensiell GPS startet. Differensiell GPS er i dag den ledende teknikken innen landmålingsbransjer, mest på grunn av dets globalitet, simplisitet og muligheten til å få svært effektive målesesjoner ved centimeters nøyaktighet i sanntid (RTK). Selv om DGPS i dag er og har vært den styrende teknikken for høynøyaktighetsmålinger i sanntid, er den ikke uten mangler (avsnitt 3.4.2).

Etter at President Bill Clinton i mai 2000 bestemte seg for å fjerne feilbidraget fra SA, var det nå igjen mulig å gjøre målinger fra enkeltmottakere med akseptable nøyaktighetsmål. Hovedproblemet med målinger gjort med enkeltmottakere er klokkefeil og signalforplantning (avsnitt 3.2). Dette gjør at en i dag ikke får bedre nøyaktighet (2σ) enn 3-5meter i grunnriss og 6-10meter i høyde. Som et svar på dette, og etter et stadig økende ønske for sivile om å produsere målinger ned på under meter-nivå uten å måtte koble seg opp mot en annen stasjon, startet utvik-

lingen av teknikken “Precise point positioning”. Precise point positioning (PPP) er en metode som ved hjelp av banedata, satellittklokkekorreksjoner og mottakerklokkekorreksjoner etterprosesserer en enkeltmottakers måledata ned på cm-nivå. Ved to-frekvnte mottakere elimineres ionosfæren gjennom lineærkombinasjoner og ved enkeltfrekvenser benyttes modeller for å redusere effektene fra atmosfæren på best mulig vis (avsnitt 3.2.3).

1.2 Motivasjon

I dag er PPP en velfungerende måleteknikk, med flere nettbaserte programvarer for etterprosessering av data [Vadder, 2012]. Korrigeringsdata hentes fra bl.a IGS (International GNSS Service) gjennom programvarer eller manuelt. Tidligere er det bevist at en gjennom klokke -og banekorreksjoner av måledata kan oppnå nøyaktighet ned på centimeternivå for statiske observasjonssesjoner over lengre perioder [Ovstedal et al., 2006]. Dog denne teknikken er godt testet med hensyn på initialiseringstid og nøyaktighet, statisk og kinematisk, er det stort sett gjort målinger over åpne områder. [Ovstedal et al., 2001] sammenligner PPP med differensielle målinger under maritime forhold ved et havbunnskartleggingprosjekt i Vesterålen. Med en dobbeltfrekvent mottaker eliminerte de ionosfæreeffekten og kom fram til en horisontal nøyaktighet på 0.2 meter. [Næsset and Gjevestad, 2008] undersøker PPPs potensiale i barskog med total observasjonsperiode på 120minutt. Resultatet viste en nøyaktighet på mellom 0.27m - 0.88m over 19 spredte punkt.

Denne oppgaven vil teste PPPs yteevne under degraderte skogsforhold i perioder på opp mot 6 timer, samt teste hvordan teknikkens måleresultater mulig kan konkurrere mot dagens ledende landmålingsteknikk: Sanntids RTK.

Kapittel 2

Problemstilling

Med en stadig voksende trend for bruk av nettbaserte produkter for etterprosessing av klokkefeil og atmosfæreforhold for å gjøre GNSS målinger mer nøyaktig (PPP) vil denne oppgaven undersøke hvordan yteevnen til PPP teknikken er når måleforholdene blir gradvis dårligere, samt hvordan disse målingene gjør det opp mot dagens dominerende landmålingsteknikk: sanntids-RTK. For å kunne bestemme hvordan PPP fungerer ved ulike skogstettheter, samt sammenligne disse med differensiell RTK, er det viktig å undersøke en del kriterier.

Kvaliteten til Precise point positioning ved ulike skogstettheter vil bli vektlagt på bakgrunn av

- **Nøyaktighet**
- **Initialiseringstid.**

For å sammenligne yteevnen til Precise point positioning mot differensiell RTK vektlegges

- **Arbeid med datainnsamling**
- **Initialiseringstid**

Kapittel 3

Teori

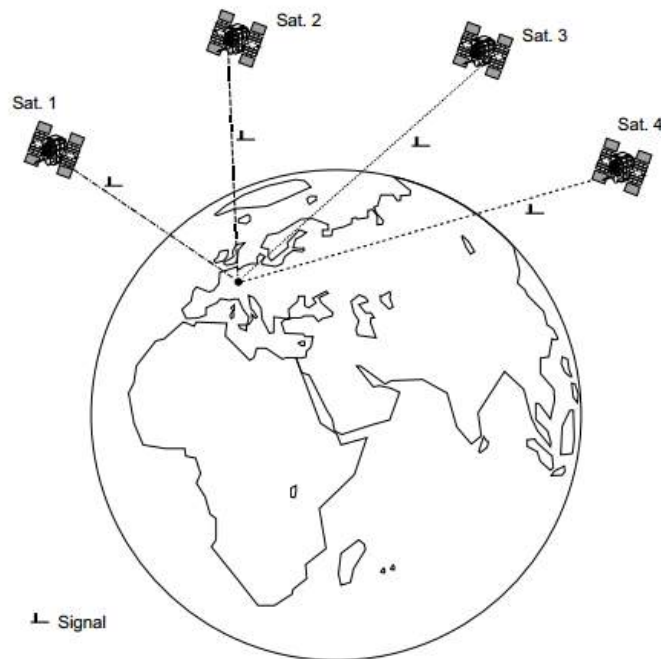
3.1 GPS

NAVSTAR GPS, bedre kjent som Navigation system with timing and ranging Global positioning system, ble gjennom ordre fra det amerikanske forsvarsdepartement utviklet av “the joint program office” (JPO) ved rom- og missilsenteret i El Segundo, California i 1973. Ordrene var å utvikle, teste, anskaffe og lansere et rombasert posisjoneringssystem [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Fordi utviklingen ble initiert av det amerikanske forsvarsdepartementet var satellittsystemet originalt tenkt for militære sammenhenger, med begrenset anvendelse for sivile brukere. Systemet skulle bestå av i alt 24 satellitter, fordelt på 6 baneplan 60° fra hverandre. Dette for å få en konstellasjon som tilfredstilte kravet om minst fire synlige satellitter i horisonten, hvor som helst på kloden, 24 timer i døgnet. Videre skulle satellittene gå i en MEO(Medium Earth Orbit) høyde på 20200km, og med en inklinasjonsvinkel (baneplansvinkel mhp ekvatorplanet) på 63° (blokk I). Med overgangen til den neste generasjonen endte GPS systemet med en inklinasjonsvinkel på 55° . Systemets første testsatellitt ble lansert i 1978, og i 1995 var GPS ved FOC(Full operasjonell status). Det sivile systemet ble gitt ved en Coarse/Acquisition-kode (C/A-kode) og det militære med en kryptert presisjonskode (P-kode)(se avsnitt 3.1.1). Fram til 2. mai 2000 var det sivile systemet påvirket av en såkalt SA (Selectiv availability), en teknikk som degraderte GPS signal ved å legge til kontrollerte feilbudjsett i måledata, dette var enten efemeridedatamanipulasjon (ϵ teknikken) eller en sys-

tematisk destabilisering av satellittklokkene (δ teknikken)[Seeber, 2003]. Satellitt-basert stedfesting har over tid blitt en essensiell metode i landmålingsindustrien. Dels for dens brukervennlighet og etterhvert intuitive innmålingsegenskaper, men mest av alt for dens evne til å måle alt direkte inn i et globalt system med høy nøyaktighet og med massive kostbesparende funksjoner som frakt av utstyr og koordinattransformasjoner. Prinsippet bak GPS som måleteknikk er ganske enkel. Satellitter i kjente posisjoner sender et signal som videre mottas i en mottaker, på fagspråket kalt one-way ranging system (en-veis kommunikasjonsystem). Tiden det tar for signalet å forlate satellitten til å komme fram til mottakeren, multiplisert med signalets hastighet (lyshastigheten) utgjør distansen mellom satellitt og mottaker og gjør derfor at vi kan beregne mottakers posisjon. Det er dog slik at klokken som ligger i satellitten ikke er synkronisert med klokken som ligger i mottakeren. Fordi avstandene som beregnes er svært avhengig av tid, vil de enten bli for lange eller for korte, avhengig av feilen som oppstår. Slike avstander benevnes derfor pseudoavstander, og en trenger i alt kontakt med fire satellitter (figur 3.1) for å løse de fire ukjente komponentene X, Y, Z og mottakerklokkefeilen (satellittklokken er kjent).

3.1.1 Romsegmentet

Som nevnt var den grunnleggende idéen en konstellasjon av i alt 24 satellitter spredt over 6 baneplan. I perioden 1978 - 1985 ble i alt 11 Block I satellitter, kalt NAVSTAR 1 - NAVSTAR 11, skutt opp. Disse var prøvesatellitter spredt over to baneplan med en inklinaison på 63° . Neste generasjon satellitter, Block II, ble for første gang skutt opp i Februar 1989 (i alt 9 stykk totalt). Allerede i November samme år ble en modifisert utgave, Block IIa, lansert. Block II og Block IIa var satellittene som etterhvert sto for det fullstendige operasjonelle systemet i 1995. Det skulle ta noen år før neste generasjon satellitter kom på banen. Dette var de såkalte Block IIR - Replenishment satellittene, først skutt opp i juli 1997. Disse satellittene hadde bl.a en egenskap kalt autonav som gjorde det mulig for satellittene å generere sin egen navigasjonsmelding og lagre disse for en periode på opp til 180 dager. [Seeber, 2003]. I 2004 kom oppgraderingen, Block IIR-M, som inkluderte et nytt sivilt signal:L2C. I 2010 kom en ny type satellitt på banen,



Figur 3.1: Fire satellitter er nødvendig for å bestemme en posisjon i 3-dimensjonale rom [ublox, 2009]

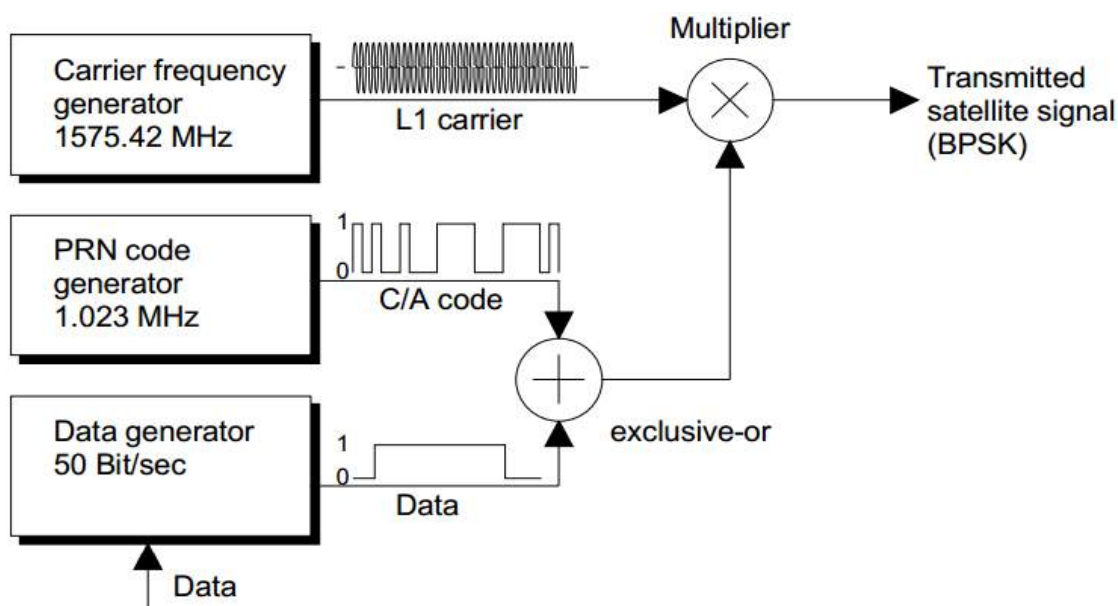
Block IIF, som gav et tredje sivil signal L5 på 5^{te} frekvensen. Block IIF kom også med forbedrede atomklokker som igjen betydde bedre nøyaktighet, signalstyrke og kvalitet [GPS.gov, Februar, 2014c]. Per dags dato har vi en kombinasjon av alle romsegmentene, fra Block II til Block IIF, alle gitt med hvert sitt SVN (Space vehicle number), PRN (pseudo random noise) og satellittklokker av enten cesium (CS) eller rubidium (RB) (se tabell 3.1).

Signalstruktur

Signalet som sendes fra satellitt til mottaker går gjennom flere faser fra den genereres til den er mottatt. Informasjonen, herunder navigasjonsmeldingen, genereres i satellitten med en rate på 50 bits per sekund og har en sendetid på i alt 12 min og 30 sekund. Meldingen inneholder satellittid, synkroniseringssignal, presise banedata, tidskorreksjon for satellittid, almanak, korreksjonssignal for å kalkulere omløpstid, ionosfæredata og informasjon om satellittens helse [ublox, 2009]. Satellittene sender signalene basert på det en kaller for fundamentalfrekvensen,

Tabell 3.1: Satellittkonstellasjonsstatus pr. 13/05-14, [of Homeland Security, Februar, 2014]

Plane	Slot	SVN	PRN	Block-Type	Clock	Outage Date
A	1	65	24	IIF	CS	
A	2	52	31	IIR-M	RB	
A	3	38	8	IIA	CS	
A	4	48	7	IIR-M	RB	
A	5	39	9	IIA	CS	16 MAY 2014
A	6	64	30	IIF	RB	
B	1	56	16	IIR	RB	04.feb.14
B	2	62	25	IIF	RB	
B	3	44	28	IIR	RB	
B	4	58	12	IIR-M	RB	
C	1	57	29	IIR-M	RB	
C	2	66	27	IIF	RB	
C	3	59	19	IIR	RB	
C	4	53	17	IIR-M	RB	
C	5	33	3	IIA	CS	
D	1	61	2	IIR	RB	
D	2	63	1	IIF	RB	
D	3	45	21	IIR	RB	
D	4	34	4	IIA	RB	
D	5	46	11	IIR	RB	
E	1	51	20	IIR	RB	
E	2	47	22	IIR	RB	
E	3	50	5	IIR-M	RB	
E	4	54	18	IIR	RB	
E	5	23	32	IIA	RB	
E	6	40	10	IIA	CS	
F	1	41	14	IIR	RB	
F	2	55	15	IIR-M	RB	
F	3	43	13	IIR	RB	
F	4	60	23	IIR	RB	
F	5	26	26	IIA	RB	



Figur 3.2: Signalstruktur for et GPS signal generert med L1 frekvens [ublox, 2009]

10.23MHz. Frekvensen genereres av atomurene som er plassert i satellitten, enten av typen rubidium eller cesium. Det som f.eks skiller frekvenstypene til L1 og L2 frekvensene er en multiplikator, for L1 er denne 154 og for L2 er denne 120, noe som gir de utgående satellittsignalene frekvenser på henholdsvis:

$$L1 : 154 \times 10.23MHz = 1575.42MHz$$

$$L2 : 120 \times 10.23MHz = 1227.60MHz$$

[Seeber, 2003]. C/A-koden og navigasjonsmeldingen blir slått sammen gjennom en såkalt modulo 2 addisjon. Denne dataen går så videre inn i en BPSK (Binary phase shift keying) modulator som sørger for å slå sammen dataen med den genererte bærebølgen (L1, L2 eller L5) og legge til et 0/180°faseskifte for hver datastrøm av enten 0 eller 1 (se figur 3.2). Fordi alle GPS satellittene lager og gir ut signal på samme frekvenser, er en nødt til å skille disse fra hverandre. Dette gjøres ved å tillegge hver satellitt sitt eget indentifikasjonsnummer. Dette er den tidligere nevnte PRN-koden. Den sivile C/A-koden er en 1.023 bit lang streng av 1023 enere og nullere som repeterer seg hvert millisekund. I tillegg til å identifisere

satellitten som sender signalet som mottas i mottakeren fungerer også PRN-koden som et mål på signalets gangtid. Gangtiden beregnes ved at en PRN-kode dannes i mottakeren i det målingen starter. Når den identiske koden mottas fra satellitten er tidsintervallet nevnte gangtid. Ut fra gangtiden beregnes pseudoavstandene.

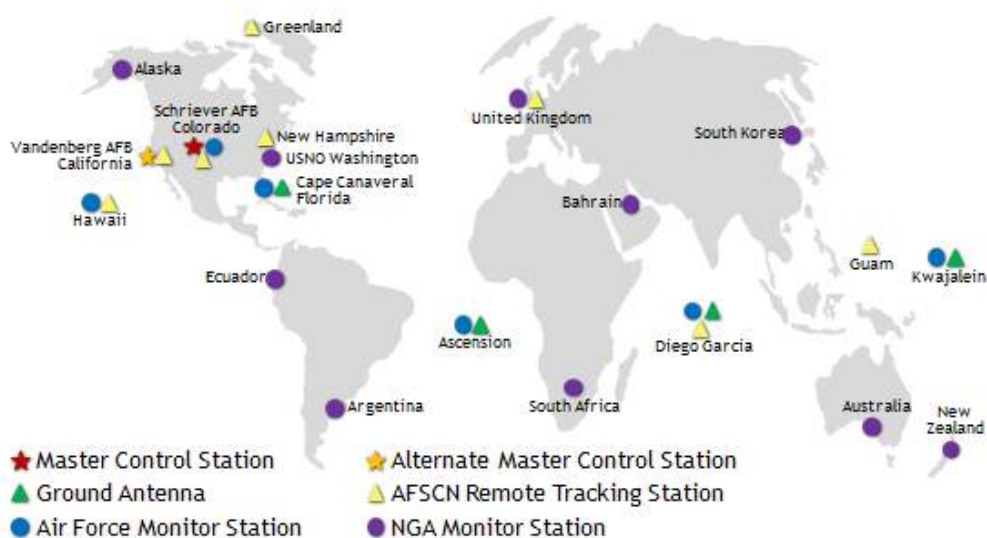
GPS III

Som en del av en satsning mot et mer sivilt system og en ny og videreutviklet posisjoneringstjeneste kunngjorde den amerikanske kongressen i år 2000 at den tredje blokken med GPS satellitter skulle bygges. Den 15 mai 2008 fikk Lockheed Martin kontrakten og ansvaret for utbygningen av den nye generasjonen GPS. Ledet av det globale posisjoneringssystemdirektoratet ved det amerikanske luftforsvar- og missilsystemsentret bygges det i skrivende stund fire satellitter av i alt åtte. Totalt planlegger det amerikanske luftforsvaret å bygge 32 blokk 3 satellitter [Martin, Mai, 2012]. Med GPS III systemet kommer flere forbedringer, den viktigste av dem er kanskje innføringen av det sivile L1C signalet. L1C signalet lages for å skape det en kaller for internasjonal interoperabilitet [GPS.gov, Februar, 2014b], dette innebærer at signalet er designet for å være operatibelt med andre GNSS som bl.a Galileo og Quazi-Zenith Satellite system. Fordi L1C signalet vil være ment for sivilt bruk, vil dette bety at amerikanernes mulighet til å innføre tidligere nevnte selective availability, ikke vil være tilstede. L1C må på ingen måte forveksles med L1 C/A. Hvor L1 C/A var det militært kontrollerte signalet, vil L1C være det sivile, kommersielle signalet som tar over for L1. Dette innebærer bl.a at L1C vil bli gitt ut på den gamle f1 frekvensen, samtidig som det vil være kompatibel bakover i tid. Fordi GPS III, i likhet med blokk IIF, vil levere L5 signal (fortsatt på samme f5 - frekvens) er idéen framover at en med en konstellasjon av satellitter som leverer signal på tre sivile frekvenser (les: L1 C/A, L2C og L5) kan bedre nøyaktigheten (via ionosfærekorreksjon) og robustheten. Innføringen av en mer kommersiell blokk III var tilsynelatende et svært omdiskutert tema i amerikansk forsvarspolitik, og kom i følge mange som et svar på europeernes pågående utvikling av det sivile posisjoneringssystemet Galileo. Dette er nærmere forklart av bl.a [Lewis, Juni, 2004]. Det amerikanske luftforsvaret går fram og lover en forbedret nøyaktighet, en forbedret anti-jam funksjon (for å hindre forstyrning av signalet),

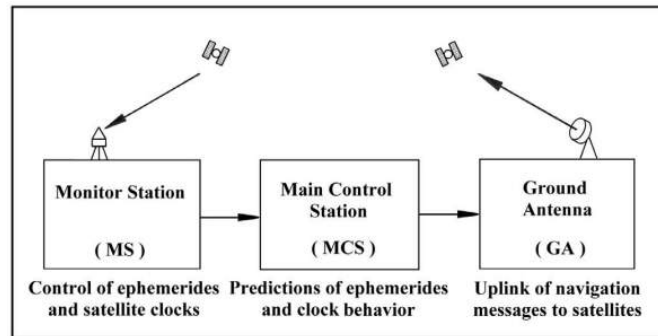
videreføring av allerede eksisterende signal og tre rubidiumklokker for å opprettholde 15 års beregnet levetid/pålitelighet[Force, November,2012].

3.1.2 Kontrollsegmentet

GPS' kontrollsegment består av en hovedkontrollstasjon i Colorado, en alternativ hovedkontrollstasjon, 16 monitoreringsstasjoner og 12 kontroll-og kommandoantennener som sender informasjon tilbake til satellittene. Dette utgjør et globalt nettverk av bakkebaserte fasiliteter spredt over hele kloden [GPS.gov, Februar,2014a](se figur 3.3). Monitoreringsstasjonene mottar alle signaler sendt fra satellittene. Ved hjelp av disse observeres pseudoavstander som sammen med meteorologiske data sendes til hovedkontrollstasjonen i Colorado. Hovedkontrollstasjonen beregner så satellittefemeridene, predikerer satellittklokkenes oppførsel/forutser deres gange og navigasjonsmeldingen produseres. Kontrollsegmentets oppgaver innebærer også å synkronisere ombordtiden til satellittene sågar som videresende omtrentlige banedata for alle satellittene(almanakk) og annen informasjon som sa-



Figur 3.3: Kontrollsegmentets fasiliteter spredt over hele kloden [GPS.gov, Februar,2014a]



Figur 3.4: Dataflyten i beregningen av kringkastede efemerider [Seeber, 2003]

tellittenes tilstand/helse [ublox, 2009]. I det all informasjon er beregnet og innhentet sendes dette videre til bakkeantennene som via et S-bånd sender informasjonen tilbake til satellittene. Figur 3.4 viser en skjematisk beskrivelse av kontrollsegmentets oppgave med å kontrollere og observere satellittenes bevegelse og beregning av banadata (efemeridene).

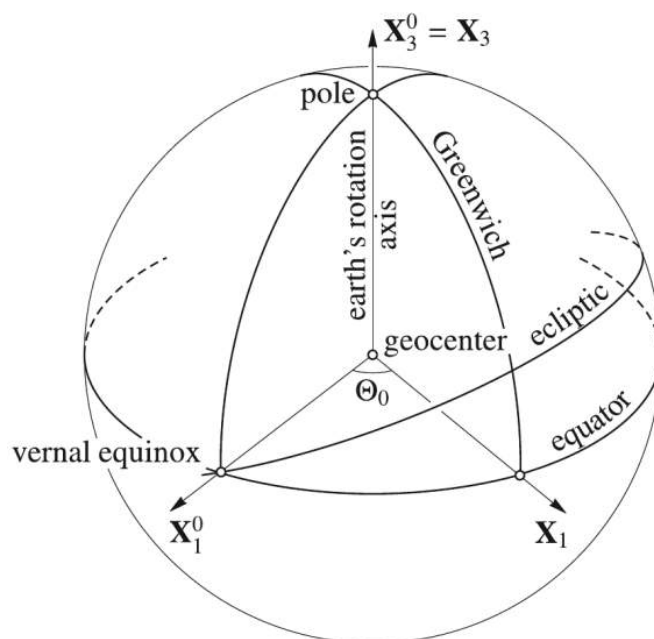
Tidsbegrepet i GPS

Kontrollsegmentet beregner som nevnt koordinater til satellitter på bakgrunn av målinger(avstander) mellom satellittene og kontrollstasjoner med kjente koordinater. I denne målingen spiller tid en avgjørende rolle av den enkle grunnen at $\text{avstand} = \text{gangtid} \times \text{lyshastigheten}$. Det er derfor viktig å tidmerke alle målinger som bli gjort, og samtidig beregne satellittkoordinater ved riktig tidspunkt. Spørsmålet mange spør seg så er: hva er egentlig tid? Og hvordan beregnes dette i GPS sammenheng? Historisk ble dagen delt inn i 24 timer, en time består av 60 minutter som igjen deles inn i 60 sekunder hvor videre inndeling foregikk i tideler. Dette utgjorde i alt 86400 sekund, en måleenhet som i all hovedsak baserte seg på en midlere soltid. Det viste seg dog senere at dette ikke skulle holde mål fordi jordas rotasjon ikke var konstant. For å definere dette på en bedre måte valgte de i 1960 ved den elvte generalkonferansen for mål og vekt (CGPM - Fransk: Conférence générale des poids et mesures) å basere sekundet på en definisjon gitt av den internasjonale astronomiske union med sekundet lik: $1/31556925.9747$ av det tropiske året 1900. I det definisjonen var satt var allerede en mer nøyaktig måling av tid i gang basert på overgangen mellom to energinivå i et atom eller molekyl, og

ved den trettende CGPM i 1967 ble sekundet endelig definert som varigheten av 9 192 631 770 perioder av strålingen som svarer til overgangen mellom de to hyperfine nivåene av grunntilstanden til cesium-133-atomet ved 0 Kelvin [des Poids et Mesures, 2006]. Med denne ekstremt nøyaktige måten å måle tid på, kommer også en liten komplikasjon. På grunn av månens gravitasjonskraft senkes nemlig farten på jordens rotasjon. Dette gjør at lengden på den midlere soldagen har økt med 2 millisekund siden den ved atomtidens innføring ble satt. Dette gjør at den faktiske, fysiske dagen er 86400,002 sekund mot den standardiserte 86400 sekund lange dagen vi kjenner. Dette har ført til innføringen av skuddsekund, et ekstra tillagt sekund som skal sørge for at verdens atomklokker stilles etter jordens rotasjon. Internasjonal atomtid (TAI) er en statistisk atomtid basert på atomklokker (som er styrt etter tidligere nevnte cesium atom) på laboratorium spredt rundt verden over, styrt av det internasjonale byrå for mål og vekt. For at klokkeslettet i atomurene og dagen ute skal være lik, innføres UTC (Coordinated Universal Time), en tidsregning hvor TAI er tillagt skuddsekund. I skrivende stund er det i alt lagt til 25 sekund siden dette ble innført i 1972. Den universtille tiden (UT) er bestemt av UT1(jordas rotasjon - ikke lineær pga bl.a presesjon og nutasjon) og UTC, hvor det ved en større forskjell enn 0.9 sekund blir lagt til ett skuddsekund. GPS' epoke er den 6. Januar 1980, og er synkronisert med UTC ved det tidspunktet. GPS bruker ikke skuddsekund, men følger UTC slik den var satt ved 1980 [Observatory, 2014].

Aktuelle referanserammer og koordinatsystem

Jorden er en dynamisk planet, både mhp dens rotasjon rundt egen akse, bane rundt solen og den totale rotasjonen vårt solsystem har i vår galakse Melkeveien. For å kunne beskrive den lille blå planeten er vi først og fremst nødt til å opparbeide oss et system en kan måle i. Referansesystem er et sett matematiske komponenter og veldefinerte konvensjoner. Referansesystemene kommer i mange ulike teorier: Lengdegrader og breddegrader, kartesiske, tredimensjonale X-, Y- og Z-akser og polarkoordinater m.m. For global benyttelse som f.eks ved satellittgeodesi er det naturlig med et ekvatorialt koordinatsystem. Med dette menes et system hvor Jorden blir målt etter tre akser spendt ut fra origo som plasseres i senter av jordkloden. Det finnes både romfaste og jordfaste system (se figur 3.5),



Figur 3.5: Ekvatoriale koordinatsystem hvor $X_1 - X_3$ er jordfaste akser og $X_1^0 - X_3^0$ er romfaste akser [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]

det romfaste hvor aksene står i ro relativt et inertialsystem med X-aksen pekende mot vårgjevndøgns punktet der det ekliptiske planet (baneplanet for planetene i vårt solsystem, relativt solen) skjærer ekvatorplanet (planet som står normalt på jordens rotasjonsakse), Y-aksen normalt på denne, og Z-aksen sammenfaller med jordens midlere rotasjonsakse. Det jordfaste systemet er et dynamisk koordinatsystem hvor aksene roterer i takt med jordrotasjonen. Dette er et system basert på at X-aksen peker der greenwich-meridianen, også kalt null-meridianen, skjærer ekvatorplanet, Y-aksen står normalt å denne, og Z-aksen sammenfaller med jordens midlere rotasjonsakse.

ITRS (International terrestrial reference system) er et verdensomspennende referansesystem som roterer med jorden og dens bevegelser i verdensrommet. IERS (International Earth rotation and reference systems service) bestyrer og videreformidler ITRS til det astronomiske, geodetiske og geofysiske vitenskapsamfunn [ITRF, Mai, 2012]. Med et ITRS til grunn kan en så realisere referanserammer, altså en reell modell og et rammeverk for hvordan jorden vår ser ut. Referanserammer er modeller som på best mulig måte skal beskrive et objekt. Jordens re-

feranseramme er beskrevet gjennom det som offisielt kalles ITRF (International terrestrial reference frames). ITRF er en referanseramme som realiseres gjennom kombinasjoner av satellittgeodetiske teknikker som VLBI (Very Long baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Ranging), LLR (Lunar Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) og GPS. For et dypere innblikk i disse teknikkene anbefales [Hofmann-Wellenhof et al., 2007] og [Seeber, 2003]. ITRF benyttes daglig til å beregne platetektonikk, loadingeffekter og til å beregne jordens rotasjon i verdensrommet [ITRF, Mai, 2012]. Fordi ITRF er en global representasjon, og fordi jorden er i konstant forandring, må modellen oppdateres når avviket til nye innmålinger blir for stor. Siden 1988 har i alt 12 realiseringer blitt satt opp, med ITRF2008 som den nyeste. Norges offisielle koordinatsystem, Euref89, er basert på ITRF 1989 ved epoke 1.1.1989 og avviker dagens ITRF2008 ramme med omlag 0.3 meter. Euref89 baserer seg for øvrig på den Eurasiatiske tektoniske platen [Karverket, Februar, 2013].

Til tross for den internasjonale, veldefinerte ITRF, leverer det amerikanske GPS systemet sine kringkastede efemerider etter WGS84. WGS, eller World geodetic system, ble først utviklet i 1950-årene (WGS60) gjennom et samarbeid mellom det amerikanske forsvarsdepartementet og forskere fra andre institusjoner og land. Videreutviklingen av versjonene WGS66, WGS72 og til slutt WGS84 gjorde at referansesystemet ble viktig for bl. a GPS og Transit doppler, og er en av grunnene til systemets viktighet i dag [Seeber, 2003]. WGS84 benyttet originalt GRS80 ellipsoiden, men har senere blitt oppdatert og utviklet. Ellipsoidens parametere er bestemt av store halvakse (radius ved ekvator), lille halvakse (radius ved polene), flatttrykning, jordens vinkelhastighet (rotasjon) og geosentrisk gravitasjonskonstant. Fordi systemet refererer til ellipsoiden er GPS koordinatene i utgangspunktet gitt med ellipsoidiske høyder, og en må derfor påføre globale eller regionale høydemodeller for å få fram orthometrisk høyde.

3.1.3 Brukersegmentet

Brukersegmentets oppgave er å transformere produktene (signalene) som leveres, til tjenester som brukeren er interessert i. Det er altså snakk om mottakerteknologi. Som nevnt i avsnitt 3.1.1 vil en med fremtidens teknologi måtte designe mottakere

som har kapasitet til å ta imot signaler fra alle frekvenser/modulasjoner som blir levert. I dag kan en klassifisere GPS-mottakerne inn i tre ulike grupper, de som kan ta imot h.h.v C/A-kode, P-koden og Y-koden (krypteringen av P-koden). Vi har allerede satellitter av typen blokk IIF som leverer frekvensen f_5 , både med en allmenn sivil komponent og nødfrekvensen SoL (Safety of Life). I tillegg har en nytte av å motta posisjoneringssignal fra andre globale satellittsystem som det Russiske GNSS systemet GLONASS, det fremtidige europeiske Galileo og det Kinesernes Beidou (se avsnitt 3.6). I dag er anvendelsen av GLONASS-satellitter i en måleprosess relativt vanlig. Det tar signalet omtrent 67 millisekund å nå en mottaker. Som nevnt skapes det en kode i mottakeren tilsvarende den som ble sendt fra satellitten, disse sammenlignes og synkroniseres. En Δt beregnes, og tilsvarende tidsforskjellen fra de forskjellige satellittene som brukes ned til mottaker og en beregner pseudoavstandene til satellittene. For å synkronisere signaler sammenligner mottakeren det innkommende signalet med alle signalene som ligger lagret i mottakeren. Sammenligningen skjer som følger av en forskyvning i kode (en vet ikke hvilken satellitt sitt signal som kommer inn) og med tanke på frekvensforskyvning på opp til $\pm 6\text{kHz}$ som skjer pga dopplereffekten [ublox, 2009].

3.2 Feilbudsjett og korreksjoner

Satellittnavigasjon utgjør i dag flere veldrevne system med klare definisjoner og konvensjoner. Det er allikevel slik at matematiske modeller ikke fanger opp alle fysiske effekter, og en må derfor ta høyde for disse avhengig av situasjonen en er i. Dynamiske, til dels uregelmessige effekter er til stede som følger av det. I dag har vi som nevnt i avsnitt 3.1.2 et referansesystem basert på koordinataksler fiksert på definerte punkt på jordkloden, et såkalt ECEF (Earth Centered Earth Fixed) system. Virkeligheten er at dette koordinatsystemet er påvirket av en egen jordrotasjon, en presesjon, nutasjon, en bane rundt solen, som igjen går i bane rundt melkeveien. Newtonisk mekanikk har også vist seg å bli for enkelt som følger av relativistiske effekter (avsnitt 3.2.2), samt signalforplantning.

3.2.1 Jordrotasjon

Jorden roterer rundt sin egen akse på ≈ 86400 sekund (avsnitt 3.1.2). Tar en utgangspunkt i et punkt på ekvator med en jordradius på $r_E = 6370$ km, som igjen gir en jordomkrets på $2 \times \pi \times r_E \approx 40024$ km, roterer dette punktet med en hastighet på $\frac{40024\text{km}}{24\text{timer}} = 1668\text{km}/t (\approx 463\text{m}/s)$ relativt jordsenteret. Dette medfører at en har en rotasjon på mottakerkoordinatene, samt en rotasjon på satellittkoordinatene. Gitt at det tar signalet 67ms å nå mottakeren fra satellitten, vil jorden under ha rotert $0.067s \times 463\text{m}/s = 31\text{m}$ (mottakerkoordinaten). Denne effekten avtar med absolutt høyere breddegrad (\pm), og er teoretisk = 0 ved polene/rotasjonsaksens skjæringspunkt. Ved våre breddegrader ($55 - 70$ nord) er effekten nærmest halvert ($r_{60} = r_E \times \cos 60$). For beregning av satellittkoordinater er jordrotasjonen mye større. Her vil scenariot være det samme, bare med en radius på $r_S = 26570$ km. Radiusen tilsvarer den totale distansen fra jordsenteret til en satellitt. Dette gir igjen en baneomkrets (gjenspeiler jordens rotasjon og ikke satellittens elliptiske bane rundt jorden) på $2 \times \pi \times r_S \approx 166944$ km, en rotasjons-hastighet på $\frac{166944\text{km}}{24\text{timer}} = 6956\text{km}/t (\approx 1932\text{m}/s)$ relativt jordsenteret. Rotasjonen påvirker da satellittkoordinatene med omlag $0.067s \times 1932\text{m}/s \approx 129\text{m}$, gitt en satellitt ved ekvator normalt på jordens midlere rotasjonsakse.

3.2.2 Relativistiske effekter

Som nevnt i innledningen til delkapittelet må en ta høyde for relativistiske effekter som følger av at en gjør beregninger i et system der slike forstyrrelser inngår. Både med tanke på satellittbaneberegning, satellittsignalforplantning og mottaker - og satellittklokkekorreksjon. Den relativistiske effekten i satellittens bane er forårsaket av jordas gravitasjonsfelt på satellitten. Feltet skaper en ekstra forstyrrende akselerasjon som numerisk tilsvarer $3 \times 10^{-10} \text{ms}^{-2}$ [Zhu and Groten, 1988]. Beskrevet av [Hofmann-Wellenhof et al., 2007] vil det på grunn av jordens gravitasjonsfelt oppstå en rom-tid kurvatur av satellittsignalet. Denne avbøyningen forårsaker en forlengelse i satellittsignalets vei, dog på ikke mer enn 10-20mm forutsatt maksimal distanse ($r_E = 6370$ km og $h = 20000$ km). Klokken i satellitten blir også utsatt for en relativistisk effekt. Denne gjennom en frekvensforandring som følger av satellittens høye hastighet og dens forskjell i gravitasjonsfelt relativt mottakeren. Fordi en

vil motta signal på den gitte fundamentalfrekvensen 10.23MHz, løses frekvensforandringsproblemet med å tillegge satellittklokken et lite avvik, noe som i realiteten betyr at signalet faktisk sendes på 10,22999999543MHz (avvik på -4.464×10^{-10}). Avviket beskriver en midlere effekt, og baserer seg på satellitter i sirkulær bane. Fordi satellittene beveger seg i elliptiske baner, varierer denne effekten også med tid, og det kreves derfor et ekstra korreksjonsledd for dette. Mottakerklokken, som ligger på jordens overflate, er også i bevegelse relativt jordsenteret (avsnitt 3.2.1), og er derfor også offer for et frekvensskifte. Dette frekvensskiftet er i størrelsesorden $10^{-12} Hz$ som etter tre timer tilsvarer 10 nanosekund ($10ns = 30cm$) [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Videre er mottakerklokken påvirket av det en kaller for Sagnac effekten, også referert til som jordrotasjonskorreksjon og er beskrevet i [Conley et al., 2006]. Relativistiske effekter i GNSS sammenheng er, som oftest, mindre enn observasjonsnøyaktigheten [Seeber, 2003] og kan elimineres med differensiell måling eller modelleres gjennom andre parametre.

3.2.3 Signalforplantning

GPS-teknologien er i dag basert på tid, som igjen utleder avstander. Signalet som sendes fra en satellitt til en mottaker tidsstemples, endten gjennom en ren tidsberegning i form av kodemåling, eller gjennom en opptelling av antall bølger i en fasemåling. Forholdet mellom bølgelengde λ , frekvens f og forplantningshastighet v er gitt som

$$v = \lambda \times f \tag{3.1}$$

hvor λ er gitt i meter, f i Hz og v i m/s. I vakum er denne ligningen ideell, men i GPS sammenheng går GPS-signalet gjennom atmosfæriske regioner som varierer med tiden og som skaper forstyrrelser. I sammenheng med signalforplantning deler vi atmosfæren inn i to regioner, Ionosfæren og Troposfæren (figur 3.6). Effekten disse skaper kan i mange tilfeller være mye større enn den nøyaktigheten som kreves, og må derfor elimineres gjennom måling eller modellering. Bølgelengder er elektromagnetiske bølger, noe som betyr at deres hastighet avhenger av hvilket medium de beveger seg i. For vakum er hastigheten definert som lyshastigheten

Altitude [km]	Temperature	Ionisation	Magnetic field	Propagation	Technical
100 000	Thermo - sphere	Proto - sphere	Magneto - sphere	Iono - sphere	Upper Atmo - sphere
10 000					
1 000		Iono - sphere			
100	Mesosphere	Neutro - sphere	Dynamo - sphere	Tropo - sphere	Lower Atmo - sphere
10	Stratosphere				
	Troposphere				

Figur 3.6: Atmosfærens oppdeling i henhold til ulike fenomen, for signalforplantning har en ionosfæren og troposfæren [Seeber, 2003]

gitt

$$c = \frac{\lambda_{vakum}}{P} = f \lambda_{vakum} = \frac{\omega}{k_{vakum}} \quad (3.2)$$

hvor λ_{vakum} er bølgelengden i vakum, P er perioden, f er frekvensen, ω er vinkelrekvensen og k_{vakum} er fasekonstanten i vakum [Seeber, 2003]. For alle andre medier enn vakum må en tilregne en signalhastighet basert på en refraksjonsindeks n

$$n = \frac{c}{v} \quad (3.3)$$

som for vann er 1.33 [Tipler and Mosca, 2007]. Fordi denne verdien ofte kan være veldig nær 1, benyttes refraktivitet N

$$N = (n - 1) \times 10^6 \quad (3.4)$$

. Et medium hvor forplantningshastigheten til elektromagnetiske bølger avhenger av frekvens er kalt et dispersivt medium. I dispersive medium har en ulike forplantningshastigheter for sinusbølger (fase) og grupper av bølger (flere bølger som mottas samtidig). Disse hastighetene har fått navnene fasehastighet (phase velocity) v_p og gruppehastighet v_g . I GPS sammenheng blir kodemålinger beregnet mhp på gruppehastigheten v_g , mens uavhengige bølger med uniforme bølgelengder (fasemåling) beregnes mhp fasehastigheten v_p . Ionosfæren er et dispersivt medium, noe som faktisk betyr at fasehastigheten i dette mediumet kan overgå vakumhas-

Elevation angle	90°	20°	15°	10°	5°
Δs_d	2.31	6.71	8.81	12.90	23.61
Δs_w	0.20	0.58	0.77	1.14	2.21
Δs_T	2.51	7.29	9.58	14.04	25.82

Figur 3.7: Troposfærisk påvirkning (tørr, våt og total påvirkning i meter) ved forskjellige elevasjonsvinkler [Seeber, 2003]

tigheten c [Seeber, 2003].

Troposfæriske effekter

Troposfæren er ikke et dispersivt medium, og påvirker ikke signalets hastighet mhp frekvens (L-båndet). Troposfæren er den væravhengige delen av atmosfæren og strekker seg fra 0 km - 40 km over bakkenivå. Mer enn 90% av den atmosfæriske massen ligger under 16km og nedover, 99% under 30km høyde [Lutgens and Tarbuck, 1998]. Til forskjell fra Ionosfæren er refraksjons-/lysbrytningsindeksen ikke avhengig av frekvensen gjennom troposfæren, men heller lufttrykk, temperatur, luftfuktighet og trykket til den tørre gassen i atmosfæren. Fordi disse elementene alle er væravhengig, og været er særdeles vanskelig å modellere, er det også vanskelig å modellere troposfæriske forhold i atmosfæren. Vil en beregne troposfæren regnes dette på bakgrunn av metrologiske parametre, hvor en deler troposfæren inn i to deler, en tørr del og en våt del. Forsinkelsen estimeres i senitretning og projiseres ned på den aktuelle vinkelen til satellitten. Ved senit er påvirkningen til troposfæren på i alt 2.5m (figur 3.7), hvor den tørre delen står for omlag 90% og den våte delen for omlag 10% av dette. De siste 10% i den våte delen er de vanskeligste å modellere. Påvirkningen på koordinatene viser seg å være størst i høyde, og liten i grunnriss, dette i all hovedsak fordi troposfæren tilsynelatende forsinker signalet. Den troposfæriske effekten reduseres best med modeller som f.eks Hopfields modell [Hopfield, 1969], men en kan ved presise anvendelser estimere tilleggsparemetere som f.eks zenit delay, benyttet bl.a i Saastamoinens modell [Saastamoinen, 1973] (dog det krever lang måletid).

Ionosfæriske effekter

Ionosfæren er den øvre delen av jordens atmosfære og strekker seg fra omlag 70 - 1000km over bakkenivå. Området defineres som den delen av atmosfæren hvor det er nok elektroner og ioner til å påvirke radiobølgers forplantning [Davies, 1990]. Ionosfæreaktiviteten er i all hovedsak forårsaket av solaktiviteten. Solen har en utstrålingssyklus på omtrent 11 år, og er mest dominant i det vi på den nordlige halvkule definerer som vintermånedene på grunn av jordens elliptiske bane rundt solen. I tillegg har vi en døgnvariasjon, hvor ionosfæreaktiviteten er langt større på dagen enn på natten. Som følger av at de magnetiske polene trekker på elektronene er ionosfæreaktiviteten i en enkelts måling også avhengig av geografisk lokasjon, hvor det er størst aktivitet/forstyrrelse ved høye breddegrader og ved ekvator (som følger av elektroner som blir dratt i begge retninger). Ionosfærens tilstand representeres ved elektrontettheten n_e , og påvirkningen den gjør på signalet er styrt av Total Electron Content (TEC) hvor

$$TEC = \int_S^R n_e(s) ds. \quad (3.5)$$

TEC er altså integralet som spenner om antallet elektroner som omkretser signalet på dets vei innenfor et areal på $1m^2$. Refraksjonsindeksen n for ionosfæren beregnes på bakgrunn av den utledede formelen

$$n = 1 - \frac{C \times n_e}{f^2} \quad (3.6)$$

, hvor C her er koeffisienten for alle konstante parametere [Seeber, 2003]. J.fr ligning 3.6 minker refraktiviteten med høyere frekvens. M.a.o vil en kunne oppnå en høyere nøyaktighet ved å sende signalet på en høyere frekvens. Samtidig vil en med høyere frekvens oppleve høyere teknologiske krav til målingen. Grunnen til at GPS valgte nettopp 1.2/1.6GHz var at de så det som den perfekte kombinasjonen mellom fordelene og ulempene ved frekvensvalg. Tabell 3.2 viser hvordan en ved dobbelfrekvenser nærmest kan eliminere den ionosfæriske effekter, samt hvordan en ved høyere frekvenser så og si gjør effekten neglisjérbar i forhold til nøyaktighetskravene vi har i dag. Gjennom første ordens ionosfærisk refraksjonskorreksjon

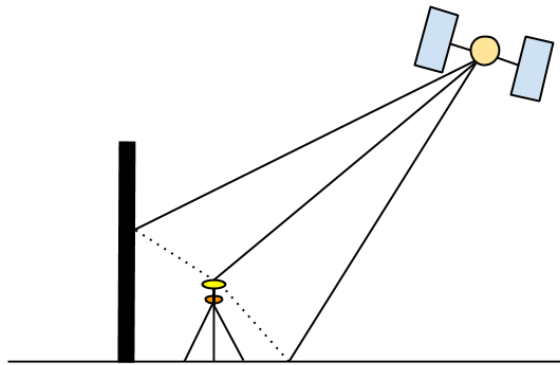
Tabell 3.2: Feilbidrag fra ionosfæren på signalene ved enkelfrekvens- og dobbelfrekvensobservasjoner [Hieber, 1983];[Seeber, 2003]

Enkelfrekvens	400Mhz	1600Mhz	2000Mhz	8000Mhz
Gjennomsnittseffekt	50m	3m	2m	0.12m
For 90 % <	250m	15m	10m	0.6m
Maksimumeffekt	500m	30m	20m	1.2m
Dobbelfrekvens	150/400 Mhz	400/2000 Mhz	1227/1572 Mhz	2000/8000 Mhz
Gjennomsnittseffekt	0.6m	0.9cm	0.3cm	0.04cm
For 90 % <	10m	6.6cm	1.7cm	0.21cm
Maksimumeffekt	36m	22cm	4.5cm	0.43cm

kan en ved å kombinere L1 og L2 frekvensen fjerne avstandsfeilen. Ved differentiell måling benyttes lineærkombinasjoner som wide - og narrow lane sammen for å fjerne ionosfæreeffekten. For absolutte målinger med enfrekvente mottakere, spesielt i sammenheng med Precise Point Positioning (avsnitt 3.4), har det vært hensiktsmessig å utvikle lokale og globale modeller som på best mulig vis tar høyde for ionosfærens feilbidrag. Klobucharmodellen [Klobuchar, 1996] fjerner omlag 50-60% av forsinkelsen. [Øvstedal, 2002] poengterer at en bedre kan fjerne det ionosfæriske feilbidraget ved å bruke IGS' Global Ionospheric Model (GIM). Videre viser [Chen and Gao, 2005] til en egenutviklet modell kalt Ionospheric estimation model, som fungerer bedre ved nærekvatoriale områder. Chen underbygger dog Øvstedals IGS-modell ved å konkludere med dets suverenitet ved høye breddegrader.

3.2.4 Multipath/Flerveisinterferens

Signalet på dets vei fra satellitt til mottaker gjennomgår en hel del forstyrrelser. I en ideell situasjon vil man forvente at satellittsignalet går direkte fra satellitt til antenne, men ofte er det ikke slik. Vi har altså noe som på fagspråket kalles multipath (flerveisinterferens), som intuitivt er fenomenet hvor signalet går via ett til flere objekt før det treffer antenne. Dette kan være bakken, trær, husvegger, biler eller personer som står for nærme antennen. Som følger av dette får det registrerte signalet en lengre vei å gå og kommer naturligvis inn i antenne og videre forstyrres



Figur 3.8: Signal fra satellitten går via bakken eller et objekt, dempes og forsinkes, og forstyrrer innkommende uforstyrrede signaler

andre innkommende signal (figur 3.8). Multipath er en av de største feilkildene i GPS sammenheng og kan forekomme i satellitten (satellitt multipath) eller mottakeren (mottaker multipath)[Leick, 2004]. Effekten er størst ved kodemåling og kan komme opp i 10-20 meter. For fasemåling er det teoretiske maksimum ved multipath en fjerdedel av bølgelengden til signalet: $\frac{\lambda}{4}$. Ulikt fra de andre feilbidragene i GPS sammenheng lar ikke multipatheffekten seg fjerne med en vanlig differentiell måleteknikk, dette fordi antennenlokasjonen og kalibreringen er ulik fra stasjon til stasjon, noe som har gjort at en tidligere har måtte unngå multipath ved gjennomvalg av målelokasjon (åpne områder). For å håndtere multipatheffekter kan en bl.a. bruke en choke ring antenne, en antenne som ved hjelp av en randomkappe frastår dempede signal som er reflektert fra andre kilder[Wikipedia, Desember, 2013]. Andre teknikker har vært tatt i bruk, som bl.a [Townsend and Fenton, 1994] viser at en Early-late slope (ELS) teknikk kan redusere multipath med 25 - 50% (samme effekt som med choke ring antenne) uten å bruke midler på en choke ring antenne.

3.2.5 Satellittgeometri

I likhet med multipath, er satellittgeometri særdeles relevant ved måling i områder hvor sikten er dårlig. Med en inklinasjon på 55° har en med GPS dekt store deler av jordoverflaten. Selv om vi har en jord som spenner $0 - 90^\circ$ i nord og sør retning, skal en i teorien ha fire satellitter innenfor horisonten. Figur 3.7 viser at de troposfæris-

ke effektene gir et større feilbidrag ved lave elevasjonsvinkler, dette gjelder også for ionosfæren. Selv om begge disse effektene kan reduseres og fjernes ved modellering, er det effekter som den matematiske, geometriske sammensetningen av satellitter på himmelen en må ta høyde for. Satellittene, sågar som mottakeren, er i bevegelse i løpet av en målesesjon. Geometrien (satellittkonstellasjonen med mottaker) i det samme en måling blir gjort, er det som på fagspråket kaller Dilution of Precision (DOP). Nøyaktigheten til en enkel pseudoavstandsmåling avhenger av det en kaller for User Equivalent Range Error (UERE) og den geometriske konfigurasjonen av satellittene [Seeber, 2003]. UERE er ofte uttrykt ved standardavviket på vekstenheten σ_r , og det totale standardavviket σ uttrykkets

$$\sigma = DOP \times \sigma_r. \quad (3.7)$$

J.fr [Hofmann-Wellenhof et al., 2007] utledede normalligning (7.74) kan en danne kofaktormatrisen

$$Q_x = (A^T P A)^{-1} \quad (3.8)$$

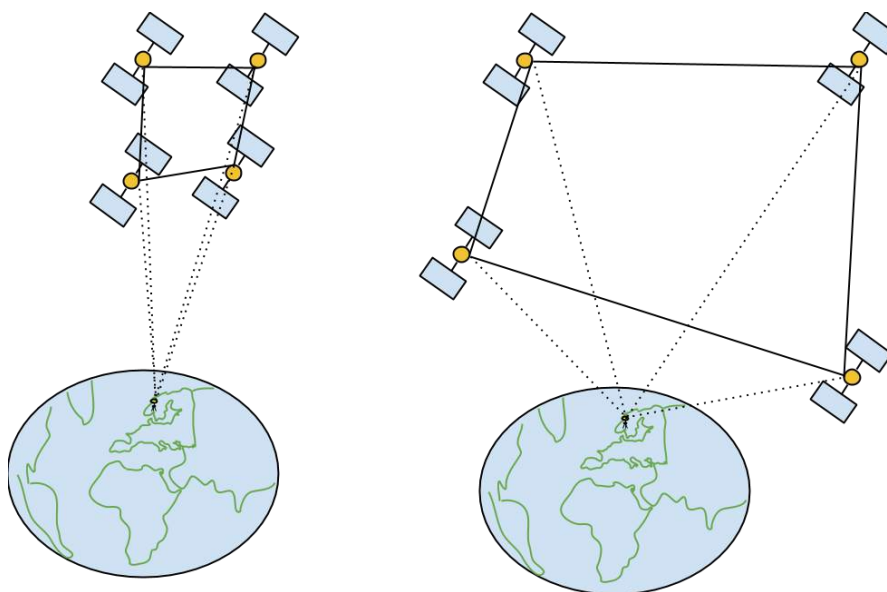
hvor A er designmatrisen og P er vektmatrisen. Q_x består av:

$$Q_x = \begin{bmatrix} q_{XX} & q_{XY} & q_{XZ} & q_{Xt} \\ q_{XY} & q_{YY} & q_{YZ} & q_{Yt} \\ q_{XZ} & q_{YZ} & q_{ZZ} & q_{Zt} \\ q_{Xt} & q_{Yt} & q_{Zt} & q_{tt} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

Elementene i denne matrisen inneholder komponentene som beskriver posisjon X, Y og Z samt mottakerklokken t. Diagonalelementene q_{XX}, q_{YY}, q_{ZZ} og q_{tt} danner DOP verdiene for de ulike dimensjonene

$$\begin{aligned} PDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ}} && 3D \text{ posisjon} \\ TDOP &= \sqrt{q_{tt}} && Tidsbestemmelse \\ GDOP &= \sqrt{q_{XX} + q_{YY} + q_{ZZ} + q_{tt}} && Geometrisk posisjon, rom + tid. \end{aligned} \quad (3.10)$$

PDOP kan også beskrives av volumet (V) tetrahederet satellittene og mottakeren



Figur 3.9: Satellittenes geometri blir beregnet i forhold til volumet av tetrahederet satellittkonstellasjonen utformer. Venstre figur viser en dårlig DOP, høyre figur viser en god DOP

danner, hvor en med et lite volum (satellittene nærme hverandre på himmelhvelvet) får en høy PDOP verdi (figur 3.9), j.fr

$$PDOP = \frac{1}{V}. \quad (3.11)$$

En effekt en må være obs på er **singularitet**, hvor alle satellittene er på samme elevasjonsvinkel som igjen fører til lineær avhengighet, DOP-verdien blir uendelig stor og en kan ikke skille mellom feil i mottakerklokken og en feil i posisjonen til mottakeren. For øvrig vil en løsning med en satellitt i zenit gå mot et uendelig stort tetrahedervolum, og dermed en minimal DOP-verdi. For videre beskrivelse anbefales [Leick, 2004]. Får en beregnet samtlige DOP verdier sitter en igjen med nøyaktighetene i form av standardavvik [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]:

- $GDOP \times \sigma_r$ Geometrisk nøyaktighet i posisjon og tid,
- $PDOP \times \sigma_r$ Nøyaktighet i posisjon,
- $TDOP \times \sigma_r$ Nøyaktighet i tid,

- $HDOP \times \sigma_r$ Nøyaktighet i horisontal posisjon,
- $VDOP \times \sigma_r$ Nøyaktighet i vertikal retning

3.2.6 Antennefasesenter og mottakerstøy

J.fr et presist definert punkt det sendte satellittsignalet kommer fra, er det på sin plass at en også har et veldefinert punkt signalet som sendes kommer inn på. I en ideell verden vil det elektromagnetiske signalet komme inn i mottakeren der GNSS mottakeren refererer til at målingen blir gjort. Slik er det ikke. Punktet signalet kommer inn på varierer nemlig, både med elevasjon, asimut, signalets intensitet og med signalets frekvens [Hofmann-Wellenhof et al., 2007]. Det er likevel blitt definert et geometrisk punkt på hver antenne en vil referere til, kalt antenna reference point (ARP). Fordi lokasjonen til det mottatte signale varierer mhp en rekke parametre, er det blitt definert et gjennomsnittsfasesenter. Forskjellen mellom det faktiske elektriske fasesignalet som kommer inn og gjennomsnittet, kalles phase center variations, eller fasesentervariasjoner (PCV). I tillegg introduseres PCO, antenna phase center offset, og definerer avstanden mellom gjennomsnittet av alle mottatte signal og det geometrisk bestemte referansepunktet ARP. En må altså ta høyde for både PCV og PCO for å finne fram til det eksakt refererte punktet i antennen målingen kommer inn på for å oppnå høypresise målinger. For å håndtere antennefasesentervariasjoner benyttes tre ulike kalibreringsmetoder.

- “Anechoic chamber calibration”(Ekkofrie kammer)
- Relativ kalibrering
- Absolutt kalibrering

I anechoic chamber calibration blir GPS antenna skråstilt og feilplassert i forhold til et kunstig GPS-signal som genereres i et isolert kammer [Seeber, 2003]. Dette er en form for absolutt kalibrering pga teknikkens selvstendighet ovenfor andre antenner. Ved relativ kalibrering bestemmer en antennens feilutslag ved å måle avstander relativt en gitt referanseantenne med veldefinerte, faste avstander mellom hverandre. Absolutt kalibrering bestemmer PCV ved å gjøre målinger over lengre tid, mer presist over flere satellittkonstellasjoner. Ved å la målesesjonen vare lenge

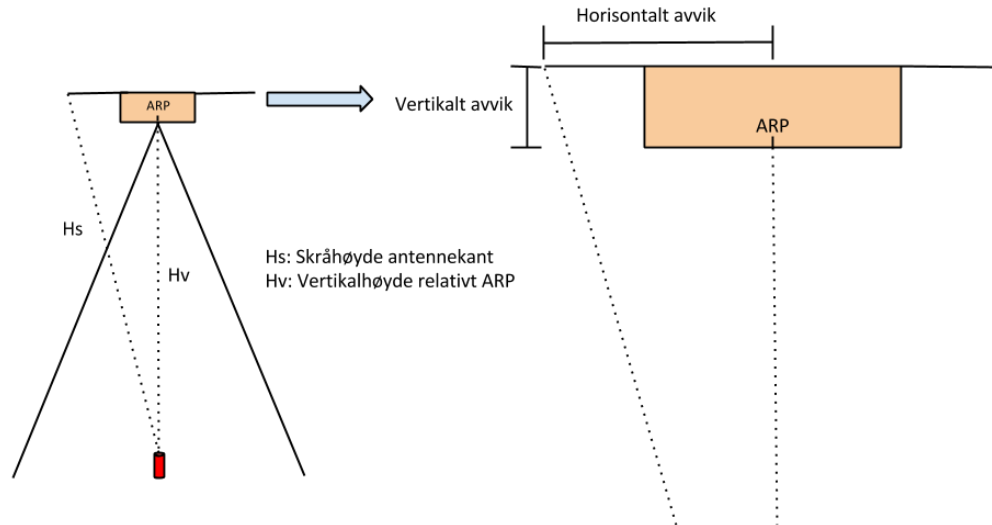
nok til at målesituasjonen repeterer seg kan en fjerne effekten av PCV.

Mottakerstøy kommer av uønskede forstyrrelser i antenna, signalforsterkeren, kabler og mottakeren i seg selv. Fordi observasjonsstøyen avhenger av bølgelengden vil det naturlig nok være større feilbidrag fra den sivile C/A-koden enn fra den militære P-koden. En sier at som tommelfingerregel må en ta høyde for et feilbidrag på omlag 1% av signalets bølgelengde, dette blir henholdsvis [Seeber, 2003]:

- C/A-kode $\lambda \approx 300\text{m}$, støy $\approx 3\text{m}$
- P-kode $\lambda \approx 30\text{m}$, støy $\approx 30\text{cm}$
- Bærebølge $\lambda \approx 20\text{cm}$, støy $\approx 2\text{mm}$

Beregning av vertikal antennehøyde relativt Antenna reference point

Ved innmålinger gjort med stativ blir det ofte målt antennehøyde fra innmålingspunkt (bolt, kors, markør etc) til kanten på antennen (“slope” antennehøyde) (se figur 3.10). Som nevnt ovenfor er det svært viktig at punktet som mottar signalet er veldefinert, og av avviket i høyde mellom innmålingspunkt og punktet signalet kommer inn på er korrekt for at det skal være mulig å projisere målingen ned på innmålt punkt. For at dette skal være mulig er det viktig at en tar høyde for det **horisontale avviket** og det **vertikale avviket** mellom antennekant og ARP.



Figur 3.10: Ved innmåling av slope antennehøyde og beregning av vertikal antennehøyde relativt ARP må det tas høyde for vertikalt avvik og horisontalt avvik mellom antennekant og ARP

3.3 Posisjonsbestemmelse

Som tidligere nevnt i introduksjonen (avsnitt 3.1) er det slik at det satellittbaserte posisjoneringssystemet er definert gjennom det en kaller for one-way ranging. Altså en enveiskommunikasjon. Samtidig vil avstanden målt mellom satellitt og mottaker betegnes som pseudoavstander fordi satellittklokken og mottakerklokken begge er påvirket av feil. Vi skiller mellom to hovedmetoder å måle denne avstanden på, nemlig gjennom **kodemåling** og **fasemåling**. Ved kodemålinger finner en fram til pseudoavstandene ved å bruke tidsstempling (Time-tagging). Altså å se på hvor lang tid det har gått fra signalet som sendes blir generert i mottakeren, til det mottas fra satellitten, multiplisert med lysets hastighet. På grunn av forskjellen i klokka som ligger i satellitten og klokka som er i mottakeren vil feilen som angir pseudoavstander skape et tillegg (klokkesynkroniseringsfeil). Signalforplantning vil også gi sitt bidrag på pseudoavstandene, samt observasjonsstøyen jf. lign (7.44) [Seeber, 2003]

$$PR_{CD} = R + cdt_u + cdt_{TROPO} + cdt_{IONO} - cdt_s + \varepsilon_{CD} \quad (3.12)$$

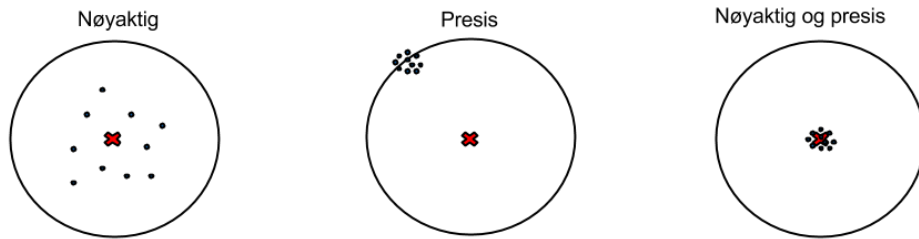
hvor R er den geometriske distansen mellom satellittantenna og mottakeranna, dt_u er klokkesynkroniseringsfeilen mellom systemtid og mottakerklokken, dt_{TROPO} er troposfæreeffekten, dt_{IONO} er ionosfæreeffekten, dt_s er satellittklokkefeilen i forhold til systemtid, c er forplantningshastigheten og ε_{CD} er observasjonsstøyen og umodellerte effekter ved kodemåling. Normalt kan en ved kodemålinger forvente en nøyaktighet i form av standardavvik på 3-5meter i grunnriss og faktor 2 (6-10 meter) i høyde.

Til forskjell fra kodemålingens tidsstempling måler en ved fasemåling på bærebølgen av selve signalet. Fordi bærebølger har svært korte bølgelengder ($\lambda_{L1} = 19.1cm$ $\lambda_{L2} = 24.4cm$) er potensialet for nøyaktighetsmålinger (igjen, tommelfingerregel på 1 %) ned på millimetersnivå. Problemet med fasemålinger er at de er flertydige i den forstand at den observerte målingen bare bestemmer fasen for én bølgelengde og ikke alle. J.fr lign (7.51) [Seeber, 2003]:

$$PR_{CR} = R + cdt_u + cdt_{TROPO} - cdt_{IONO} - cdt_s + c \left(\frac{N}{f_{CR}} \right) + \varepsilon_{CR} \quad (3.13)$$

får en et ekstra ledd $c \left(\frac{N}{f_{CR}} \right)$ hvor målingen avhenger av å løse ut flertydigheten N samt frekvensen til bærebølgen. Klokkeparameterne, flertydigheten og signalforsinkelsene er lineært avhengig av hverandre, og observasjonsstøyen og de umodellerte effektene er mindre enn ved kodemåling. For å nå høyest mulig nøyaktighet er en nødt til å kvitte seg med disse effektene, dette kan gjøres ved parameterestimering, differensiering eller PPP (avsnitt 3.4).

I posisjonsbestemmelse nevnes ofte begrepene nøyaktighet og presisjon om hverandre, men det er viktig å skille mellom dem (figur 3.11). Med **nøyaktighet** menes det statistiske grunnlaget for i hvor stor grad en måling eller serie av målinger gir uttrykk for den sanne verdien en ønsker å vite noe om. En måling har stor nøyaktighet dersom den er i stand til å treffe nær den sanne verdien/det sanne punktet. Uttrykket forveksles ofte med **presisjon**, som beskriver i hvilken grad en måling eller serie målinger er i stand til å samle seg rundt samme verdi/punkt.

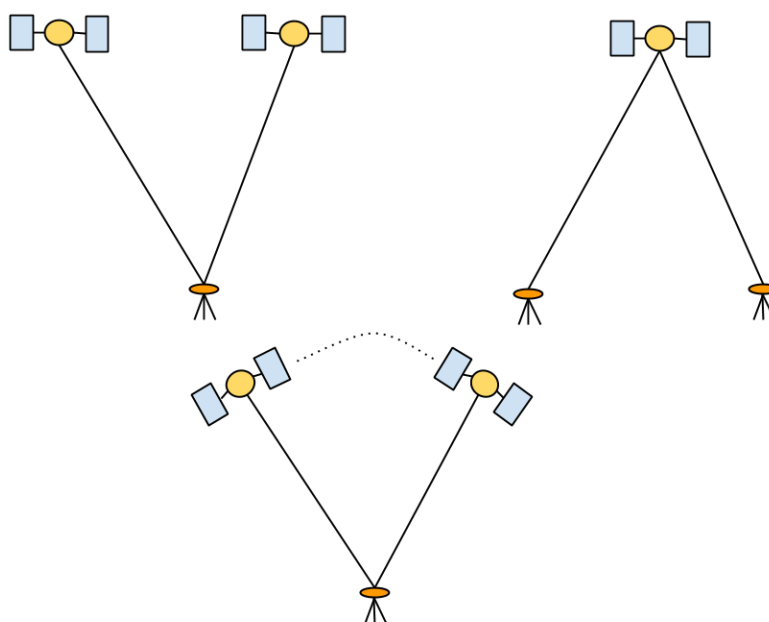


Figur 3.11: Nøyaktighet og presisjon demonstrert mot en sirket med treffpunkt X

3.3.1 Differensiell/Relativ posisjonsbestemmelse

Som et resultat av enkelmålinger fra satellitter mot en enkel mottaker er det både i kode- og fasesammenheng feilbidrag som legges til avstandsberegningen. For å forbedre disse avstandene er det mulig å differensiere gjennom relativ posisjonsbestemmelse. Relativ posisjonsbestemmelse omhandler det å beregne egen posisjon, i forhold til et annet punkt med kjente, definerte koordinater. Som et krav måles det i mottakerpunktet og i referansepunktet over samme tidsepoke slik at en kan danne lineærkombinasjoner, som videre danner det en kaller for enkel-, dobbel- og trippel-differanser. Enkeltdifferanser kan dannes på tre forskjellige måter, enten mellom to mottakere og én satellitt (fjerner satellittklokkefeilen), én mottaker og to satellitter (fjerner mottakerklokkefeilen) eller ved måling over to epoker/tidsperioder (fjerner flertydigheten N så lenge det ikke oppstår fasebrudd) (figur 3.12).

Videre vil en redusere signalforplantningseffektene (avsnitt 3.2.3), samt eliminere begge klokkefeilene i én og samme beregning. For å få til dette danner en dobbeltdifferanser (DD). Dobbeltdifferanser skjer når to satellitter måler mot to mottakere. Dette er den vanligste teknikken brukt i landmålingsverden i dag fordi en ved DD kan bestemme heltallsverdi til faseflertydighetene. Dette krever samtidig en effektivisering av VRS (virtuelle referansestasjoner) eller oppsett av en eller flere fysisk referansestasjoner som gjør det mulig å gjøre målinger av et punkt, relativt et virtuelt punkt. Som et resultat av målingen som blir gjort finner en ikke ens posisjon nøyaktig gjennom satellitt - mottaker, men heller gjennom basevektoren som dannes mellom de to mottakerne. Med hjelp av et nettverk av VRS kan en benytte relativ måling, og med løsning av dobbeltdifferanser kan en komme



Figur 3.12: Det finnes tre måter å danne en enkeldifferanse på: To satellitter fjerner mottakerklokkefeilen, to mottakere fjerner satellittklokkefeilen og måling over to epoker anvender doppler-effekten til N såfremt en ikke har fasebrudd

ned på millimeternivå for statiske målinger og et par centimeter på kinematiske. Observasjonsligninga for fasemålinger ved DD [Seeber, 2003]

$$\nabla\Delta PR_{CR} = \nabla\Delta R - \nabla\Delta d_{ion} + \nabla\Delta d_{trop} + \lambda\nabla\Delta N + \varepsilon_{PR_{CR}} \quad (3.14)$$

viser at klokkefeilene er borte, og de resulterende ionosfæriske effektene, troposfæriske effektene og banefeilene er redusert. $\nabla\Delta$ betegner kommunikasjonen fra to satellitter til to mottakere. Faseflertydigheten N er nå mulig å finne, og gjennom lineære frekvenskombinasjoner mellom L1 og L2 kan en fjerne de ionosfæriske effektene

$$\begin{aligned} \text{Wide Lane :} & \quad L_{\Delta} = L_1 - L_2 \\ \text{Narrow Lane :} & \quad L_{\Sigma} = L_1 + L_2 \\ \text{Ionosfritt :} & \quad L_0 = \frac{L_{\Delta} + L_{\Sigma}}{2}. \end{aligned} \quad (3.15)$$

Trippeldifferanser går steget videre og måler dobbeltdifferanser, men over to epoker. Fordi en med DD ikke klarer å kansellere flertydigheten N , vil en være sårbar mot fasebrudd. Fasebrudd oppstår når kommunikasjonen mellom satellitt og mottaker blir brutt i løpet av en målesesjon. Ved fasebrudd mister satellittene lås på mottakeren, og målingen blir igjen flertydig med et ukjent antall bølgelengder N . Ved trippeldifferanser

$$\delta\nabla\Delta PR_{CR} = \delta\nabla\Delta R - \delta\nabla\Delta d_{ion} + \delta\nabla\Delta d_{trop} + \varepsilon_{res} \quad (3.16)$$

står en igjen med mottakerkoordinater, umodellerte effekter og forplatingseffektene, hvor ionosfæren kan fjernes med lineærkombinasjoner. Elimineringen av N i trippeldifferanser forutsetter at det ikke har skjedd fasebrudd mellom de to epokene målingen blir gjort.

I Norge har Kartverket opprettet en posisjoneringstjeneste kalt CPOS. Tjenesten garanterer centimeters nøyaktighet gjennom brukerens oppkopling via GSM/GPRS nettet slik at kartverket kan knytte vedkommede opp mot en VRS og foreta en relativ posisjonering. Nøyaktigheten CPOS-tjenesten lover ligger på 5cm horisontalt og 8cm vertikalt (95%) med forbehold til uforutsette effekter [Kartverket, Mars 2014].

3.3.2 Absolutt posisjonsbestemmelse

Navnet "absolutt posisjonsbestemmelse" brukes som et svar på "relativ posisjonsbestemmelse", og presiserer at en kun måler mellom én enkelt mottaker og satellitter. Denne måten å måle på er en av de vanligste posisjoneringsteknikkene på grunn at dets simplicitet og kostbesparende anvendelse. Absolutt posisjonsbestemmelse er ofte kalt point positioning, eller single point positioning, og har nøyaktighetsmål avhengig om signalet som mottas leveres gjennom det som kalles standard posisjoneringstjeneste (SPS) for sivile brukere eller presis posisjoneringstjeneste (PPS) for militære brukere. Etter Selective availability (avsnitt 3.1) ble fjernet i mai 2000 har nøyaktigheten på SPS tjenestene gått gradvis nedover til det forsvarsdepartementet i USA beskriver som gjennomsnittet med romlig nøyaktighet på 6m ved nylige målinger (Age of data= 0)[of Defence, mars 2014]. Som nevnt i avsnitt 3.3.1 blir feileffektene differensiert bort gjennom enkelt-,dobbel- og trippeldifferanser. I ab-

solutt posisjonsbestemmelse vil målingen være påvirket av effektene som tidligere nevnt (ligning 3.12) er klokkefeilen i satellittene, mottakerklokkefeilen, ionosfærisk påvirkning, troposfærisk påvirkning og målestøy [Øvstedal, 2000]. Ved fasemåling vil en ha faseflertydighet N som kun kan løses ved differensiering over flere epoker. I tillegg har en et relativistisk bidrag, og over lange måleserier må en også være påpasselig med å ta høyde for loadingeffekter som tidejord. Fordi en ikke kan differensiere og dermed kansellere ut effektene for å oppnå en bedre nøyaktighet slik en kan ved differensielle målinger, er en nødt til å modellere feileffektene, og derav har vi vitenskapen som omhandler precise point positioning.

3.4 Precise Point Positioning

Som nevnt i innledningen omhandler PPP det å etterprosessere måledata slik at en med målinger gjort med enkelmottakere kan oppnå resultat med høy nøyaktighet. Med et stadig voksende behov for målinger med høy nøyaktighet og presisjon i sanntid har differensielle metoder som RTK (Real Time Kinematic) blomstret. Differensielle målinger blir valgt framfor absolutte på grunn av elimineringspotensialet av effektene som ikke lar seg fjerne i målesesjoner med kun én mottaker (avsnitt 3.3.2). PPP beregner i all hovedsak koordinater på bakgrunn floatverdier (flyttall), altså eksisterer det faseflertydighet i målingen. Ved absolutte målinger har en også relativistiske effekter, klokkesynkroniseringsfeil i satellitt- og mottaker og signalforplantningseffekter oppstår og hindrer høy nøyaktighet. Bruk av etterposesserte data for presise målinger med “point positioning” (enkelmottaker) ble først introdusert i 1976 [Anderle, 1976], men ble kommersielt lagt merke til først på slutten av 90-tallet. Etterprosesseringstjenester ble da gjort tilgjengelig av blandt annet National Aeronautics and Space Administration (NASA) Jet Propulsion Laboratory (JPL), IGS og NRCan (Natural Resources Canada). I dag benyttes PPP i blandt annet gruvedrift [XU et al., 2011], i marinesammenhenger og i landbruket. Teknikken er gjennomgående lik for mange av de nettbaserte tjenestene, og kan beskrives i grove trekk: En måler data med en enkeltmottaker, enten statisk eller kinematisk, prosesserer på mottatt dataformat eller konverterer data over til det universelle tekstformatet RINEX (avsnitt 3.5), og prosesserer mottakerens observasjonsfil gjennom en valgt programvare. Avhengig om dataen

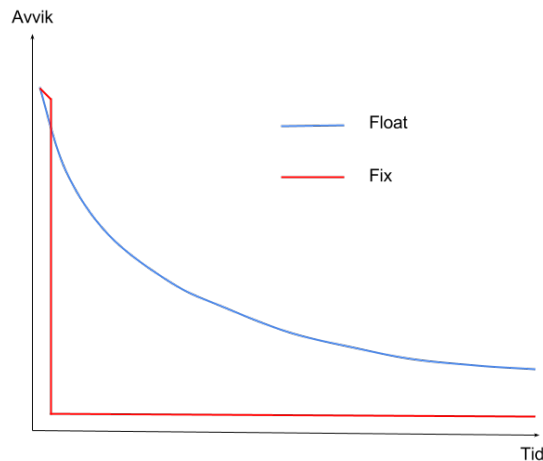
mer og endelige data leveres mellom 12-18 dager etter måling (se tabell 3.3). Jo raskere en vil ha data (under/etter måling), jo mindre nøyaktig blir også resultatet. Dog er det verdt å merke seg at de leverte produktene i sanntid faktisk er ganske gode med tanke på et nøyaktighetskrav på sub-dm ved f.eks innmåling av eiendomsgrenser i landmålingsbransjen. Ved korrigering av data i f.eks PPP sammenheng leverer IGS' data i ulike format. Som tabell 3.3 viser har en produkt med ulik ventetid og nøyaktighet, slik at brukeren selv kan veie disse egenskapene opp mot hverandre. For endelige produkter (final) blir formatet .igs benyttet. Final-data er et resultat av en vektning mellom flere kilder (cod, emr, esa, gfz, igr etc ...) og leverer satellittkoordinater (sp3 - intervall på 30 sekund/5min), satellittklokkekorreksjoner (clk - intervall på 15 min) og jordrotasjonsparametre (erp - intervall på 1 uke). Problemet til igs-filene er i all hovedsak at disse ikke leverer satellittklokkekorreksjoner for GLONASS-data, slik at en ikke får brukt disse til å styrke konstellasjonen. For å ta med GLONASS-data kan en benytte esa-filene, levert av ESA (European Space Agency). For prosessering i sanntid kan igr - filene benyttes.

Tabell 3.3: Versjonene av IGS-produkter [IGS, April 2014b]

Versjon	Type	Nøyaktighet	Ventetid	Oppdatering	Intervall
Kringkastede	Bane/klokke	100 cm/5ns	Sanntid	–	Daglig
Ultra-rapid (predikert)	Bane/klokke	5cm/3ns	Sanntid	03, 09, 15, 21 UTC	15min
Ultra-rapid (observert)	Bane/klokke	3cm/150ps	3-9timer	03, 09, 15, 21 UTC	15min
Rapid	Bane/klokke	2,5cm/75ps	17-41timer	17 UTC	15min/5min
Final	Bane/klokke	2,5cm/75ps	12-18dager	Hver torsdag	15min/30s (5min)

3.4.2 PPP vs. Differensiell/Relativ posisjonsbestemmelse

Med et voksende marked av etterprosesserte, nettbaserte tjenester er en i dag kommet til et punkt hvor teknikken precise point positioning virkelig har kapasitet til å utfordre differensiell GPS(DGPS). DGPS har vært enerådende med nøyaktige målinger i sanntid, men krever samtidig kontakt med andre stasjoner. Etterpros-



Figur 3.14: Med heltalls-fixedverdi vil avviket umiddelbart falle ned til optimal verdi, mens en med flyttalls-floatverdi har en noe lengre initialiseringstid

sering av DGPS krever samtidige målinger med andre stasjoner. PPP-teknikkens klare hovedargument er dens selvstendighet fra andre mottakere, virtuelle eller oppstilte, for så å oppnå målinger med høy nøyaktighet i et globalt system. Videre har PPP en ren praktisk fordel i form av logistikk og ressursbesparenhets i form av eventuelle abonnemnt til posisjonstjenester som f.eks den norske Kartverkets CPOS-tjenste. Teknikken åpner derfor for en nøyaktig måte å måle på for områder uten umiddelbar god dekning (j.fr CPOS' krav om GSM/GPRS-dekning ved sanntidsmålinger) og områder som er vanskelige å komme til med mye utstyr (logistikk med flere mottakere for etterprosessering). Med dette til grunne skulle en tro at PPP-teknikken var langt mer ettertraktet, men slik at det ikke. Med teorien til DGPS i bakhode, vet en at teknikken løser ut flertydighetene, og oppnår en fixed-løsning på fasemålingen. Med fixed-løsning finner en heltallsverdien som løser ut antall bølgelengder mellom satellittene og baseantenna. Dette gjør at en ved overgangen mellom å måle flyttall (float) og heltall (fixed) umiddelbart oppnår høy nøyaktighet (figur 3.14). Til forskjell fra DGPS beregner PPP flyttallsverdi-

Correction Type	PPP	Differential GNSS
Satellite Specific errors		
Precise satellite clock corrections	✓	✗
Satellite antenna phase centre offset	✓	✓
Satellite antenna phase centre variations	✓	✓
Precise satellite orbits	✓	✓/✗
Group delay differential	✓ (L1 only)	✗
Relativity term	✓	✗
Satellite antenna phase wind-up error	✓	✗
Receiver Specific Errors		
Receiver antenna phase centre offset	✓	✓
Receiver antenna phase centre variations	✓	✓
Receiver antenna phase wind-up	✓	✗
Geophysical Models		
Solid earth tide displacements	✓	✗
Ocean loading	✓	✗
Polar tides	✓	✗
Plate tectonic motion	✓	✗
Atmospheric Modelling		
Tropospheric delay	✓	✓
Ionospheric delay	✓ (L1 only)	✗

Figur 3.15: Feilbidrag som må tas høyde for i henholdsvis PPP og DGPS [Rizos et al., 2012]

er(float). Dette betyr at en i utgangspunktet ikke får umiddelbar høy nøyaktighet, altså må en påberegne en viss initialiseringstid. Fordi en ikke kan differensiere målingene med PPP vil en måtte ta høyde for et ionsfærisk bidrag og ideelt benytte seg av tofrekvente mottakere for å linearisere dette bort for så å få beregningen ned på desimeternivå. For å komme ned på centimeternivå må en videre ta høyde for en rekke effekter som kanselleres bort ved DGPS: phase wind-up(en effekt som ved statiske mottakere er forårsaket av en rotasjon av satellitten i dens bane for å vende dens solpanel mot solen [Navipedia, April 2014]), satellittantennekorreksjoner, tidejord og ocean loading. De resterende effektene er gjengitt i figur 3.15, hvor “v” indikerer at en må ta høyde for effekten og “x” indikerer at effekten forsvinner. Feilbidrag markert med (L1 only) presiserer at effekten kun spiller inn når en har enfrekvente data. I tillegg til de ekstra feileffektene en må ta stilling til i PPP blir en også pålagt noe “ekstraarbeid” med tanke på transformasjon av koordinater. I åpne tjenester på nett leveres (logisk nok) data fra bl.a CSRS i ITRF08 koor-

dinater. Dette gjør igjen at en selv må påberegne tid til transformasjon mellom internasjonale og nasjonale system, eller benytte nasjonale PPP-tjenester som gjør dette for en, gitt at alle land en gang opparbeider seg slike. DGPS største argument mot PPP er allikevel nevnte initialiseringstiden, og PPPs utfordring med å levere data i sanntid. I dag forskes det en del på dette temaet, og IGS har siden slutten av 2013 vært fullt operativt i sine leverinstjenester av sanntids efemeridedata [IGS, April 2014c]. [Grinter and Roberts, 2013] tester PPPs evne til å beregne i sanntid, men konkluderer med at konvergeringstiden (initialiseringstiden) fremdeles er for lang til å konkurrere med DGPS. Videre kan en argumentere for at det i framtiden, med en styrket satellittkonstellasjon og gjennom måling på L5 signalet kanskje vil være mulig å oppnå en rask nok fix til å konkurrere med DGPS.

3.5 RINEX

RINEX, eller Receiver Independent Exchange Format, ble først framlagt ved “The fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning” i 1989 [Gurtner et al., 1989] basert på utviklinger gjort ved Universitetet i Bern. RINEX ble dannet på bakgrunn av en sårt etterlenget generalisering av GPS format som følger av at hver mottaker produserer data i sitt eget binære format, samtidig varierer data med hensyn på kode-og fasemåling og hvordan kode-og fasemålingen blir beregnet. Alle disse formatkombinasjonene gjorde det vanskelig for leverandører av programvarer å prosessere alle typer data, og det ble igjen svært kostbart å oversette mellom mange typer format. Etter innføringen av RINEX var det mer naturlig for leverandøren av data å gi ut et konverteringsprogram slik at brukeren kunne ta imot data og videre overføre dette til RINEX. Formatet er i dag det internasjonale formatet for uveksling av data, og benyttes i etterprosesseringstjenester som bl.a IGS. RINEX-formatet består av tre hovedtyper datafiler: Observasjonsdatafil, meteorologidatafil og navigasjonsdatafil[Seeber, 2003]. Siden 1997 har RINEX-formatet også inkludert GLONASSdata, slik at en kan velge å prosessere med eller uten GLONASSsatellitter for en mer helhetlig analyse. I RINEX’ utvidelse 2.11 ble det også annonsert at formatet skulle inkludere de øvrige GNSS systemene.

System	GPS	GLONASS	COMPASS	Galileo
Political entity	United States	Russian Federation	China	European Union
Coding	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA
Orbital height	20.180 km (12.540 mi)	19.130 km (11.890 mi)	21.150 km (13.140 mi)	23.220 km (14.430 mi)
Period	11.97 hours (11 h 58 m)	11.26 hours (11 h 16 m)	12.63 hours (12 h 38 m)	14.08 hours (14 h 5 m)
Evolution		2 17.aug		17.okt 17.okt
Number of satellites	At least 24	31. including 24 operational 1 in preparation 2 on maintenance 3 reserve 1 on tests	5 geostationary orbit (GEO) satellites. 30 medium Earth orbit (MEO) satellites	4 test bed satellites in orbit. 22 operational satellites budgeted
Frequency	(L1 signal) 1.2276 GHz (L2 signal)	Around 1.602 GHz (SP) Around 1.246 GHz (SP)	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)	1.164–1.215 GHz (E5a and E5b) 1.260–1.300 GHz (E6) 1.559–1.592 GHz (E2-L1-E11)
Status	Operational	Operational. CDMA in preparation	15 satellites operational. 20 additional satellites planned	In preparation

Figur 3.16: GNSS-sammenligning: Utdrag fra tabell [Wikipedia.org, April 2014]

3.6 GNSS - Øvrige system

Folk flest assosierer dagens satellittbaserte posisjonerings-tjeneste med det amerikanske GPS systemet. Realiteten er at GPS kun er et av flere system som sammen går under samlingsbetegnelsen Global navigation satellite systems (GNSS). GNSS består i dag av fire større system:

- GPS
- GLONASS
- Galileo
- Compass/Beidou

Av disse er det amerikanske GPS-systemet og det Russiske GLONASS-systemet ved full operasjonell status, mens den Europeiske Unions Galileo og Kinesernes Compass/Beidou er under utvikling. Full oversikt over systemenes egenskaper er vist i figur 3.16.

GLONASS, eller **G**lobalnaya **N**avigatsionnaya **S**putnikovaya **S**istema (oversatt:Global Navigation Satellite System, må ikke forveksles med GNSS) er den russiske ekvivalenten til GPS. Systemet består av ≈ 24 satellitter spredt over 3 baneplan 110° fra hverandre men en baneinklinasjon på $64,5^\circ$ j.fr GPS' inklinasjon på 55° . Til forskjell fra GPS har GLONASS alle sine kontrollstasjoner over samme kontinent,

plassert i eget lang og land som tidligere tilhørte Sovjetunionen. Dette har medført at GLONASS tidligere har blitt sett på som noe “upålitelig” fordi systemet har hatt problemer med å flagge defekte satellitter uten global dekning til disse. Dog har systemet vist seg å være et godt supplement til GPS, og i dag tar mottakere imot signal fra både GPS og GLONASS for å få flere satellitter med i målingen for igjen å sikre bedre geometri.

Tidlig på 1990-tallet så den Europeiske Union nødvendigheten av å skaffe seg et eget system for satellittnavigasjon, og slik begynte utviklingen av **Galileo**. Det ble tidlig klart at Europeernes system skulle være under sivil kontroll. Dette betød at ingen enhet eller valgt organisator skulle ha muligheten til å forstyrre eller hindre tilgang til posisjoner slik amerikanerne gjorde med GPS på 90-tallet. Systemet har dog på ingen måte planer om å utkonkurrere hverken GPS eller GLONASS, men vil være med på å styrke den totale satellittkonstellasjonen og operabiliteten til et globalt satellittnavigasjonssystem [Agency, April 2014]. Systemet har i dag to operasjonelle satellitter i bane med en inklinasjon på 56° . Det ferdigstilte systemet vil bestå av i alt 24 satellitter fordelt på tre baneplaner.

BeiDou, oppkalt etter kinesernes navn på karlsvognen, er det kinesiske satellittnavigasjonssystemet. Navnet forveksles og brukes i dag om hverandre med systemets litt mer vestlige variant: “COMPASS”, som faktisk var navnet kineserne gav den andre generasjonen av BeiDou-satellittene. Det er dog blitt bestemt at navnet COMPASS ikke lenger skal brukes, altså benyttes BeiDou. BeiDou-2 er et system bestående av geostasjonære (GEO) satellitter (satellitter som følger jordens rotasjon = er konstant over samme punkt på himmelen) over kinesisk jord og de nye 30 (MEO) satellittene som planlegges å være globalt operatibelt i 2020.

Kapittel 4

Forsøksdesign

Formålet med denne oppgaven var å teste Precise Point Positionings yteevne i ulike skogstettheter for å kunne finne ut om teknikken var konkurransedyktig med relativ posisjonering ved degraderte forhold. Som et ekstra sammenligningsgrunnlag var det hensiktsmessig å ta med en håndholdt mottaker som gjengav de faktiske forhold ved absolutt posisjonsbestemmelse uten å etterprosessere data. Fordi PPP er en teknikk basert på etterprosessering (avsnitt 3.4) var det naturlig å undersøke hvor nøyaktig data en kunne oppnå, hvor lett tilgjengelig datakorreksjonene var og ikke minst, hvor lang initialisering/konvergeringstiden fra lav til høy nøyaktighet var. I dette kapittelet beskrives det hvordan oppgaven er bygget opp slik at en skal få de resultatene en er på jakt etter. Utførelsen, herunder planlegging, innmåling og etterprosessering, blir beskrevet i kapittel 5.

4.1 PPP ved degraderte forhold

Som nevnt i innledningen har precise point positioning blitt mye testet over åpne områder, og gjennom andre prosjekt, også i skogsforhold [Næsset and Gjevestad, 2008]. For å få fram hvordan PPP presterer i skogsterreng er det nødvendig å gjøre målingene skog med ulik tetthet og av ulik obstruksjonsgrad. I alt fire stasjoner, kategorisert fra A til D hvor A er ved “åpent skogsterreng” og D er “Tett skogsterreng” vil bli benyttet. Hensikten med målingene er å undersøke hvor god nøyaktighet hver stasjon oppnår og hvor lang tid det tar for hver stasjon å oppnå

dette (initialiseringstiden). Det er derfor viktig at en måler i lange nok serier. Videre vil det være viktig å måle over samme tidsrom, dette for å sikre like måleforhold i forhold til forplantningseffektene og satellittkonstellasjon. I tillegg til terrestriske obstruksjoner (trær, fjell osv...) vil en også kunne forvente en økende forplantningseffekt ved lave elevasjonsvinkler, derfor er målesesjonens elevasjonsvinkel nødt til å bli definert. Gjøres beregningene på bakgrunn av innmålinger gjort med en tofrekvent mottaker kan en utføre lineære kombinasjoner og danne et ionosfærefritt signal. Det viktigste av alt er kanskje styringen av mengden data en vil ha med for videre analyse. Her er det viktig å velge en loggingsrate som best illustrerer målesituasjonen og PPPs yteevne. Innmålingen blir gjort etter vanlig landmålingsskikk, med sentrering av libelle, sikt over bolt, mål av nedsatt bolt, antennehøyde, antenne vendt mot nord.

Når innmålingen er utført vil en gjerne prosessere data på en ordentlig måte. Her er det viktig å huske at de fleste programvarer prosesserer i det universelle RINEX filformatet. En konverterer derfor de mottatte dataene og prosesserer med en eller flere valgte PPP-kompatible programvarer. Filene som prosesseres må være påført antennekorreksjon hvis målingen har vært utført med stativ eller over plate. Fordi enkelte programvarer (som f.eks den Canadiske CSRS-PPP) beregner antennehøyde ut fra RINEX filen, og denne igjen refererer til ARP (antenna reference point)[Nylen and White, 2007], må en ved skråavstandsmåling av antennehøyde korrigere disse til vertikale antennehøyder relativt ARP. Fordi prosesseringen skjer i ITRF kan/må de beregnede koordinatene transformeres til nasjonale referanserammer. Nøyaktigheten til de beregnede koordinatene vil kunne beregnes i form av beregnede standardavvik og faktiske avvik fra en referanse. Initialiseringstiden kan beregnes ved å dele opp innmålt data i epoker etter målestart, prosessere hver oppdeling, og analysere prosessert datas avvik fra referansen. En vil også ha en god visualisering av målesituasjonen for en god analyse og et helhetlig inntrykk av målesituasjonen, derav har en skyplot. Skyplot gjenspeiler målesituasjonen ved å angi antall satellitter og deres bevegelse på himmelhvelvet fra målesesjonens start til slutt. Skyplot krever typisk almanakkdata fra satellittene for målesesjonen, samt manuelle mål på terrestriske obstruksjoner (egeninnmålte, forstyrrende elementer som trær, fjell osv...) og elevasjonsgrensen til målingen. I tillegg kreves det koor-

dinater for hver punkt for å stedfeste og beskrive målesituasjonen, her benyttes typisk de foreløpige koordinatene til stasjonen.

4.2 PPP vs. DGPS

I analysen av Precise Point Positionings yteevne ved degraderte skogsforhold i en sammenligning av differensiell GPS ville en naturlig nok sammenlignet nøyaktighet i tillegg til de foreslåtte initialiseringstid og arbeid med datainnsamling foreslått i problemstillingen. Dette krever at en måler både DGPS og PPP over allerede kjente punkt, noe som ikke ble gjort i denne oppgaven. Ved en reell analyse av nøyaktighet ville det vært naturlig å se på hvordan hver teknikk taklet degraderte forhold (bidrag fra obstuksjoner som trær og fjell etc.) som potensielt fører med seg effekter som multipath og dårlig satellittkonstellasjon (høy DOP-verdi). Tatt de to andre sammenligningsgrunnlagene i betraktning, vil en kunne gå flere veier og ha flere vinklinger for å få fram forskjellene på nevnte “initialiseringstid” og “Arbeid med datainnsamling”. J.fr prosesserte PPP punkt A, B, C og D i avsnitt 4.1 vil en også ha disse målt med DGPS. Med hensyn på initialiseringstiden kan en se på hvor lang tid det tar å få fixed løsning, sammenlignet med hvordan PPPs avvik fra referansen (her: RTK-målingen) konvergerer over tid. Argumentet at en kan oppnå like god nøyaktighet på omtrent like lang måletid med begge teknikkene kan derfor testes ved alt fra gode måleforhold (A) til dårlige måleforhold (D). Fordi en med DGPS kan måle og beregne nøyaktige posisjoner i sanntid eller ved etterprosessering, benytte rover tilknyttet en fysisk basestasjon eller virtuelle referansestasjoner, er det flere fremgangsmåter for en analyse opp mot PPP. J.fr avsnitt 3.4.2 vil en økt satellittkonstellasjon styrke PPPs yteevne og trolig korte ned initialiseringstiden. Her vil det være interessant å se på nytten av GLONASS-satellitter i målingen.

Ser en på analysen av hvor mye arbeid som kreves med tanke på innsamling og prosessering av data, er det flere aspekter som spiller inn. For PPP kan analysen omhandle logistikk i form av utstyrstransport, brukervennlighet i form av programvarenes intuitivitet, effektivitet ved innsamling av korreksjonsdata og etterprosessering og reelle kostnader i form av tid og arbeidsinnsats. For DGPS vil de samme faktorene være gjelde; logistikk, brukervennlighet ved oppkopling, innmåling og

prosessering i sanntid, effektivitet i form av initialiseringstid for høy nøyaktighet og reelle kostnader.

For å sikre like forhold for en eventuell sammenligning vil det være nødvendig at stasjonen/instrumentet for DGPS blir satt opp over noenlunde like forhold som nevnte PPP, og ved samme måletidspunkt. For etterprosessering med DGPS krever dette sammenhengende målinger med en eller flere stasjoner plassert på kjente posisjoner. Testes RTK mot PPP kan samtidig måling gjøres ved å måle like før og like etter stasjonen for PPP settes opp, og beregne vektet middelvei.

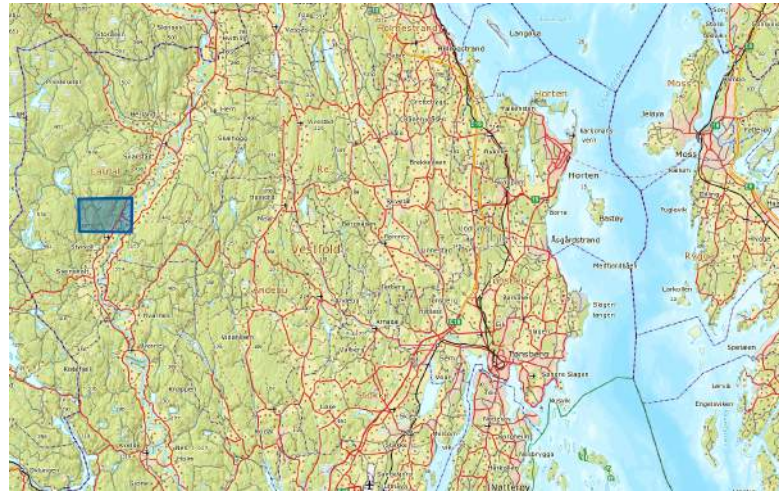
Kapittel 5

Datainnsamling

For å kunne undersøke PPPs yteevne ved degraderte forhold, samt sammenligne teknikken med DGPS, var det naturlig å utføre feltarbeid i skogsterreng. I samarbeid med Jan Bjerketvedt, ansatt ved NMBU og Norsk institutt for skog og landskap, ble dette feltarbeidet gjort i Lardal kommune i Vestfold fylke. Området ble valgt på bakgrunn av Bjerketvedts forskningsprosjekt som omhandlet det å se på muligheter for å effektivisere innsamlingen av geometriske skogsveidata (primært stigning og kurvatur) til veistandardregistrering. Dette omfattet kartdata, laserdata og målinger i felt med håndholdt GPS (i frontrute på bil). Som referanse/sammenligningsgrunnlag ble det i denne sammenhengen benyttet RTK CPOS, som igjen gjorde seg nyttig som kontroll av de utplasserte stasjonene, og i en PPP vs. Differentiell GPS analyse. Det var nødvendig å utsette enkeltmottakere for ulike skogstettheter, og i samråd med veileder Ola Øvstedal ble det benyttet fire stasjoner (A, B, C og D) som skulle gjøre innmålinger over omtrent samme tidsrom (samtlige målinger overlappet) slik at disse hadde noenlunde lik satellittkonstellasjon (avsnitt 3.2.5). Det var også viktig at stasjonene sto nærme hverandre nok til at en kunne anta like atmosfæriske forhold (avsnitt 3.2.3).

5.1 Arbeidsområde og planlegging

Arbeidsområde (Figur 5.1) lå som nevnt i Lardal kommune i Vestfold fylke som følger av prosjektet gjennomført av Bjerketvedt. Området i seg selv var en skog-



Figur 5.1: Arbeidsområde for feltarbeid, Lardal [Kartverket, Januar 2014]

bruksveg/hytteveg tilknyttet fylkesveg 40 i Lardal. Før ankomst ble måleområdet vurdert i samråd med Bjerketvedt for å finne ut hvor det kunne være relevant å plassere mottakerne. Som en del av Bjerketvedts forskningsprosjekt var det nødvendig at å måle senterlinje av skogbruksvegen j.fr tidligere målinger utført av Bjerketvedt med håndholdt mottaker. Disse målingene var tidligere blitt gjort i bil med varierende hastighet, med en loggingsrate på 1 Hz (dette var data som forbeholdes Bjerketvedts prosjekt og vil ikke bli videre kommentert i denne oppgaven). Det var derfor kun nødvendig at RTK oppmålingen ble målt med en tetthet etter skjønn, hvor hensikten var å få med kurvaturene og veiens generelle retning (figur 6.16). For prosjektet beskrevet i denne avhandlingen var RTK-målingene nyttig med tanke på å undersøke hvor lang tid en brukte på å måle før en fikk fixed-løsning (for en PPP vs differensiell GPS sammenligning) i ulike terrengetyper, samt å kontrollmåle PPP-mottakernes posisjon før og etter oppsett. I forkant av RTK-målingen ble det planlagt at det skulle settes ut fire PPP-stasjoner, ved fire ulike skogstettheter, slik at disse kunne stå fritt og logge data under hele RTK-målingen, optimalt i 3-6 timer. Dette slik at en hadde lange nok serier til å kunne visualisere initialiseringstiden til PPP-metoden på en best mulig måte og at en ved eventuelle uhell (utsklidninger/store forstyrrelser av mottaker) underveis kunne være i stand til å detektere disse med kinematisk måling.

5.2 Utstyr

Mottakerne m/antennener som ble brukt i feltarbeidet ble lånt av forsker Ole Martin Bollandsås v/INA (Institutt for Naturforvaltning) og antennekabler og stativ ble lånt fra geomatikkseksjonen ved IMT (Institutt for matematiske realfag og teknologi), begge underlagt NMBU. Som referanse -og sammenligningsgrunnlag ble CPOS RTK benyttet. Mottaker, antenne og målebok ble lånt av Rolf Knoph v/Blinken a.s.

5.2.1 Referanseutstyr

- Fire mottakere
 - Base-Sekk TOPCON Legacy-E S/N: 340-0235
 - Base-A TOPCON Legacy-E S/N: 340-0261
 - Base-C TOPCON Legacy-E S/N: 340-0248
 - Base-D TOPCON Legacy-E S/N: 340-0294
- Fire antenner
 - Base-Sekk TOPCON PG-A1 S/N: 308 - 0839
 - Base-A TOPCON PG-A1 S/N: 308 - 9555
 - Base-C TOPCON PG-A1 S/N: 308 - 0830
 - Base-D TOPCON PG-A1 S/N: 308 - 0851
- RTK
 - TOPCON Tesla RTK
 - TOPCON HiPer II antenne
 - TOPCON Magnet field målebok.

Det var også nødvendig å anskaffe mer praktisk utstyr for selve oppsettet av målingen. Stativ, målebånd og kompass ble utdelt av IMT, boltene ble laget av kompetente arbeidere ved IMTs maskinverksted og helningsmåler og sprayboks ble tatt med av Jan Bjerketvedt.

5.2.2 Annet utstyr

- Fire stativ

- Målebånd
- Sprayboks
- Helningsmåler - Opti-Logic 400LH
- Fire bolter
- Kompass
- Håndholdt Garmin Glow kodemottaker.

Stativene var med for vanlig oppsett av GNSS mottaker, målebånd var med for å måle den skrå antennehøyden fra toppen av nedsatt bolt til kanten av antennen. Avstanden topp av bolt til antennekant var før øvrig gjennomgående for alle målinger av antennehøyden. Sprayboksen markerte bolt slik at en skulle finne den igjen ved flere målesesjoner og helningsmåler og kompass var med for å beregne sikt og retning for å dermed kunne danne et bilde/skyplot av målesituasjonen i det valgte området mottaker ble satt ned.

5.3 Måling

Utstyret nevnt i avsnitt 5.2 var i god stand, men en måtte selv velge instillingene og måleparametere i RTK- og PPP-mottakerne. For PPP-mottakerne ble det ved hjelp av programvaren PC-CDU [TOPCON, Januar 2014] stilt inn på en datarate på 1 Hz, med en elvasjonsgrense på 10 grader.

Ved ankomst og nærmere befarig av området ble det satt opp de fire mottakerne ved fire forskjellige skogsområder. Fordi lokasjonene til disse mottakerne skulle plasseres med relativt stor avstand (i forhold til kjøre og oppsett av stasjon), tok det nødvendigvis noe tid mellom oppstilling av hver stasjon. Oppstillingen ble gjort på vanlig måte med sentrert libelle, sikt over bolt, målte skråavstander for antennehøyden før og etter måling, målt bolthøyde og antenne vendt mot nord. Som referanse ble det målt to ganger med RTK CPOS, før og etter målesesjon. Ved oppstart av en mottaker var det viktig å legge merke til mottakerens satellitttellefunksjon ved startknappen. I det mottakeren ble slått på startet et blinkende lys, røde blink for GLONASS-satellitt og grønne blink for GPS-satellitter. Disse fulgte hverandre i en sammenhengende serie og anga hvor mange satellitter mottakeren hadde kontakt med i det øyeblikket. Mottakeren fulgte også med en recknapp,

som indikerte det å starte selve målingen. Spesielt for disse TOPCON Legacy-E mottakerne var det her viktig å ikke starte selve målingn/recordingen før en hadde kontakt med et tilstrekkelig antall satellitter (4 satellitter j.fr avsnitt 3.1). De fire stasjonene ble tildelt navnene PPP1, PPP2, PPP3 og PPP4(Figur 5.2). Plasse-ringene av disse mottakerne ble valgt på bakgrunn av skogstettheten i de aktuelle områdene, hvor en med skogstetthet mener terresteriske obstruksjonskilder som trær og fjell som omkranset mottakerens posisjon. Graderingen av tettheten ble tallfestet gjennom mål av elevasjonsvinklene for obstruksjonskildene i åtte him-melretninger (med heretter presenterte forkortelser): Nord (N), nord-øst (NØ), øst(Ø), sør-øst(SØ), sør(S), sør-vest(SV), vest(V) og nord-vest(NV). Elevasjonsvinklene ble så matematisk projisert ned i et plan (fremstilt med skyplot i tillegg B) slik at vinklene formet et koordinatbestemt polygon. Ved å bestemme arealet av dette polygonet, samt arealet av den totale enhetssirkelen, var det derfra mulig å utlede prosentandelen fri sikt av den totale sikten ved hver stasjon. Navnene PPP1 - PPP4 ble gitt som følger av geografisk lokasjon/tidspunkt for oppstilling og stasjonene ble gradert A - D hvor A gjengav den beste målesituasjon (god sikt = liten obstruksjon) i området og D gjengav den verste målesituasjonen (dårlig sikt = stor obstruksjon) i området:

- A - Åpent skogsterreng - 71% fri sikt (PPP4)
- B - Noe åpent skogsterreng - 62% fri sikt (PPP1)
- C - Noe tett skogsterreng - 47% fri sikt (PPP3)
- D - Tett skogsterreng - 42% fri sikt (PPP2)

Sikten i de aktuelle PPP-stasjonene ble beregnet med helningsmåler og kompass. Helningsmåleren målte i prosent, og for å konvertere dette over til grader (α) ble det brukt en enkel konverteringsformel på formen:

$$\alpha = \tan^{-1}(\%) \quad (5.1)$$

Dette ble gjort for hver PPP mottaker, og en kunne på bakgrunn av disse helningene, i bestemte retninger, danne skygge/-tildekningslaget til et skyplot. Med dette menes altså en ekstra faktor i det faktiske skyplotet hvor en ved hjelp av helningene

illustrerer de fysiske hindringene (trær, fjell m.m) som forstyrrer/blokkerer signalet. Kategoriseringen av målesituasjonen (A, B, C og D) ble videre underbygget av sikten.

5.4 Etterprosessering

5.4.1 PPP-data

Når data var samlet inn startet bearbeidingen. Som rå GPS data kom målingene inn i formatet tps. Det var derfor nødvendig å konvertere til det unverselle RINEX formatet (avsnitt 3.5) slik at det var mulig å prosessere data i den valgte programvaren. Applikasjonen Tps2rin ble benyttet, og data ble konvertert til tre RINEX-filer som inneholdt kringkastede efemerider for h.h.v GPS og GLONASS, gitt som .N - og .G-fil, sammen med en observasjonsfil O. I valget av prosesseringstjeneste ble det klart at en måtte tillegge RINEX-observasjonsfilen noe ekstra informasjon. Tjenester som den Canadiske CSRS-PPP (The Canadian Spatial Reference System - Precise Point Positioning [Canada, April 2014]) benytter seg av RINEX-formatets anvisning for antennehøyde. Antennehøyden måtte derfor påføres fila, og dette ble gjort ved editering av observasjonsfeilene. Antennekorreksjonen som ble påført var for øvrig et allerede redigert mål på avstanden fra toppen av nedsatt bolt til antennekanten, eller “slope”, og ble redigert til toppen av bolt - ARP mhp



Figur 5.2: PPP-mottakere [Kartverket, Januar 2014]

vertikalt -og horisontalt avvik (J.fr figur 3.10). RINEX-filen måtte også påføres antennenavn, antenntype og riktig måledato (måledato kommer normal på automatisk, men tps2rin programmet har noen gang hatt problemer med dette). For å forklare måleforholdene var det naturlig å lage et skyplot. Skyplottet ble produsert gjennom TOPCONs programvare “Mission planning” og gjorde det mulig å visualisere satellittenes bevegelser over definerte punkt. Dette krevde naturlig nok almanakkdata for satellittene fra perioden målingen fant sted. Her ble Blinken a.s’ Rolf Knoph igjen kontaktet, hvor han anskaffet fire timers rådatafiler fra den 7. og 8. November 2013 hentet fra en stasjon lokalisert i Etnedal, Valdres (Norge). I skyplotet ble elevasjonsgrensen satt til 10° , og resten av obstruksjonene (trær, fjell etc) ble lagt til fra data innsamlet med helningsmåleren (avsnitt 5.3).

Selve prosesseringen ble gjort med to ulike programvarer for å sikre pålitelige resultater. J.fr [Vadder, 2012] og [Abd-Elazeem et al., 2011] ble den Canadiske CSRS-PPP tjenesten benyttet, i tillegg til den norskutviklede TerraPos [TerraTec, April 2014]. CSRS er nettbasert, og krever kun RINEX-observasjonsfil, definert statisk eller kinematisk måling, et vertikalt datum og spesifisering på hvilken ramme en vil ha koordinatene i (Canadisk, nasjonalt NAD83 eller ITRF2008) for å fullføre en prosessering. Siden CSRS leverer koordinater i ITRF2008, var det nødvendig med en koordinattransformasjon. Her var det mulig å gå to veier; enten benytte seg av kartverkets transformasjonstjeneste (SKtrans), en tjeneste som per dags dato har en lisenspris på 9000kr, eller benytte TerraPos’ transformasjonsmodul. TerraPos’ transformasjon mellom ITRF2008 og EUREF89 (Epoke 1.1.89 - Norge) krever dog full lisens av TerraPos. TerraPos-lisens ble derfor anskaffet fra programvarens originale utvikler Narve Schipper Kjørsvik, ansatt ved TerraTec (firma som i dag styrer utviklingen av TerraPos). Programvaren TerraPos gir en langt større frihet rundt valg av data, blandt annet i form av egeninnlastede efemerider, klokkefiler, antennespesifikasjoner, samt til å legge inn loadingeffekter som tidejord og ocean loading. I selve prosesseringen ble det gjort en del valg. Endelige (final) efemeridedata fra IGS (International GNSS Service) ble først valgt på bakgrunn av kildens pålitelighet og endelige vektning mellom flere leverandører. Her viste det seg at IGS-data kun inneholdt efemeridedata og ikke inneholdt satellittklokkekorreksjoner for GLONASS-data, noe som betyde at kun GPS-observasjonene ble tatt i bruk. Et alternativ til igs-final ville vært ESAs (European Space Agency) data som inkluderte

disse. IGS-final ble allikevel valgt på bakgrunn av korreksjonsdataens pålitelighet og for sammenligningsgrunnlaget i lys av at CSRS-PPP kun prosesserer med igs-final.

5.4.2 RTK-data

Etter innmåling og prosessering av RTK-målingene (skjer samtidig) ble disse eksportert i KOF-format av Rolf Knoph for videre presentasjon i GIS/LINE. Data ble levert med koordinater gitt i Euref89 UTM Sone 32N koordinater, med nordkoordinat, østkoordinat og høyde jf.r det tyngdebaserte, vertikale datumet NN1954. Koordinatene ble gitt med parametre som indikerte måletidspunkt, horisontal- og vertikal RMS (root mean square), løsning (fixed eller float), antall satellitter av GPS og GLONASS og PDOP verdien. Fordi etterprosesseringen av RINEX observasjonsfilene i PPP-programvarene CSRS-PPP og TerraPos beregner koordinater i ITRF, måtte de transformeres over til den nasjonale euref89. For å kunne sammenligne referansen (les: RTK-data) med PPP-målingene var det også nødvendig å beregne en høyde som svarte til det lokale vertikale datumet for PPP-stasjonene. For å få fram denne høyden i de aktuelle punktene ble det benyttet en høydereferanseflate. I dag har vi i prinsippet to aktuelle høydereferanseflater: NN1954 og NN2000. NN2000 har vært under utvikling de siste årene og er kun tatt i bruk av de mest sentrale kommunene i landet [Kartverket, April 2014], og NN1954 ble derfor benyttet.

For selve analysen av data var det mhp “Initialiseringstiden” kun viktig å se på hvor lang tid det tok å få fixed-løsning ved hver stasjon PPP-mottakerne ble satt opp. Av de ulike teknikkene/fremgangsmåtene av DGPS som ble frontet i avsnitt 4.2 var det sanntids RTK (real time kinematic) med støtte fra karverkets CPOS-tjeneste som ble benyttet, som for etterprosesseringen betydde det at målingen og beregningen ble gjort sammen. OBSOBS: Her ble det ikke tatt en tid for hvor lang tid en måtte stå på hver av stasjonspunktene PPP1, PPP2, PPP3 og PPP4, slik at den noterte tiden her kun er et anslag av den reelle tiden det tok å få fixed for de aktuelle punktene. “Arbeid med datainnsamling”-analysen ble gjort på bakgrunn av betraktninger gjort om logistikk (i dette tilfellet lite fysisk utstyr, dog tilknytning til en abonnert tjeneste), brukervennligheten i form av å lære seg anvendelsen av måleboken og mottaker, effektiviteten ved eksportering av data og reelle kostnader

i form av tid og arbeidsinnsats i innsamling og prosessering. Sammenligningen og diskusjonen av dette blir gjort under kapittel 7.

5.5 Problemer/utfordringer

Planen var som tidligere nevnt å måle fire stasjoner i én målesesjon over én dag, nemlig torsdag 7/11. Det viste seg ved ankomst og oppsett av første mottaker torsdag, at tilstrekkelig kontrollsjekking av samtlige mottakeresker for en antennekabler ikke var gjennomført, og det var dermed kun med to antennekabler til disposisjon for målingene den dagen. Det viste seg imidlertid at Jan Bjerketvedts RTK-målinger av den totale måleruten ville ta mer enn én dag slik originelt planlagt, slik at det var innen alles interesse å returnere til Lardal den fredag 8/11 for å måle ferdig. Andre måledag var alt utstyret på plass, og måleutstyret ble satt opp på vanlig måte. Det snødde noe i det målingen PPP1 startet, men dette gav seg etter ≈ 1 time.

I det målestasjon PPP4 ble tatt ned (siste stasjon som ble pakket opp og pakket ned), ble det oppdaget at libella var sklidd ut (figur 5.3). Her var det trolig stativet som i løpet av måleperioden hadde glidd ut av posisjon. Det var også noen biler som kjørte opp og ned langs denne vegen som kan ha kommet noe for nærme stativet som var plassert i vegkanten, men det er ren spekulasjon. Når data var innsamlet ble de videre overført til datamaskin i et .tps format. Dette formatet lot seg konvertere til RINEX med programvaren tps2rin. I konverteringen fikk en i første omgang data oppgitt med tidsstempelet ".88 på noen av stasjonene, en vanlig produktfeil TOPCON har som kommer fram om en etterprosesserer data med eldre versjoner av tps2rin. Dette ble løst ved regiering av RINEX-fila som beskrevet over.

Ved dannelse av skyplot i TOPCONs "Mission Planning" ble det problemer i påføringen av obstruksjoner tatt fra elevasjonsvinklene. Her ville programmet danne et obstruksjonspolygon for arealet innenfor elevasjonsvinklene (f.eks fra 90° - 37° i stedet for 0° - 37°), og derfor danne et invertert skyplot . Løsningen ble at plottet av polygonet ble dannet ved å markere rundt hele enhetssirkelen før det ble skjært innover og elevasjonsgrensene ble markert. Som resultat av dette er samtlige

ge skyplot presentert med et lite glippe i nord, dog er dette ikke kritisk (så lenge leser er underforstått med dette) for resultatene i oppgaven grunnet at skyplotet kun er med for den visuelle fremstillingen av målesituasjonen (skyplot er fremstilt i tillegg B).

5.6 Forventninger

Med forsøket som har blitt gjort forventes en degraderende målenøyaktighet i takt med skogstettheten. Initialiseringstiden forventes også å forlenges i takt med skogstettheten, dog ikke til så lenge at denne ikke detekteres i løpet av den totale måletidene på mellom 3 og 6 timer.



Figur 5.3: PPP4, libelle indikerte at stativet var sklidd ut

Kapittel 6

Resultat

I dette kapittelet vil valgene rundt hvilke resultater som blir lagt fram, samt resultater i form av grafer og tabeller bli presentert. Analyse, kommentarer og diskusjon av resultatene vil bli gjennomgått i kapittel 7.

6.1 PPP ved degraderte forhold

For å få fram hvor godt Precise point positioning beregner posisjonen til de utvalgte punktene A, B, C og D er det viktig å se på nøyaktigheten for de endelige beregningene, både i form av estimerte standardavvik gitt av prosesseringstjenestene og faktiske avvik mellom prosessert punkt og referanse. Et mål av initialiseringstiden er også beskrivende for å anslå hvor lenge en må vente for å få den nøyaktigheten en ønsker. Dog mottakerne målte over samme tidsrom, ble de satt opp ved ulike tidspunkt og med ulik total loggetid. Inndelingen av data ble derfor gjort etter målestart for hver enkelt sesjon, og ikke etter et felles bestemt tidspunkt. Dette betyr at inndelingen på 10 minutt, 15 minutt, 30 minutt, 1 time, 2 timer, 3 timer, 4 timer 5 timer og 6 timer refererer til beregnet posisjon ved oppgitt tid etter start, for den bestemte mottakeren, slik at kun første segment av hver datafil er benyttet.

Med hensyn til kategoriseringen av skogstettheter framlagt i kapittel 5 blir nøyaktigheten og initialiseringstiden presentert med stasjon/gradering, hvor som nevnt

Tabell 6.1: Elevasjonsvinkler i grader over horisonten i åtte himmelretninger for hver stasjon/gradering

Elevasjonsvinkler								
Stasjon/gradering	N	NØ	Ø	SØ	S	SV	V	NV
PPP1/B	37	13	34	43	16	20	20	36
PPP2/D	44	51	56	29	41	43	40	24
PPP3/C	45	38	26	3	2	65	48	60
PPP4/A	27	12	1	13	27	24	19	20

A er åpent terreng og D er tett skog. Kategoriseringen er valgt på bakgrunn av en vurdering av sikten/grad av terrestrisk obstruksjon ved mottaker, gitt med elevasjonsvinkler og presentert i tabell 6.1. For å få fram en mer intuitiv framstilling blir elevasjonsvinklene i de åtte himmelretningene projisert ned fra himmelhvelvet til punkt i et plan (se tabell 6.2). Arealet til polygonet disse åtte punktene utformer beregnes med formelen for areal av et lukket polygon [Wikipedia.org, Mai 2014]:

$$A = \frac{1}{2} \sum (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (6.1)$$

hvor A er areal, Σ er sum, x og y er punktenes koordinatverdier og i er punktnummeret i rekken. Gjennom ligning 6.1 kan det dannes en foreklet beraktning (ville ideelt beregnet arealet mhp en kule som forklarer hele himmelhvelvet) av andelen fri sikt av den totale sikten (sikt med 0° elevasjonsvinkel for forstyrrelser i alle retninger) ved hver stasjon for å videre se på hvor stor andel arealet dekker i forhold til det totale arealet av sirkelen, hvor r er radiusen til enhetssirkelen (presentert i tabell 6.2 og figur 6.1). Sikten, i form av %, er presentert i tabell 6.3.

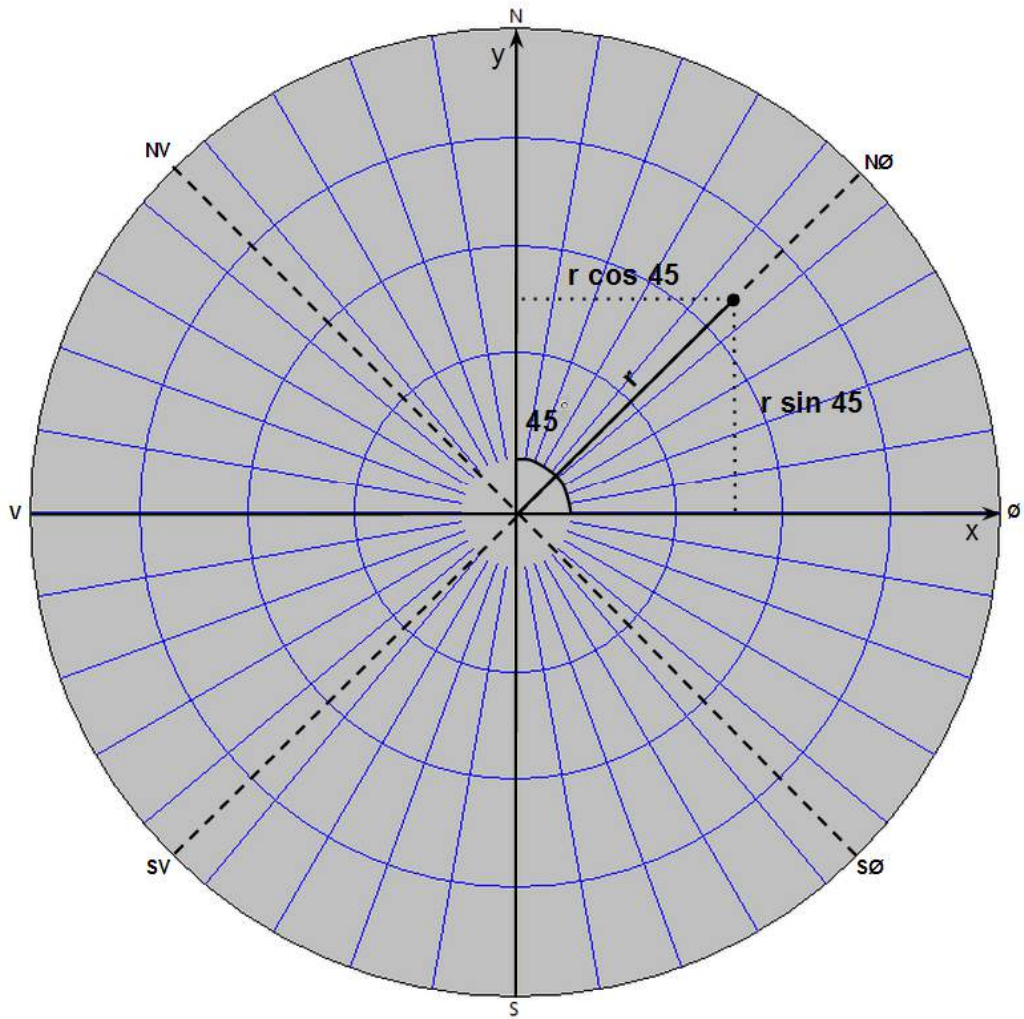
Som et resultat av ulike måleforhold blir satellittkonstellasjonen forskjellig fra stasjon til stasjon, dette gjenspeiler seg i antall satellitter og DOP-verdiene presentert i figur 6.2, figur 6.3, figur 6.4 og figur 6.5. I figurene (hentet fra TerraPos) for DOP er blå linje PDOP, rød linje er HDOP, grønn linje er VDOP, gule horisontale linjer er reparerte fasebrudd og rosa vertikale linjer er ureparerte fasebrudd.

Tabell 6.2: Projisering av punkt fra elevasjonsvinkler til plan hvor N, NØ, Ø, SØ, S, SV, V og NV er elevasjonsvinkelen ved aktuell himmelretningene gitt i grader, r er bestemt radius til enhetssirkelen og første punkt p1 er bestemt i nord og videre beraktninger med klokken 45° fra hverandre

Punkt/retning	x	y
p1/Nord	0	$r \times \cos N$
p2/Nord-øst	$\cos 45 \times \cos NØ$	$\cos 45 \times \cos NØ$
p3/Øst	$r \times \cos Ø$	0
p4/Sør-øst	$\cos 45 \times \cos SØ$	$\cos 45 \times \cos SØ$
p5/Sør	0	$r \times \cos S$
p6/Sør-vest	$\cos 45 \times \cos SV$	$\cos 45 \times \cos SV$
p7/Vest	$r \times \cos V$	0
p8/Nord-vest	$\cos 45 \times \cos NV$	$\cos 45 \times \cos NV$

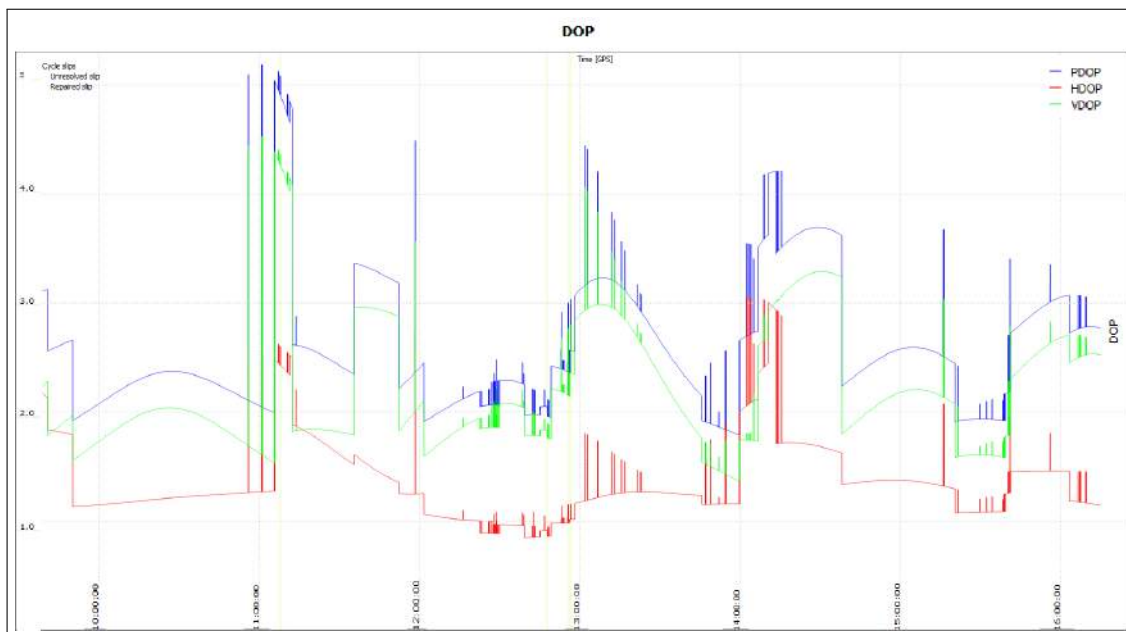
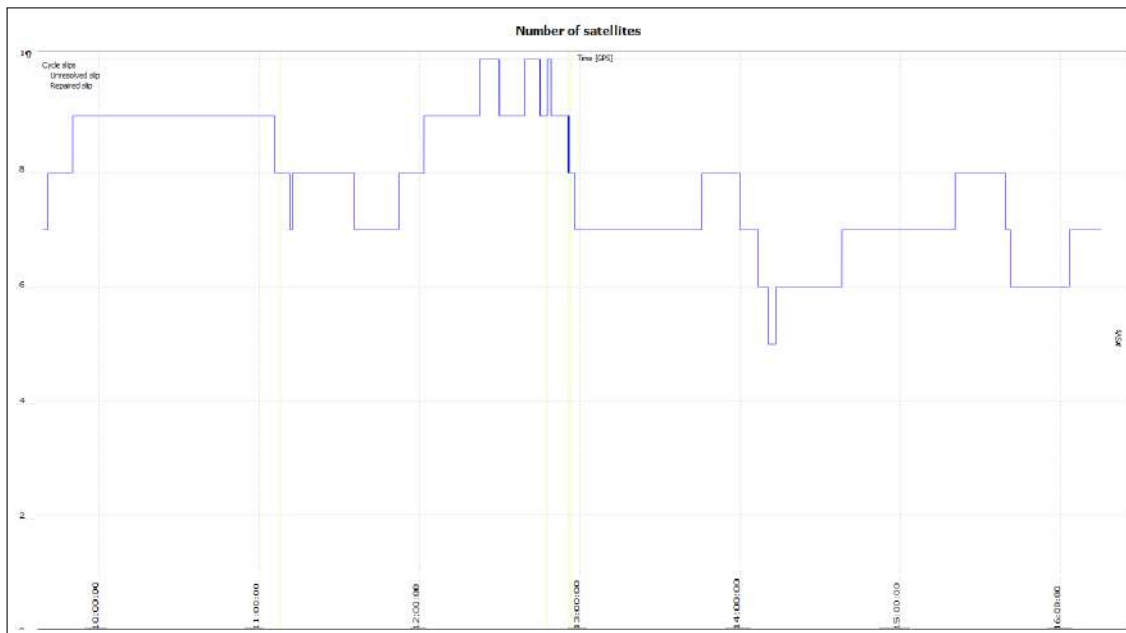
Tabell 6.3: % fri sikt i forhold til total fri sikt med elevasjonsvinkler for forstyrrelser på 0° i alle retninger, videre illustrert med skyplot i tillegg B

Stasjon/gradering	Fri sikt %
PPP1/B	62
PPP2/D	42
PPP3/C	47
PPP4/A	71

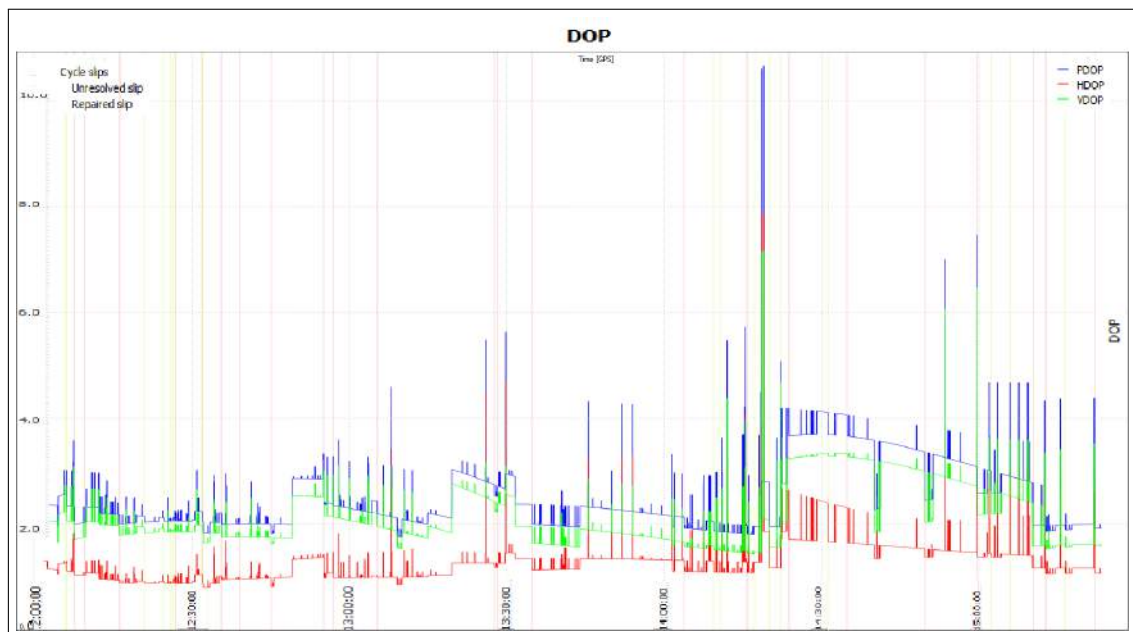
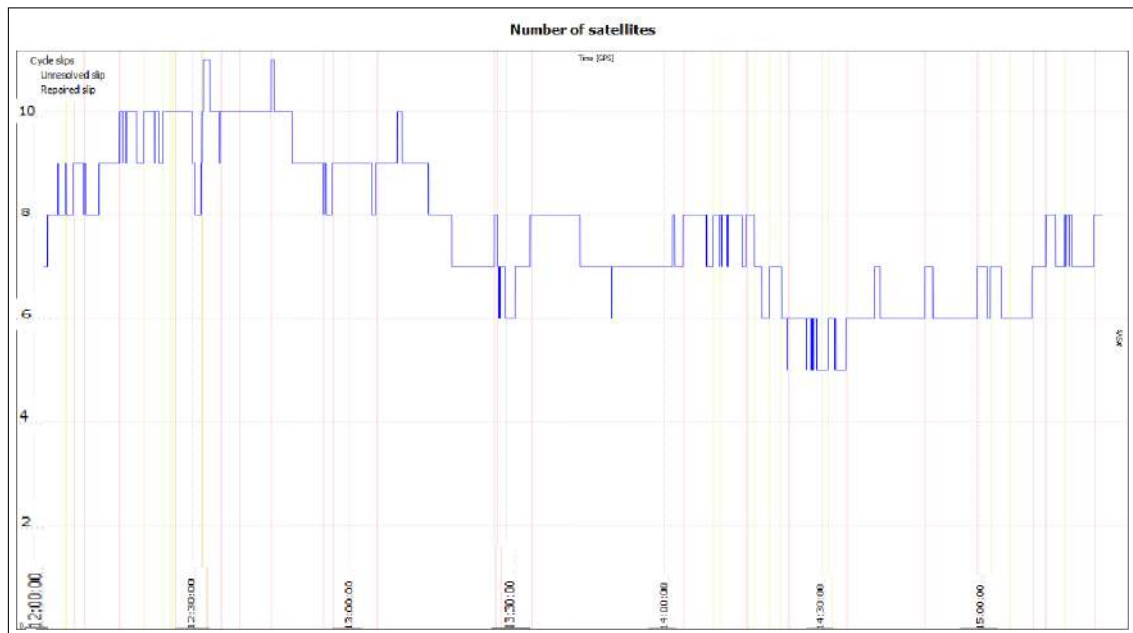


Figur 6.1: Illustrasjonen av projisering fra elevasjonsvinkler til lukket polygon

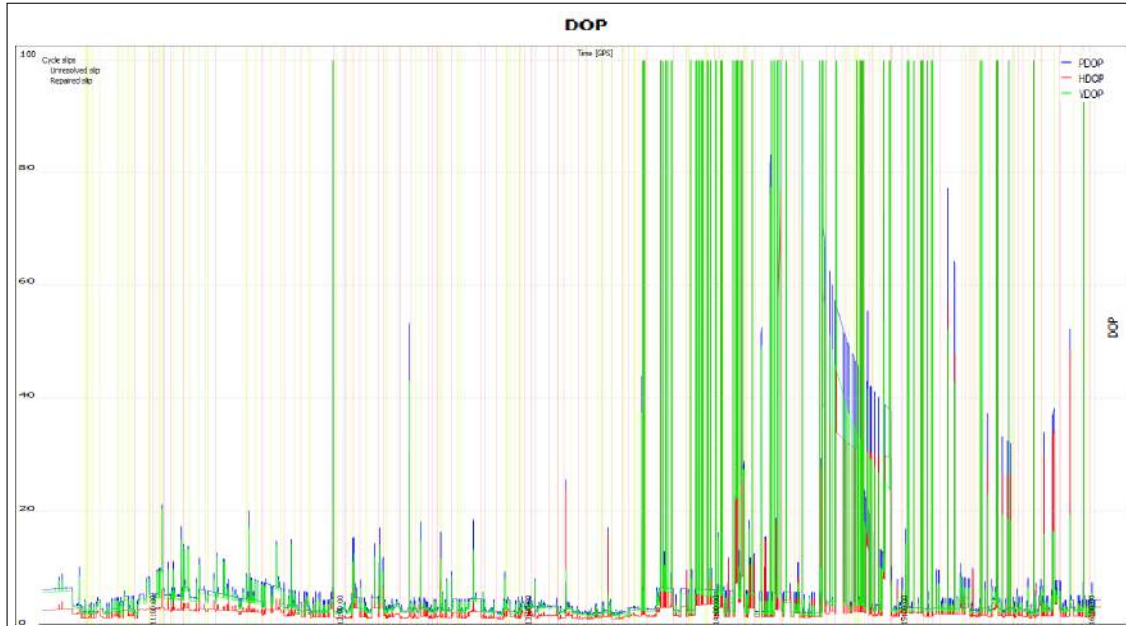
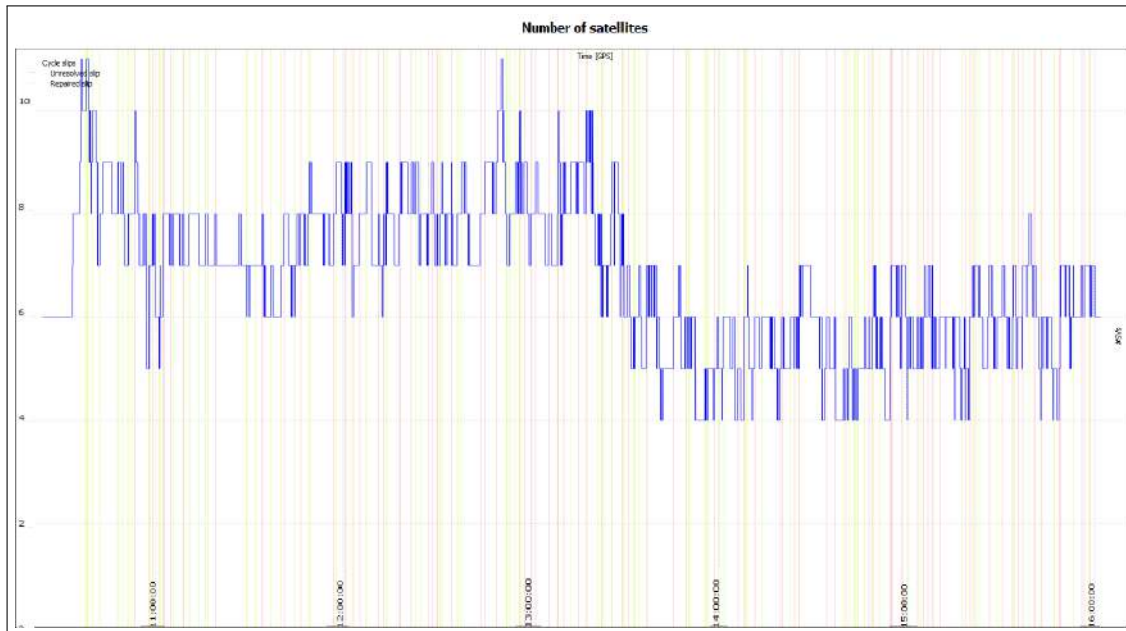
Figur 6.2: Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP4 med gradering A beregnet med TerraPos



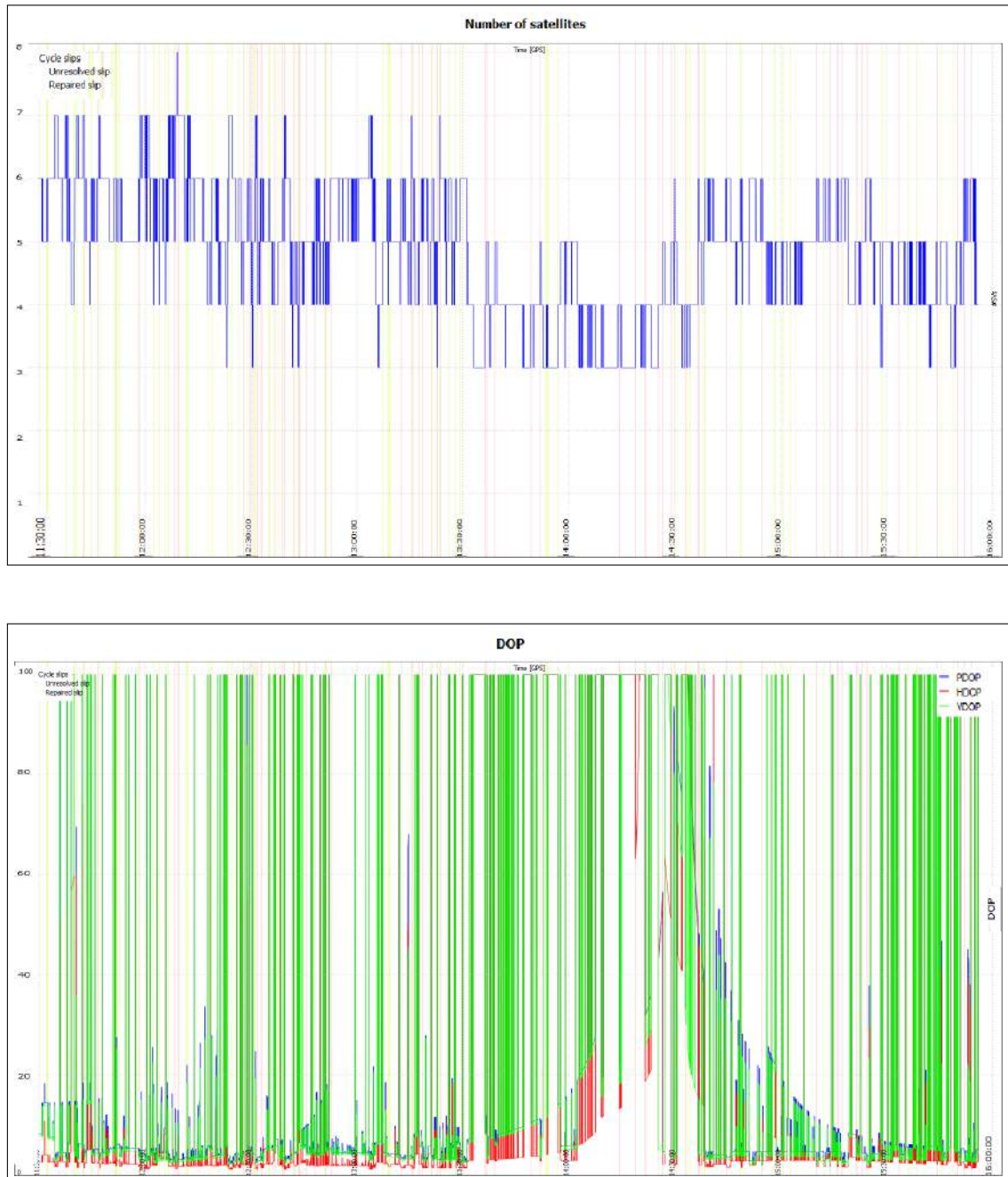
Figur 6.3: Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP1 med gradering B beregnet med TerraPos



Figur 6.4: Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP3 med gradering C beregnet med TerraPos



Figur 6.5: Antall satellitter og Dilution of precision for stasjon PPP2 med gradering D beregnet med TerraPos



6.1.1 Nøyaktighet

Nøyaktigheten av målingene for de fire stasjonene ble som nevnt gradert med hensyn på formelle feil mellom prosessert posisjon og referanseposisjonen målt med RTK, og det estimerte standardavviket gitt av prosesseringstjenestene TerraPos og CSRS-PPP. Referansen er RTK-målinger gjort før og etter start av målesesjon for hver PPP-mottaker (tabell 6.4). RTK-målingene ble gitt i Euref89-koordinater (ITRF epoke 1.1.1989) med UTM sone 32 Nord (se tabell tabell 6.5). Høydekoordinaten refererer til NN1954 og er realisert gjennom høydereferanseflaten (H_{REF}). Fordi innmåling av punktene ble gjort med stativ som målte skråavstand til antennehøyden, måtte dette korrigeres for j.fr avsnitt 3.2.6. For PG-A1-antennene var avvikene 27,5mm vertikalt og 69mm horiontalt [TOPCON, Mai 2014b]. Disse ble korrigert for og vertikalhøyde relativt ARP ble påført RINEX-dokumentene før beregning.

Tabell 6.4: Midling av innmålte RTK-CPOS punkt før og etter målesesjon, med innmåling 7/11- og 8/11-2013

Stasjon/dato	Klokkeslett	N	E	H_REF	δN	δE	δH_{REF}
PPP1 7/11	10:45:38	6580093,296	549621,434	335,378			
					0,034	0,040	0,015
PPP1 7/11	17:27:35	6580093,262	549621,394	335,363			
PPP2 7/11	12:10:25	6578740,252	549622,439	290,121			
OBS:Datoskifte					0,043	0,073	0,203
PPP2 8/11	11:36:16	6578740,209	549622,366	290,324			
PPP3 8/11	10:45:28	6578508,462	550154,739	204,371			
					0,019	0,042	0,011
PPP3 8/11	17:22:44	6578508,481	550154,781	204,36			
PPP4 8/11	10:20:35	6578646,868	550082,013	185,313			
					0,017	0,014	0,019
PPP4 8/11	17:27:32	6578646,851	550081,999	185,294			

Terrapos

For beregninger gjort i TerraPos er prgrammets interne funksjon for anvendelse av høydereferansemodeller benyttet. Dette betyr at det er mulig å få ut både ellipsoidisk høyde og høyde etter referansemodell NN1954 for det prosesserte punktet.

Tabell 6.5: Vektet middel av referansekoordinatene gitt i EUREF89 UTM sone 32N for horisontale koordinater med høydekoordinat i forhold til NN1954

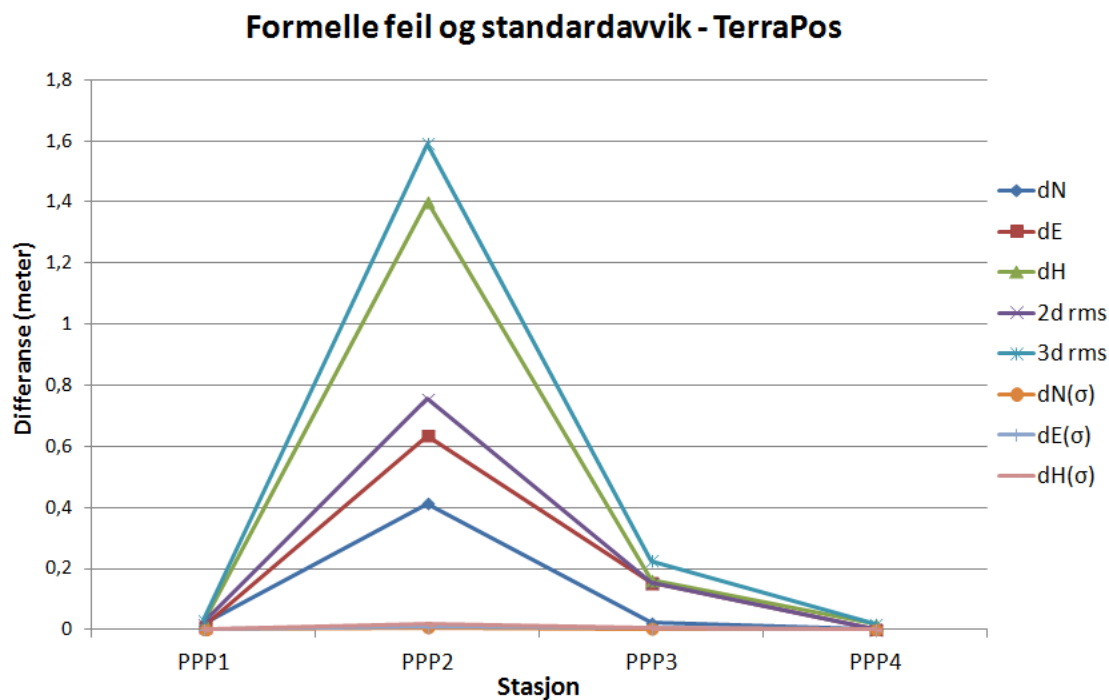
RTK						
Stasjon	N	E	H_REF	HRMS	VRMS	PDOP
PPP1	6580093,268	549621,405	335,375	0,014	0,023	1,955
PPP2	6578740,209	549622,366	290,324	0,018	0,026	2,651
PPP3	6578508,471	550154,748	204,356	0,008	0,013	1,918
PPP4	6578646,855	550082,005	185,302	0,01	0,014	2,178

Det estimerte avviket for hver stasjon (tabell 6.6) er derfor representativt for forskjellen mellom høydereferanseflaten og ellipsoiden for det aktuelle punktet i både TerraPos' beregninger og i CSRS' beregninger. Det ble beregnet både reelle avvik

Tabell 6.6: Avviket mellom ellipsoidisk høyde og høydereferanseflaten beregnet med TerraPos etter høydereferansemodellen NN1954

Stasjon	H_ell	H_REF	dH
PPP1	376,239	335,398	40,841
PPP2	329,747	288,924	40,823
PPP3	244,989	204,192	40,797
PPP4	226,122	185,320	40,802

(formelle feil) mellom de prosesserte koordinatene og referansekoordinatene. Samtidig ble de prosesserte dataene gitt med standardavvik (σ) i alle koordinataksler. Figur 6.6 illustrerer forskjellen mellom de oppgitte standardavvikene og de faktiske avvikene. Hvor dN, dE og dH er det formelle avviket, gitt med 2d rms og 3d rms, og dN(σ), dE(σ) og dH(σ) er standardavvikene gitt av prosesseringstjenestene. Den vertikaleaksen representerer differansen, som for dN, dE og dH er differansen mellom prosesserte koordinater og referansen, og for dN(σ), dE(σ) og dH(σ) er størrelsen på det oppgitte standardavviket. Fordi feilbidraget fra stasjon PPP2 er stort blir noen kontraster på lavere nivå borte, disse kommer fram i tabell 6.7 som beskriver samme forhold.



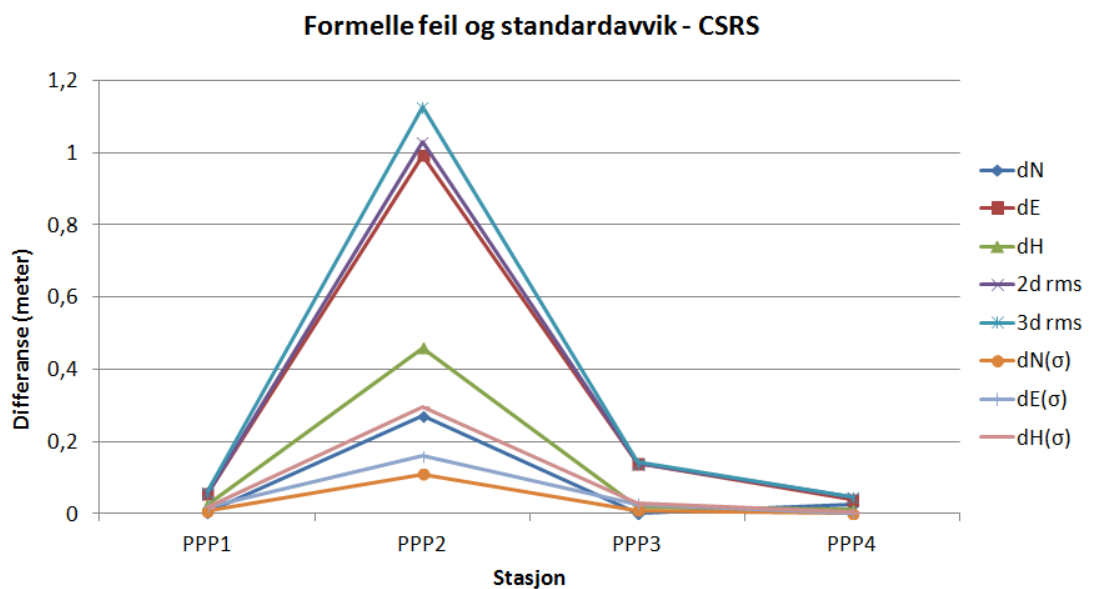
Figur 6.6: Visualisering av differansen mellom beregnede data og referansedata, 2d- og 3d rms, og oppgitte standardavvik av TerraPos for de fire stasjonene

Tabell 6.7: Tabell for det formelle avviket mellom prosesserte koordinater og referansen, 2d rms og 3d rms og oppgitt standardavvik for de prosesserte koordinatene for de fire stasjonene med enhet meter

TerraPos								
Stasjon/Grad	dN	dE	dH	2d rms	3d rms	dN(σ)	dE(σ)	dH(σ)
PPP1/B	0,021	0,010	0,023	0,0232	0,0326	0,0007	0,0019	0,0018
PPP2/D	0,413	0,635	1,400	0,757	1,5916	0,0064	0,0099	0,0196
PPP3/C	0,021	0,154	0,164	0,1555	0,226	0,0028	0,0068	0,0076
PPP4/A	0,0002	0,002	0,018	0,0017	0,0181	0,0002	0,0004	0,0007

CSRS-PPP

CSRS-PPP gir som tidligere nevnt posisjoner basert på ITRF08 referanserammen. Fordi referansen er presentert i EUREF89 epoke 1.1.1989, transformeres derfor CSRS-koordinatene over til denne rammen ved hjelp av TerraPos' transformeringsverktøy. Videre gir CSRS ellipsoidisk høyde uten korrigeringsmuligheter for høydereferanseflaten, altså er høyden over NN1954 (H_REF) ikke med i beregningen. For å få fram H_REF beregnes avviket i TerraPos (tabell 6.6) og påføres CSRS-ellipsoidisk høyde. Samtlige beregnede punkt kommer med standardavvik, og dette, med avvik fra referansen, er presentert i figur 6.7. De beregnede punktene er også fremstilt som tallverier i tabell 6.8.



Figur 6.7: Visualisering av differansen mellom beregnede data og referansedata, 2d- og 3d rms, og oppgitte standardavvik av CSRS for de fire stasjonene

Tabell 6.8: Tabell for det formelle avviket mellom prosesserte koordinater og referansen, 2d rms og 3d rms og oppgitt standardavvik for de prosesserte koordinatene for de fire stasjonene i enhet meter

CSRS								
Stasjon/Grad	dN	dE	dH	2d rms	3d rms	dN(σ)	dE(σ)	dH(σ)
PPP1/B	0,004	0,058	0,025	0,0578	0,0627	0,0075	0,0205	0,019
PPP2/D	0,270	0,993	0,460	1,0291	1,1273	0,1095	0,1595	0,2975
PPP3/C	0,003	0,141	0,019	0,1406	0,1419	0,0095	0,027	0,0305
PPP4/A	0,025	0,039	0,012	0,0460	0,0476	0,0015	0,003	0,0065

6.1.2 Initialiseringstid

Videre analyse gjøres ved å se hvordan avviket mellom de beregnede koordinatene til stasjonene konvergerer med tiden. Tidsstemplene 10 min, 15 min, 30 min og 1-6 timer gjenspeiler prosesseringens beregnede koordinater etter målestart. Fordi alle stasjoner ble satt opp ved ulike tidspunkt, og har ulik målelengde, er ikke målesituasjonen helt lik for alle selv om de totale målesesjonene overlapper (tabell 6.9)

Tabell 6.9: Tid for start og slutt av måling den 08/11-13 for de ulike stasjonene, hvor Mål-Start/Mål-Slutt indikerer klokkeslett og Måletid indikerer målesesjonens varighet gitt i timer, minutter og sekunder

Stasjon	Mål-Start	Mål-Slutt	Måletid
PPP1	12:01:52	15:23:19	03:21:27
PPP2	11:27:43	15:55:59	04:28:16
PPP3	10:24:00	16:01:45	05:37:45
PPP4	09:39:08	16:14:51	06:35:43

TerraPos

I TerraPos ble samtlige punkt beregnet med avvik dN, dE, dH, 2d rms og 3d rms i forhold til referansen i tabell 6.5. Tabell 6.10, tabell 6.11, tabell 6.12 og tabell 6.13 viser avvikene i gradert rekkefølge. Av disse ble initialiseringstiden visualisert og plottet både i grunnriss (figur 6.8) og i høyde (figur 6.9). Grafene går fram til siste time før endelig måletid, altså 3 timer for PPP1/B, 4 timer for PPP2/D, 5 timer for PPP3/C og 6 timer før PPP4/A, før disse avsluttes som et punkt under Tidsaksen som "Full".

Tabell 6.10: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt A, stasjon PPP4

Gradering A/Stasjon PPP4 - TerraPos								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578646,931	550081,85	185,453	-0,076	0,155	-0,151	0,172	0,229
15min	6578646,907	550081,845	185,404	-0,052	0,160	-0,102	0,168	0,197
30min	6578646,883	550081,991	185,365	-0,028	0,014	-0,063	0,032	0,070
1t	6578646,878	550082,004	185,322	-0,023	0,0007	-0,020	0,023	0,030
2t	6578646,867	550082,004	185,324	-0,012	-0,035	-0,022	0,037	0,043
3t	6578646,863	550082,037	185,322	-0,008	-0,032	-0,020	0,033	0,039
4t	6578646,853	550082,003	185,337	0,002	0,002	-0,035	0,002	0,035
5t	6578646,854	550082,004	185,327	0,0009	0,0007	-0,025	0,001	0,025
6t	6578646,854	550082,005	185,326	0,001	0,0001	-0,024	0,001	0,024
Full	6578646,855	550082,007	185,32	0,0002	-0,002	-0,018	0,002	0,018

Tabell 6.11: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt B, stasjon PPP1

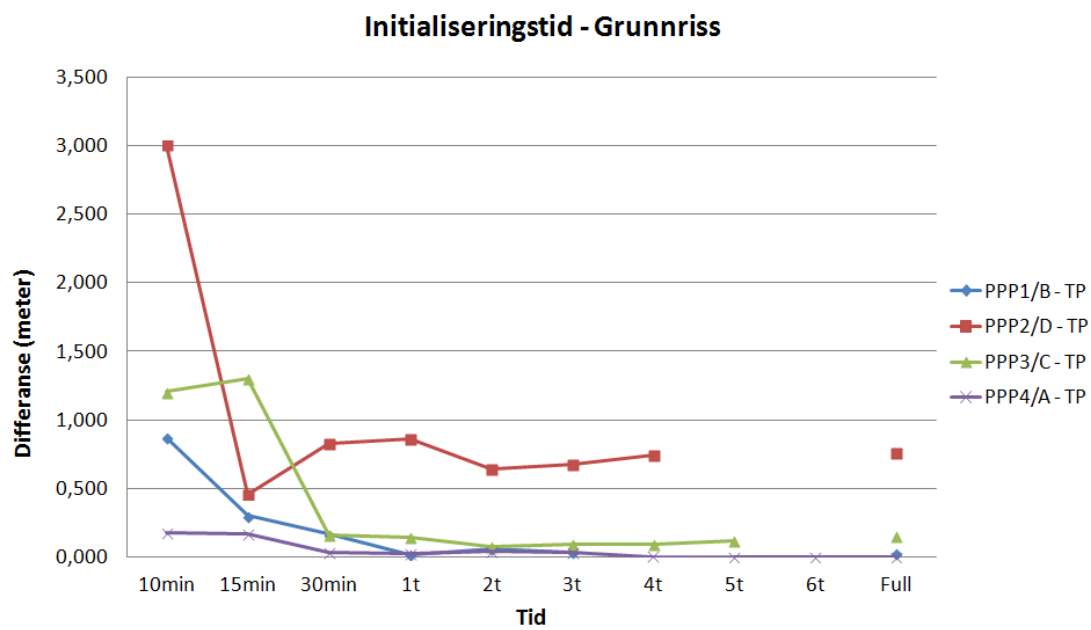
Gradering B/Stasjon PPP1 - TerraPos								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6580093,399	549622,263	335,809	-0,131	-0,858	-0,434	0,868	0,970
15min	6580093,275	549621,705	335,932	-0,007	-0,300	-0,557	0,300	0,633
30min	6580093,254	549621,569	335,533	0,014	-0,164	-0,158	0,164	0,228
1t	6580093,251	549621,414	335,433	0,017	-0,009	-0,058	0,019	0,061
2t	6580093,246	549621,351	335,447	0,022	0,054	-0,072	0,059	0,093
3t	6580093,237	549621,391	335,416	0,031	0,014	-0,041	0,034	0,053
Full	6580093,247	549621,415	335,398	0,021	-0,010	-0,023	0,023	0,033

Tabell 6.12: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt C, stasjon PPP3

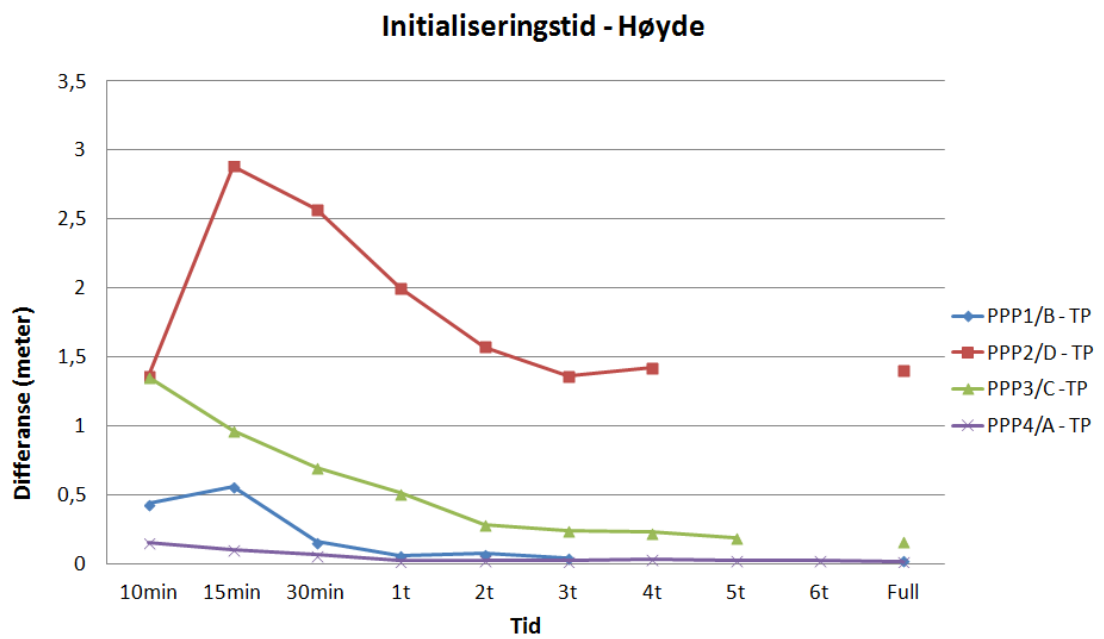
Gradering C/Stasjon PPP3 - TerraPos								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578507,89	550153,692	203,004	0,581	1,056	1,352	1,205	1,811
15min	6578507,867	550153,597	203,388	0,604	1,151	0,968	1,300	1,620
30min	6578508,407	550154,603	203,657	0,065	0,145	0,699	0,159	0,717
1t	6578508,381	550154,635	203,843	0,090	0,113	0,513	0,144	0,533
2t	6578508,439	550154,816	204,07	0,032	-0,068	0,286	0,075	0,296
3t	6578508,44	550154,835	204,115	0,031	-0,087	0,241	0,093	0,258
4t	6578508,437	550154,837	204,129	0,034	-0,089	0,227	0,095	0,246
5t	6578508,441	550154,865	204,168	0,030	-0,117	0,188	0,121	0,223
Full	6578508,45	550154,902	204,192	0,021	-0,154	0,164	0,155	0,226

Tabell 6.13: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt D, stasjon PPP2

Gradering D/Stasjon PPP2 - TerraPos								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578738,94	549619,644	288,965	1,269	2,723	1,359	3,004	3,297
15min	6578739,752	549622,364	287,44	0,457	0,002	2,884	0,457	2,920
30min	6578739,557	549621,864	287,753	0,652	0,502	2,571	0,824	2,700
1t	6578739,743	549623,09	288,327	0,466	-0,724	1,997	0,861	2,175
2t	6578739,639	549622,665	288,752	0,570	-0,299	1,572	0,643	1,699
3t	6578739,654	549622,752	288,961	0,555	-0,386	1,363	0,676	1,521
4t	6578739,797	549622,98	288,901	0,412	-0,614	1,423	0,740	1,604
Full	6578739,796	549623,001	288,924	0,413	-0,635	1,400	0,757	1,592



Figur 6.8: Initialiseringstid i grunnriss, beregnet i TerraPos, for de fire stasjonene/gradingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



Figur 6.9: Initialiseringstid i høyde, beregnet i TerraPos, for de fire stasjonene/graderingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen

CSRS-PPP

I likhet med TerraPos er referansen for de CSRS-prosesserte punktene RTK-målingene i tabell 6.5. Samtlige punkt transformeres fra ITRF08 til Euref89 epoke 1.1.1989, og H_REF blir beregnet på bakgrunn av avviket mellom ellipsoidisk høyde og H_REF beregnet i TerraPos (se tabell 6.6). Initialiseringstiden kommer fram i tabell 6.14 - tabell 6.17 og illustreres videre i figur 6.10 og figur 6.11

Tabell 6.14: Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt A, stasjon PPP4

Gradering A/Stasjon PPP4 - CSRS								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578646,919	550081,974	185,3851	-0,064	0,031	-0,083	0,071	0,110
15min	6578646,923	550082,012	185,3691	-0,068	-0,007	-0,067	0,068	0,096
30min	6578646,885	550081,997	185,3631	-0,030	0,008	-0,061	0,031	0,069
1t	6578646,892	550082,033	185,3311	-0,037	-0,028	-0,029	0,046	0,055
2t	6578646,886	550082,055	185,3351	-0,031	-0,050	-0,033	0,059	0,067
3t	6578646,886	550082,055	185,3211	-0,031	-0,050	-0,019	0,059	0,062
4t	6578646,880	550082,048	185,3221	-0,025	-0,043	-0,020	0,049	0,053
5t	6578646,883	550082,049	185,3121	-0,028	-0,044	-0,010	0,052	0,053
6t	6578646,880	550082,043	185,3161	-0,025	-0,038	-0,014	0,045	0,047
Full	6578646,880	550082,044	185,3141	-0,025	-0,039	-0,012	0,046	0,048

Tabell 6.15: Prosesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt B, stasjon PPP1

Gradering B/Stasjon PPP1 - CSRS								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6580093,412	549621,502	336,306	-0,144	-0,097	-0,931	0,174	0,947
15min	6580093,358	549621,435	335,993	-0,090	-0,030	-0,618	0,095	0,625
30min	6580093,364	549621,610	335,516	-0,096	-0,205	-0,141	0,226	0,266
1t	6580093,294	549621,515	335,397	-0,026	-0,110	-0,022	0,113	0,115
2t	6580093,269	549621,462	335,403	-0,001	-0,057	-0,028	0,057	0,063
3t	6580093,269	549621,454	335,403	-0,001	-0,049	-0,028	0,049	0,056
Full	6580093,272	549621,463	335,400	-0,004	-0,058	-0,025	0,058	0,063

Tabell 6.16: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt C, stasjon PPP3

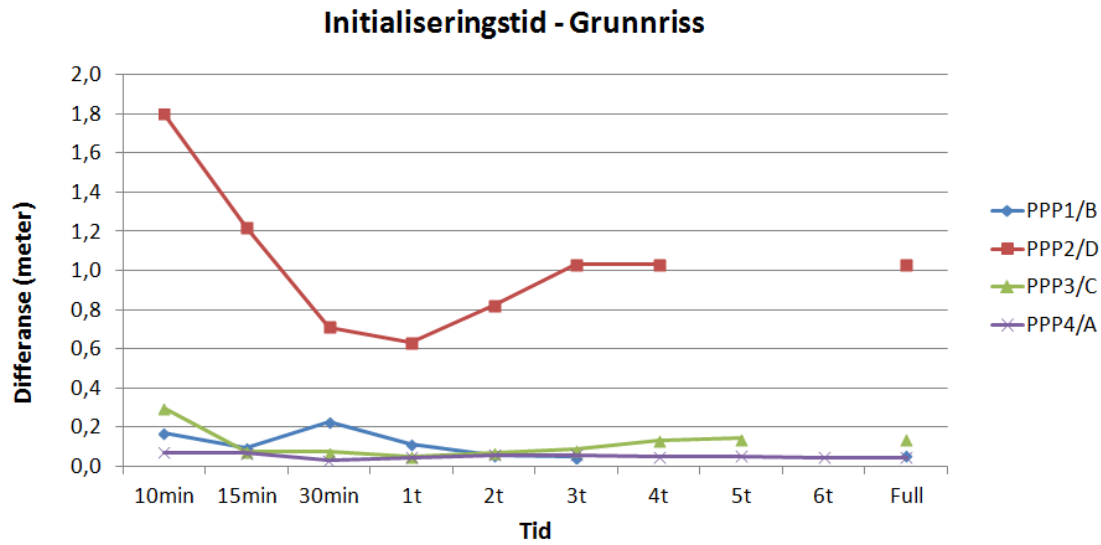
Gradering C/Stasjon PPP3 - CSRS								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578508,385	550154,465	204,448	0,086	0,283	-0,092	0,296	0,310
15min	6578508,426	550154,809	203,882	0,045	-0,061	0,474	0,075	0,480
30min	6578508,420	550154,800	203,933	0,051	-0,052	0,423	0,072	0,429
1t	6578508,419	550154,754	204,332	0,052	-0,006	0,024	0,052	0,057
2t	6578508,448	550154,815	204,372	0,023	-0,067	-0,016	0,070	0,072
3t	6578508,451	550154,833	204,368	0,020	-0,085	-0,012	0,087	0,088
4t	6578508,471	550154,884	204,349	0,000	-0,136	0,007	0,136	0,136
5t	6578508,471	550154,891	204,371	0,000	-0,143	-0,015	0,143	0,143
Full	6578508,468	550154,889	204,375	0,003	-0,141	-0,019	0,141	0,142

Tabell 6.17: Prossesserte koordinater ved bestemt tid etter målestart med reelle avvik fra referansen for graderingspunkt D, stasjon PPP2

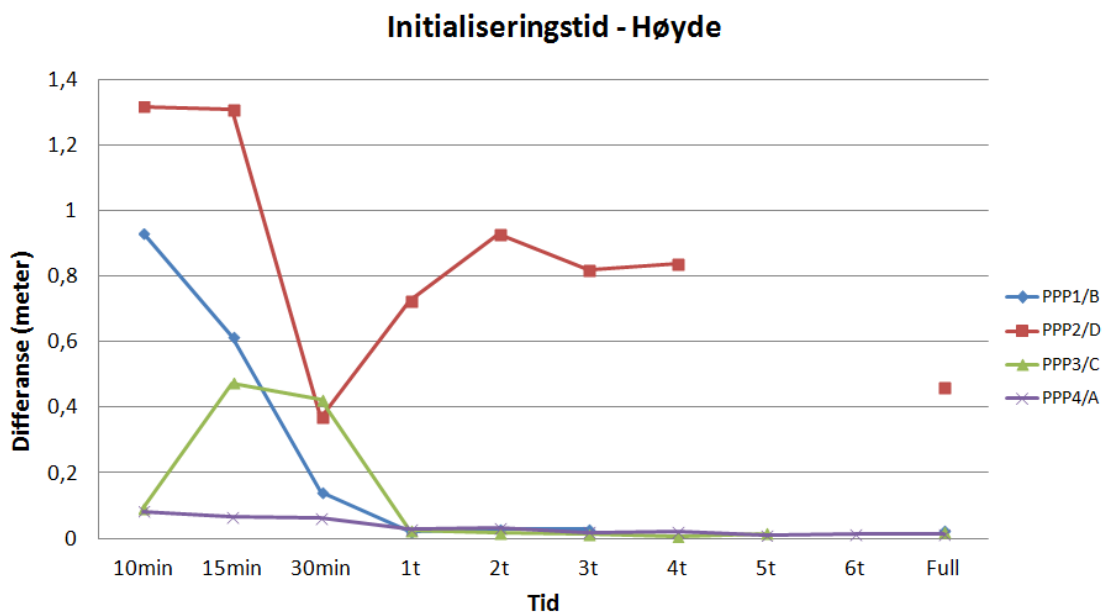
Gradering D/Stasjon PPP2 - CSRS								
Tid	N	E	H	dN	dE	dH	2d rms	3d rms
10min	6578738,484	549620,788	291,642	1,287	1,259	-1,318	1,800	2,231
15min	6578738,718	549621,433	291,632	1,053	0,614	-1,308	1,219	1,788
30min	6578739,293	549622,574	289,955	0,478	-0,527	0,369	0,711	0,802
1t	6578739,593	549622,593	291,051	0,314	-0,546	-0,727	0,630	0,962
2t	6578739,634	549622,856	291,254	0,137	-0,809	-0,930	0,821	1,240
3t	6578740,008	549623,053	291,142	-0,237	-1,006	-0,818	1,034	1,318
4t	6578740,008	549623,048	291,163	-0,237	-1,001	-0,839	1,029	1,327
Full	6578740,041	549623,040	289,864	-0,270	-0,993	0,460	1,029	1,127

6.1.3 TerraPos vs. CSRS

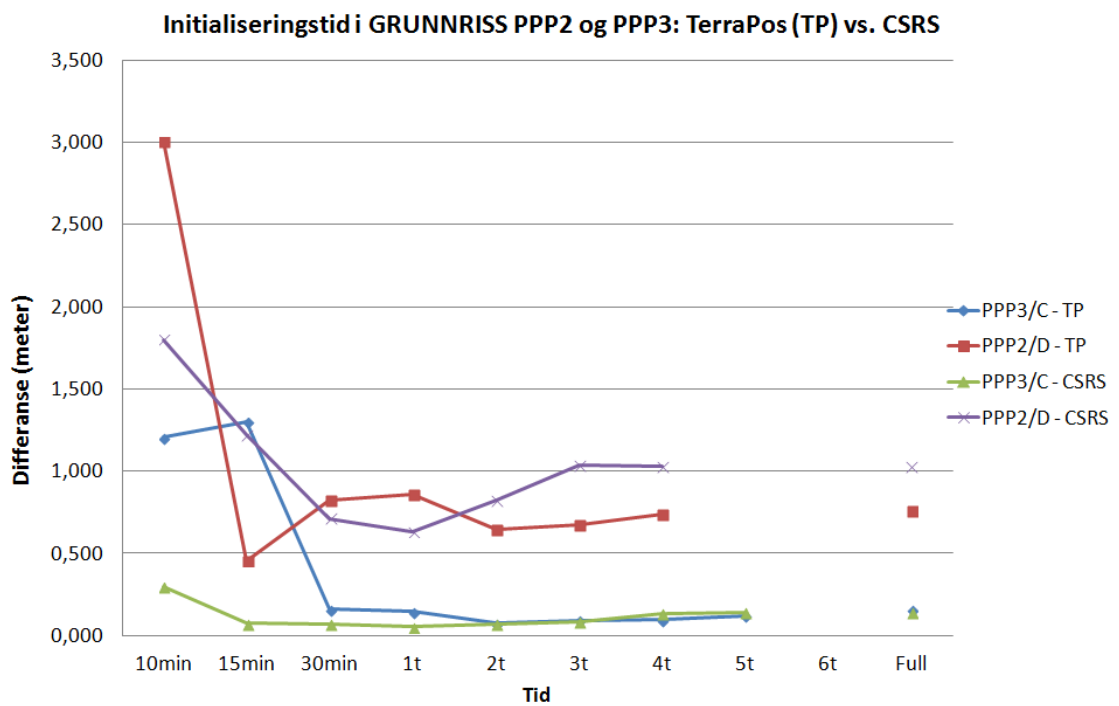
For å visualisere forskjellen mellom de to prosesseringsteknikkene ble grafene fra TerraPos og CSRS for initialiseringstid slått sammen. Fordi avvikene for PPP2 og PPP3 var signifikant større enn PPP1 og PPP4, ble disse fremstilt i to forskjellige grafer og i to sett: Grunnriss og høyde (figur 6.12 - figur 6.15).



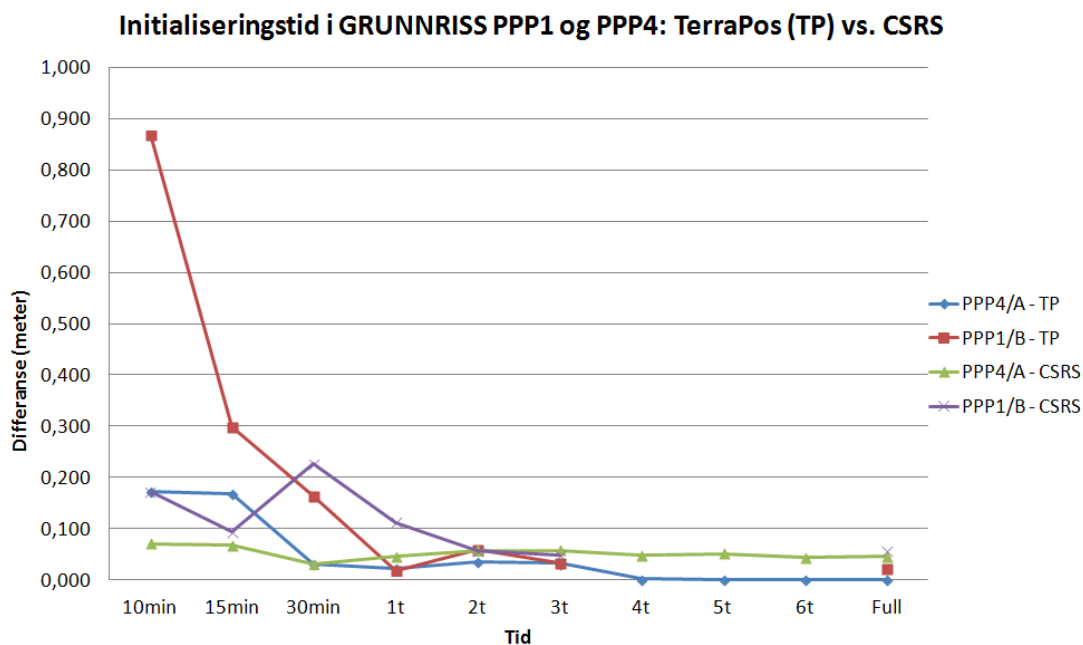
Figur 6.10: Initialiseringstid i grunnriss, beregnet i CSRS, for de fire stasjonene/gradingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



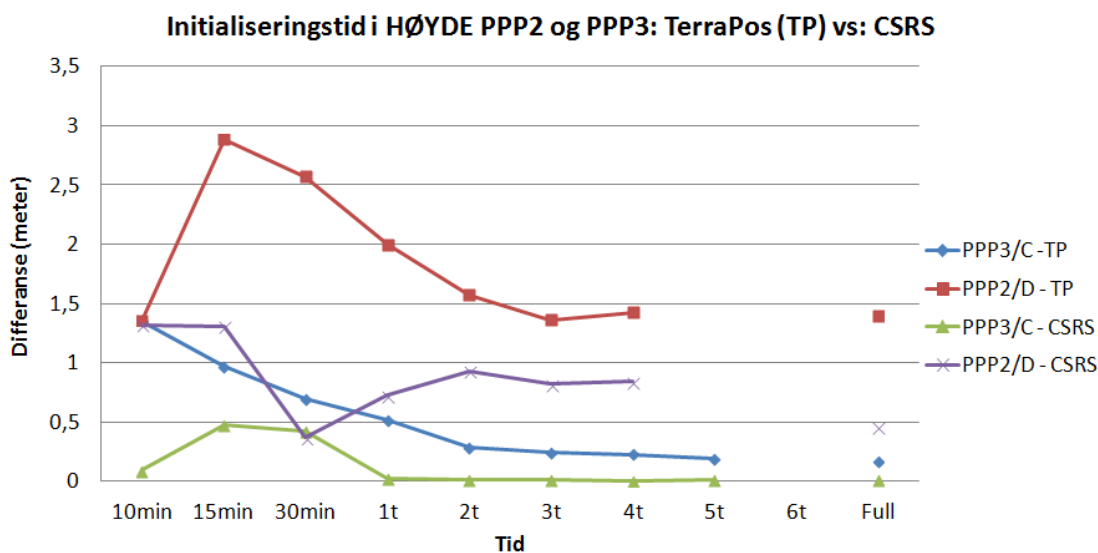
Figur 6.11: Initialiseringstid i høyde, beregnet i CSRS, for de fire stasjonene/gradingene hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



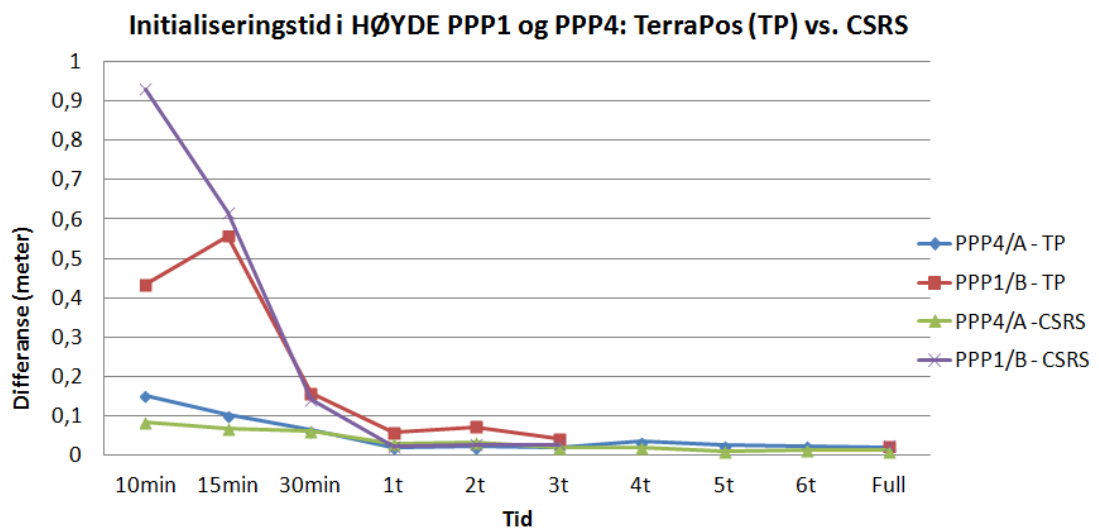
Figur 6.12: Sammenligning av initialiseringstid i grunnriss for TerraPos og CSRS, for PPP2 og PPP3 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



Figur 6.13: Sammenligning av initialiseringstid i grunnriss for TerraPos og CSRS, for PPP1 og PPP4 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



Figur 6.14: Sammenligning av initialiseringstid i høyde for TerraPos og CSRS, for PPP2 og PPP3 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen



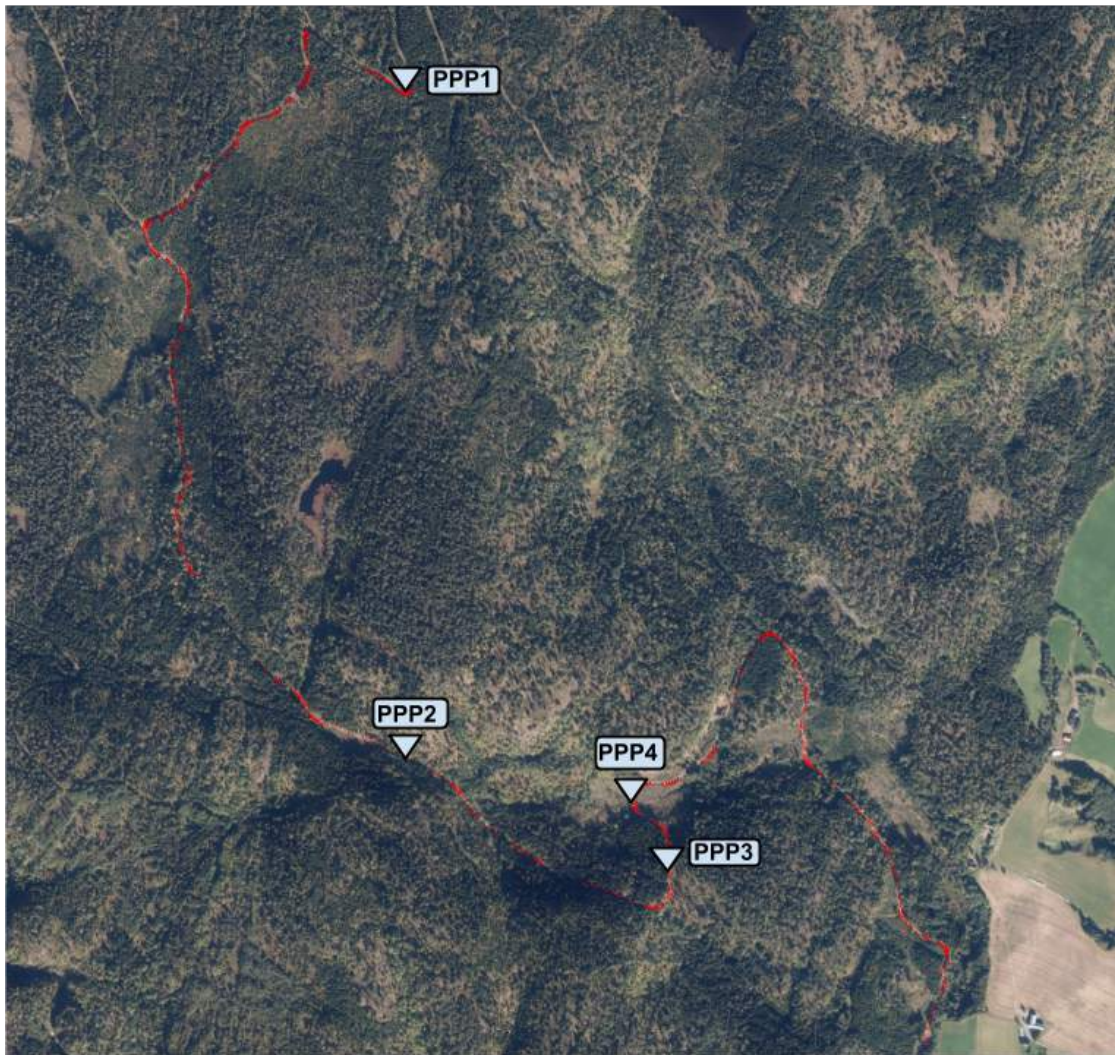
Figur 6.15: Sammenligning av initialiseringstid i høyde for TerraPos og CSRS, for PPP1 og PPP4 hvor siste punkt på grafen indikerer målingens endelige, prosesserte avvik fra referansen

6.2 PPP vs. DGPS

Fordi denne delen av oppgaven er teoretisk basert, og/eller kun basert på et anslag om hvor lang tid det tok å få fixed-løsning i hver stasjon, blir det i denne resultatdelen kun lagt fram den midlere tiden det tok å få fixed-løsning ved omkringliggende punkt som et sammenligningsgrunnlag for initialiseringstiden. Tiden det tok å få fixed-løsning er altså basert på tidsavviket mellom punktene langs veien målt før stasjon (PPP1 - PPP4) og innmålte punkt langs veien etter stasjon (se tabell 6.18). Dette tidsavviket er gjeldene fordi hele måleserien (illustrert i figur 6.16) var kontinuerlig. Fordi resultatene i PPP baserer “reelle avvik” på referansen, og referansen her er RTK, vil en ren nøyaktighetsanalyse ikke være mulig da det ene analyseobjektet (les: RTK) over er referansen. Det er allikevel gjort en teoretisk sammenligning av teknikkene, og arbeidet som gikk med for å innsamle data, samt den teoretiske sammenligningen blir gjennomgått i kapittel 7.

Tabell 6.18: Tiden det tok å fixed-løsning i hver stasjon/graderingspunkt beregnet på bakgrunn av en tidsmidling av omkringliggende punkt, hvor sanntid indikerer at det ble umiddelbart fix-løsning ved punktet målt før og etter stasjonspunkt

Stasjon/gradering	Tid før fixed
PPP1/B	Sanntid
PPP2/D	≈ 5 min
PPP3/C	≈ 40 sek
PPP4/A	Sanntid



Figur 6.16: Presentasjon av innmålt prosjekt hvor de røde punktene er RTK-innmålinger og trekantene er PPP-stasjoner

Kapittel 7

Diskusjon

Dette kapittelet vil analysere og diskutere resultatene presentert i kapittel 6 samt oppgavens helhetlige omfang.

7.1 PPP ved degraderte forhold

J.fr problemstillingen som ble lagt fram ble det valgt å skille Precise Point Positionings yteevne i ulike skogstettheter/ulike degraderte forhold på bakgrunn av nøyaktighet og initialiseringstid. Kategoriseringen/graderingen som ble valgt skilte punktene med hensyn på sikt i form av elevasjonsvinkler for obstruksjonskilder i omkringliggende terreng, og ble tallfestet i tabell 6.3. Graderingen på bakgrunn av % fri sikt viste seg å følge i takt med de innmålte og prosesserte resultatdataene. Både antall satellitter og satellittkonstellasjonene/DOP (i overført betydning: god satellittkonstellasjon = lav DOP, dårlig satellittkonstellasjon = høy DOP) samsvarte med graderingen A til D.

Selv om valg av plassering for de fire graderingene så ut til å stemme godt, var det allikevel basert på lite analyse. For en mer helhetlig vurdering burde det her vært målt botaniske faktorer som tretykkelse og bladtetthet for å bestemme penetreringsgraden ved elevasjonsvinkler som i denne oppgavens analyse anses som obstruert/blokkert av trær. Som nevnt ble sikten basert på elevasjonsvinklene i åtte himmelretninger som videre ble projisert ned i et plan/skyplot. Denne betraktningen er todimensjonal og tar ikke høyde for at det totale, frie arealet egentlig er

en kule og ikke en sirkel. Det kunne også vært målt med flere stasjoner i hvert graderingsterreng for å underbygge måleresultatene i tilfelle uforutsette feil bidro til å forverre målingene i en ellers definert terrenngtype.

De prosesserte resultatene er allikevel beskrivende for målesituasjonen i alle punkt, og forskjellene er signifikante. Figur 6.2, figur 6.3, figur 6.4 og figur 6.5 viser at den beste graderingen A i gjennomsnitt (visuelt betraktning) hadde kontakt med 8 GPS satellitter. B hadde i gjennomsnitt 7-8 GPS satellitter, C hadde i gjennomsnitt kontakt med 7 GPS satellitter og D hadde i gjennomsnitt kontakt med 5 GPS satellitter.

7.1.1 Nøyaktighet

For analysen av nøyaktighet var det derfor interessant å se hvordan innmålinger med svært forskjellig måleforhold (i form av terrestriske obstruksjoner, ikke forplantning) ville ende opp i det en var ferdig med prosesseringen. Referansen for prosesseringsresultatene var som tidligere nevnt beregnede DGPS målinger gjort med RTK. Referansekoordinatene, med avvik, ble presentert i tabell 6.5. Nøyaktigheten for de midlede punktene beregnet med CPOS gav et avvik i grunnriss for alle punkt på under 2cm (HRMS) og et avvik i høyde (VRMS) på 2-3cm. J.fr tabell 6.4 er det dog to ting å trekke frem. For det første viste avviket mellom første og andre måling for PPP2 (verst plasserte punkt) å gi koordinater med avvik i høyden på hele 20,3cm. Videre er avviket i nord 4,3cm og 7,3cm i øst. Her er begge punktene målt med fix-løsning, dog er utslagene noe større enn en kunne ønsket. Videre kommer det fram at PPP2 er målt over to dager, med måling både den 7/11 og den 8/11. Her ville det vært fordelaktig om disse kom på samme dag, og over samme epoke som PPP2 målingen for 8/11 fant sted, og en ulik satellittkonstellasjon har her påvirket sammenligningsgrunnlaget noe. Med beregning av nøyaktighet for PPP ville en analyse over allerede kjente punkt (fastmerker, landsnett -eller stamnettpunkt) vært bedre, samt åpnet for muligheten av en nøyaktighetsanalyse mellom DPGS og PPP uten at den ene variabelen ble regnet som referansen.

Beregningene gjort i TerraPos viste signifikante utslag for det verste punktet PPP2/D. Grunnriss rms gav et endelig avvik på 75,7cm, og for høyde ble punktet

prosessert med et avvik på 1,4meter. J.fr figur 6.5 har målingen flere ganger i løpet av målesesjonen kun kontakt med 3 GPS satellitter, DOP-verdiene overskrider 100 med gjevne mellomrom og fasebrudd i målingen forekommer mange ganger. Her har trolig den lave siktenprosenten på 42 % gjort sitt for en dårlig satellittkonstellasjon/svak geometri, samt påvirkning av multipath bidratt til de store utslagene. For de resterende punktene økte nøyaktigheten i takt med en mindre skog. Det er verdt å merke seg at dog PPP3/C kun hadde 47% fri sikt, var resultatene tilsynelatende gode. I tabell 6.1 kommer det fram at PPP3/C hadde særdeles god sikt i sør og sør/øst, og fordi målingene er gjort ved 59°nord vil satellittene komme på den sørlige siden av himmelhvelvet. Sammen med de prosesserte koordinatene ble det gitt standardavvik. For TerraPos varierte disse mellom 1cm og sub millimeter. Figur 6.6 visualiserer forskjellen mellom de oppgitte standardavvikene og de faktiske avvikene fra referansen. Her er utslagene så store at en kan mistenke feil i referansen, dog hverken HRMS, VRMS eller PDOP for RTK-målingene antyder at det har skjedd noe galt i innmåling eller prosessering.

CSRS beregnet også punkt med samme datasett. Også her var det signifikante forskjeller i nøyaktighet for de ulike stasjonene/graderingene både i grunnriss og i høyde. Som verst plasserte mottaker gav PPP2/D et 2d rms (grunnriss) mål på 1,0291m med et avvik på 46cm i høyde. Her var det østkoordinaten som gav det største utslaget på hele 0,993m. De andre punktene gav horisontale nøyaktigheter i størrelsesorden 5-15 cm for endelig, prosesserte koordinater. For de tre best plasserte stasjonene var avviket i høyde kun på 1,2cm - 2,5cm i forhold til referansen. CSRS' oppgitte standardavvik var noe høyere enn TerraPos og hadde høyeste beregnede avvik for PPP2/D med 10,95cm, 15,95cm og 29,75cm for h.h.v $dN\sigma$ $dE\sigma$ og $dH\sigma$. De resterende punktene ble gitt med standardavvik på mellom 1,5mm og 3,05cm.

7.1.2 Initialiseringstid

Initialiseringstiden ble lagt fram i resultatdelen for å få fram forskjellene i tiden det tok å oppnå høy nøyaktighet for de fire ulike stasjonene. Ved å dele målesesjonene opp i tidsstempel 10 min, 15 min, 30 min og ved hver time etter målestart ble det forsøkt å belyse hvordan avviket mellom prosessert punkt og referansepunkt

reduseres til akseptabel verdi over tid. Som beskrevet i avsnitt 5.3 av datainnsamlingen ble stasjonene oppstilt etter geografisk lokasjon med noe spredning. Altså tok det nødvendigvis tid mellom første og siste måling ble startet og sluttet. Dette gjenspeilte seg i målesesjonenes totale måletid illustrert i tabell 6.9.

I form av styrker og svakheter med metoden beskrevet over vil det kunne påpekes at en med kortere måleintervaller enn de valgte 10 min, 15 min, 30 min, 1 - 6 timer fått fram et tydeligere mål på konvergeringen av avviket mellom beregnede koordinater og referansekoordinater. Videre kunne en målt, ikke bare i “tid etter målestart”, men også delt måleserien opp i korte tidsrom/“vindu” hvor en med videre analyse kunne utnyttet hele observasjonsmaterialet. Dette ville også vært hensiktsmessig å starte målesesjonene mer eller mindre ved samme måletid, samt slutte prosesseringen samtidig for å sikre like måleforhold. Tatt dette i betraktning viser det seg at interavallene som er valgt allikvel får fram trekkene ved en konvergering av avvikene, slik at en analyse for å skille stasjoner har vært mulig. Det at målesesjonene ikke startet ved samme tidspunkt, og heller ikke hadde samme total målelengde, ble ikke et problem i beregningen av initialiseringen grunnet overlappende målinger og en langt tidligere konvergeringstid enn lengden av den korteste målingen.

Den endelige nøyaktigheten i TerraPos’ beregninger ser her ut til å sammenfalle med den antatte graderingen, med stasjon PPP4 som stasjonen med beste romlig rms for endelig prosesserte data på 1,8cm. Initialiseringstiden forlenges også med graderingen, hvor det fra tabellene framkommer en beste tid for gradering A (PPP4) med en nøyaktighet i 2d rms (grunnriss) på 3,2 cm etter 30 min. Verste utfall, presentert med gradering D (PPP2) gir en endelig nøyaktighet i 2d rms på 75 cm etter over 4 timer med målinger. Det er også verdt å merke seg at en del målinger har en lavere rms-verdi tidligere i prosessen. Dette skal normalt ikke være tilfelle grunnet prinsippet om at “alle målinger teller positivt”, og skyldes trolig fasebrudd eller at noe har gått galt i grovfeilsøket.

I beregninger gjort med CSRS framkommer det av tabell 6.14, tabell 6.15, tabell 6.16 og tabell 6.17 at den endelige nøyaktigheten ved full måletid sammen-

faller med den forhåndsbestemte graderingen av punktene. A/PPP4 har allerede etter 10 min en romlig nøyaktighet på 11cm, og en endelig romlig nøyaktighet på 4,8cm i forhold til referansen. Som verste punkt ender D/PPP2 på en nøyaktighet i grunnriss på over 1 meter og med en romlig nøyaktighet på 1,127m i forhold til referansen. Figur 6.10 og figur 6.11 illustrerer CSRS' prosesseringsresultat ved de ulike tidsepokene etter start av målesesjon. Som i TerraPos er det igjen tendenser til at det endelige punktet av prosesseringen ikke er det mest nøyaktige, både i grunnriss og i høyde. Dette gjelder spesielt for beregningene gjort ved de verst plasserte punktene C/PPP3 og D/PPP2, punkt som ved gjentakende anledninger har fasebrudd i målingen.

7.1.3 TerraPos vs. CSRS

Fordi det ble etterprosessert i ved hjelp av to ulike programvarer, var det det viktig å gjøre et poeng ut av forskjellene ved disse. Det første som er viktig å trekke fram er tilgjengeligheten. Mens CSRS er en nettbasert, gratis etterprosesseringstjeneste, er TerraPos lisensbasert. Dette medfører naturlig nok at TerraPos er en lang mer fleksibel programvare som gir brukeren svært mange valgmuligheter ved beregning av data. Mengden valgmulighetene går nok her noe ut over intuitiviteten; mye å velge i = mange steder å "trække feil". CSRS-PPP, fronter en mye lettere etterprosessering, dog med færre valg, hvor en kun må definere prosessen som statisk eller kinematisk og legge til en observasjonsfil. Resultatene presentert i figur 6.12 - figur 6.15, viser at avvikene mellom prosesseringsteknikkene i forhold til referansen, teknikkene imellom, er til stedet. Gjennomgående trend for måleteknikkens resultater er at CSRS leverer beregninger nærmere referansen (lavere differanseverdi) tidlig i målingen, mens det ved endelige målerestultat markert "Full" er TerraPos som står igjen nærmest referansen.

7.2 PPP vs. DGPS

Fordi det kun ble innmålt DGPS-data med RTK basert på den norske VRS (virtuelle referansestasjons)-tjenesten CPOS, ble diskusjonen rundt logistikk og effektivitet for generell relativ GPS gjennomgått teoretisk.

7.2.1 Arbeid med datainnsamling

Som beskrevet i kapittel 4 var det naturlig å sammenligne PPP og differensill GPS på punkter som logistikk, brukervennlighet, effektivitet og reelle kostnader i en analyse av det totale arbeidet som krevdes for å samle inn data.

Med tanke på logistikk, som i dette tilfellet omhandlet frakt av utstyr, var det langt lettere å ta med seg RTK-utstyret. Dette er dog på bakgrunn av tilgangen til kartverkets CPOS-tjeneste som ved tilkobling til GSM/GPRS-nettet knytter bruker til virtuelle referansestasjoner som videre tillater differensielle målinger. Her erstattes frakt av utstyr med en betalt tjeneste som gjør seg gjeldende i de reelle kostnadene. I en hypotetisk sammenheng hvor bruker ikke har tilgang til slike tjenester, vil det da være nødvendig å ta med to mottakere for å gjøre én måling i tillegg til at basestasjonen/referansestasjonen må være statisk over et kjent punkt. Det er videre avstandsbegrensninger til RTK-systemet, hvor en på avstander over 10km mellom rover (brukers mottaker) og basestasjon vil få problemer grunnet ulike atmosfæriske forhold [Seeber, 2003], en begrensning PPP ikke må ta stilling til. PPPs evne til å kunne plasseres fritt, uten begrensninger i form av krav til nettilgang eller det å være innenfor en bestemt radius av en basestasjon er derfor en av de sterkeste argumentene bak teknikken PPP.

Brukervennligheten vurderes på bakgrunn av programvarenes intuitivitet og er derfor i denne oppgaven kun blitt testet i forbindelse med PPP. For RTK-data som måler og beregner samtidig krever det her kun kunnskap til måleboken og dens funksjoner. Valgene og oppsettet for måling var ikke vanskelige å forstå, dog ikke så enkelt at ikke manual kreves for en kort introduksjon. I arbeidet rundt etterprosessering i PPP ble TerraPos og CSRS-PPP benyttet. Disse var ulik i form av valgmuligheter og kompleksitet. TerraPos har et bredt spekter av funksjoner og moduler gjør det mulig å prosessere med en langt høyere frihet enn CSRS, dog er programvaren vanskelig nok å håndtere slik at en god introduksjon vil være nødvendig. CSRS er på den andre siden langt mer begrenset i valgmuligheter for brukeren, men krever kun innlasting av observasjonsfil. Tar en utgangspunkt i at brukeren som vil ha data gjennom en PPP-tjeneste vet hvordan en slik tjeneste

opererer, vil programvarenes utfordringer bli mindre. Helhetlig er det dog lettere å benytte en tjeneste som både måler og beregner i samme tid.

I form av effektivitet er det viktig å se på hvor lett forståelig/intuitivt innmåling og prosesseringen var. Innmålingen av PPP er her bare en form for absolutt poisonsbestemmelse, og en bruker med grunnleggende forståelse vil derfor kunne anskaffe måledata for å starte beregningen uten videre kunnskap. For etterprosessering av PPP-data kreves en videre forståelse om hvorfor, og hvordan en anskaffer korreksjonsdata som videre skal påføres de innmålte punktene. Dog er det her viktig å skille mellom prosesseringsteknikker. Fordelen vil derfor fra RTKs side være det at teknikken både måler og prosesserer i sanntid, og dermed slipper brukeren å vite noe om prosessens virke for å få beregnede data, dog dette er sterkt anbefalt. Fordi differensiell GPS også omhandler det å prosessere i ettertid på bakgrunn av innmålinger fra en eller flere referansestasjoner, vil det nødvendigvis kreve forståelse og kunnskap rundt programmene som benyttes, samt korreksjonene som blir gjort.

7.2.2 Initialiseringstid

For å undersøke om PPP-teknikken kunne konkurrere med RTK på de aktuelle punktene ble det målt en tidsdifferanse mellom sammenhengende punkt før og etterinnmålte stasjonspunkt (PPP1, PPP2, PPP3 og PPP4), presentert i tabell 6.18. Her fremkommer det at både PPP4/A og PPP1/B får umiddelbart fix-løsning, og er derfor merket "sanntid". PPP3/C brukte noe lengre tid, altså rundt 40 sekund. Tallene er markert med "≈" fordi anslaget avhenger av tiden det tok å få mottaker i rett posisjon, noe som kan variere (dog ikke mer enn med noen sekunder), samt at forholdene for fixed-løsning er svært korrelert med sikt og kontakt med antall satellitter slik at forskjellene i tid det tok å få fixed i omkringliggende punkt og i det faktiske punkt kan variere signifikant. PPP2/D, som det verste punktet, ble klokke inn til en fix-løsning etter omlag 5 minutter. Denne betraktningen av tiden det tok å få fixed-løsning i det aktuelle punktet er et anslag, og en kan derfor ikke trekke noen konklusjoner basert på dette. Situasjonen var uansett slik at sammenligningsgrunnlaget var initialiseringstiden, og PPPs stasjoner her

var prosessert med første intervall på 10 min etter målestart, var det ikke mulig å gjøre en direkte sammenligning av nøyaktighetene per tidsstempling. Her ville det f.eks vært hensiktsmessig å prosessere hvert minutt fra start og fram til 10 minutter etter målestart for å detektere nøyaktig når konvergeringen forekom. Det skal dog være klart at PPP4/A som best plasserte punkt i forhold til nøyaktighetene presentert i tabell 6.10 - tabell 6.17 og tabell 6.14 - tabell 6.17 indikerte en nøyaktighet på 17,2cm i grunnriss fra TerraPos' beregninger og 8,3cm i grunnriss fra CSRS' beregninger, relativt referansepunktet. J.fr teorien om at alle målinger skal telle positivt, vil en kunne anta at punkt målt ved en tidligere anledning ikke ville gjengitt en bedre nøyaktighet. Fordi RTK-målingene, definert som referansen, hadde en nøyaktighet i grunnriss (HRMS-verdi) på under 2cm i samtlige målepunkt (tabell 6.5) med lengste måletid på 5 minutter, tyder det på en bedre initialiseringstid. Det er dog viktig å presisere at PPP som måleteknikk er fleksibel fordi den ikke trenger kontakt med referansestasjoner eller bakkekontrollpunkt med definerte koordinater, slik at anvendelse av teknikken i områder uten disse vil være høyst aktuell.

7.3 Potensielle utvidelser og videre analyse

I en helhetlig analyse av Precise point positioning som måleteknikk i skogsforhold kan en ta for seg hva som kreves i dagens skogbruksbransje. J.fr en samtale med Jan Bjerketvedt, ansatt ved NMBU og Norsk institutt for skog og landskap, kom det fram at dagens anvendelser krever forskjellig nøyaktighet og initialiseringstid. For målinger i forbindelse med skogshogst, dette være seg grensemåling mellom hogstfelt eller tynning av trær, kreves nøyaktige målinger. For grenser følger dette normert landmålingsstandard (følger CPOS' nøyaktighetsgaranti på 10cm i grunnriss) og ved tynning av trær er formålet å måle nøyaktig nok til å skille stammer fra hverandre. Begge disse anvendelsesområdene krever umiddelbar målenøyaktighet, altså måling i sanntid. Paradoksalt er disse arbeidsoppgavene i områder hvor sikten er verst, og måleforholdene er påvirket av tett skog. Av resultatene som framkommer av denne oppgaven vil hverken PPPs målenøyaktighet ved tett skog, eller initialiseringstiden det tok være gode nok for disse kvalitetskravene. Som en utvidelse av oppgaven ville det her vært interessant å beregne med korreksjons-

data i form av igr - rapid for å undersøke hvordan nøyaktigheten ble med data levert nærmere sanntid. For veibygging i skogsterreng derimot måles det i dag kun knekkpunkt ved hjelp av stikkstand, helningsmåler og målebånd. Her er nøyaktighetskravet i dag langt mindre, men forbedringspotensialet stort. Det viktigste i slike målinger er å få fram kurvaturen og høyden langs veg, og områdene noe mer åpne slik at behovet for å etterprosessere i sanntid ikke er til stedet. Ved Kinematisk innmåling av knekkpunkt og en etterprosessering vil det derfor være et stort potensiale for en nøyaktighetsforbedring, sammenlignet med innmålinger gjort med nevnte stikkstang og helningsmåler. Dette ble dog ikke gjort i denne omgang, men vil være et interessant område for forbering i fremtiden.

Som en potensiell utvidelse av oppgaven ville det vært aktuelt å benytte seg av ESA korreksjonsdata i stedet for igs-final. Det ble tatt en beslutning i avsnitt 5.4.1 om å konsentrere seg om prosessering av igs-final data på bakgrunn av dens midling mellom flere leverandører av korreksjonsdata. Her ble det nevnt at igs-final data ikke inkluderer satellittklokkerekorreksjonsdata for GLONASS-satellitter, og GLONASS-observasjoner ble derfor ikke benyttet i beregningene. Som følger av de til tider svært dårlige satellittkonstellasjonene i målingene gjort med bl.a PPP2 (3 GPS satellitter figur 6.5) er det grunnlag for å tro at en med observasjoner fra flere satellitter ville fått resultater nærmere referansen. Selv om flere satellitter styrker konstellasjonen, påpeker bl. a [Chuang et al., 2013] at et bidrag fra GLONASS vil føre til lengre konvergeringstid og lavere nøyaktighet som følger av såkalte "Inter-channel biases". GLONASS har også blitt sett på som noe upålitelig med tanke på teknikkens mangel på global tekning av kontrollstasjoner. Innmålingen ble også gjort med en elevasjonscut-off på 10° , her ville det vært mulig å senke denne for å få en sterkere geometri. Valget av elevasjonsvinkel ble dog tatt på bakgrunn av troposfærens stigende påvirkning med lavere elevasjonsvinkel (se figur 3.7). Det ble samtidig nevnt at målingene gjort med RTK-CPOS ble gjort over to dager. J.fr utfordringer knyttet til målingen presentert i avsnitt 5.5, ble det gjort målinger av PPP1 og PPP2 både den 7. og den 8. November. Her kunne det vært nyttig å gjort beregninger begge dagene for en eventuell midling og for å se på utslagene til daglige effekter som bl. a troposfærevariasjonen. Videre utfordringer nevnt i samme avsnitt var utsklidningen som forekom fra stasjon PPP4 ble

satt opp til det ble tatt ned. Her ble det ikke påført noen kinematisk beregning på anbefaling fra TerraPos' utvikler Narve Kjørstad Schipper på grunnlag av at utsklidningen ikke var større enn andre forstyrrelsesmoment og kunne derfor ikke detekteres. Av resultatene underbygges Schippers konklusjon ved at beregningene gjort med PPP4 ikke viste signifikante avvik fra referansen.

Kapittel 8

Konklusjon

Undersøkelsene gjort i denne oppgaven indikerer at beregninger med Precise Point Positioning ved degraderte forhold gir forverret posisjonsnøyaktighet samt en lengre initialiseringstid i takt med tettere skog. Fordi innmålingene foregikk over samme tidsrom er avvikene i både nøyaktighet og intialiseringstid for stasjonene en klar indikasjon på at sikten i de aktuelle områdene har spilt en rolle. Dette i all hovedsak i form av satellittgeometri og antallet satellitter hver stasjon hadde kontakt med. Kvaliteten i form av posisjonsnøyaktighet fremkommer i analysen av punktene. Hvor punkt A og B begge har en romlig nøyaktighet på under 7 cm, C har en romlig nøyaktighet på under 23cm og D har en romlig nøyaktighet på under 1,6m. Initialiseringstiden varierte med programvaren som ble benyttet hvor TerraPos gav romlig nøyaktighet på under 10cm etter 30 min for graderingspunkt A og B, under 30cm etter 2 timer for graderingspunkt C og 1,6m for graderingspunkt D etter beregning av over fire timer med måling. CSRS gav romlig nøyaktighet på under 10cm etter 15 min for graderingspunkt A, under 10cm etter 2 timer med graderingspunkt B, under 15 cm etter 15 min for graderingspunkt C og romlig nøyaktighet på meternivå etter 30 min for graderingspunkt D. J.fr kravet til nøyaktighet tilnærmet lik leveringspotensialet til CPOS (5cm horisontalt og 8cm vertikalt 95% av tiden) for skogbruksanveldser som såing/hogst/tynning var både graderingspunkt A og B innenfor. Disse var dog ikke innenfor initialiseringskravet om levering av slike nøyaktigheter i sanntid. Det er allikevel viktig å påpeke at oppgaven inneholder mangler med tanke på det å få fram PPPs fulle potensiale

i form av ekskluderingen av GLONASS-observasjoner med satellittkorreksjonsdata fra igs-final samt manglende dokumentasjon av den biofysiske karakteristikker av omkringliggende skog i form av bladtetthet og tretykkelse for å bedre beskrive graderingen av sikt i hvert punkt. Videre var det heller ikke mulig å gjøre en helhetlig analyse rundt initialiseringstiden ved hver stasjon i forhold til RTK CPOS etter som fixed-tiden her kun ble anslått. Et bedre mål på initialiseringstidspotensialet for PPP ville også vært en analyse av prosessering på igr-rapid data med levering av korreksjonsdata i sanntid.

Tillegg A

Produktspesifikasjoner

På de neste to sidene er det presentert produktspesifikasjoner om henholdsvis antennen og mottakeren benyttet i oppgaven. Informasjonen er levert av TOPCON og lagt ut av blinken a.s [TOPCON, Mai 2014c] og av Terris GPS [TOPCON, Mai 2014a].



PG-A1 Antenna



Topcon continues to lead all GNSS manufacturers with a multitude of new and innovative products. The PG-A1 GNSS antenna continues to compliment the complete line of Topcon GNSS products.

This dual-frequency/dual-constellation, geodetic antenna clearly demonstrates Topcon's antenna expertise is world class. With precision micro center antenna technology, you have the best design available to achieve the highest horizontal and vertical accuracies. The integrated ground plane also helps eliminate errors caused by multipath.

The PG-A1 antenna is designed to accompany the Topcon modular receivers such as the GB-1000, GB-500, Legacy-E+, and Odyssey-RS as well as the ground breaking GRS-1.

Contact your local Topcon Distributor for more information or to arrange a demo, or you can visit us at <http://www.topconpositioning.com>.

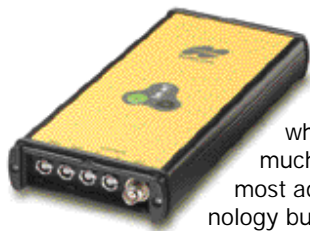
The antenna calibration is published on the NGS website at: <http://www.ngs.noaa.gov/ANTCAL/>.

PG-A1	
Frequency	Dual Frequency GPS + Glonass
Centering	Precision Micro Center
Type	Microstrip on flat ground plane
Weight	492g
Dimensions	141.6 x 141.6 x 53.7mm
DC Voltage	+2.7 ~ +12V; 25 mA @5.0typ.
LNA Gain	30 ± 2dB
Output	50 Ohm
Connector	TNC female
Environmental	Waterproof
Operating Temp.	-40°C ~ +55°C
Shock Resistance	2-meter Pole Drop

Topcon Positioning Systems, Inc.
800-443-4567
www.topconpositioning.com

Topcon sells GPS products into the precision markets only.
©2009 Topcon Corporation. All rights reserved.

P/N: 7010-2006 Rev. A 07/09



With a Legacy-E GPS+ receiver, fast and accurate solutions don't rely on when or where you're working, or how much time have. It has the world's most advanced GPS+ receiving technology built-in, ready to work where others won't.

At its core is our **Paradigm** chip featuring 40 universal super channels that can each track all signals of either L1 or L2 GPS and GLONASS frequencies—and up to 20 GPS+ satellites at once, the maximum available at any one time! It incorporates our new innovations in signal processing, **multipath mitigation** and **co-op tracking**, making Topcon GPS+ the best in the field for under-canopy and low signal strength reception.



Our unique Cinderella feature activates GPS L1+L2 and GLONASS reception every other Tuesday for 24 hours so you can experience the real power of Topcon GPS+. Permanently activating these frequencies and other options is easy with simple password commands entered via a PC. Options can even be added on a pay-per-use basis—only when you need it.

The MINimum INTERface keeps operation very simple. Just two function keys and two 3-color LED's are all that's needed to record data and check status. Up to



four serial ports lets Legacy-E work with a variety of accessories in all types of configurations.

Topcon offers a full line of antennas, radios, post-processing software and all the other accessories and hardware that will help ensure maximum productivity and accuracy.

Powerful, simple, versatile. Topcon Legacy-E—no ordinary GPS receiver.



TOPCON POSITIONING SYSTEMS, INC.
925-460-1300 • 800-443-4567
Pleasanton, CA USA
www.topcon.com



Legacy-E Technical Data ¹

Description	40 channel integrated GPS+ receiver with MINTER interface.
Tracking Specifications	
Tracking Channels, standard	40 L1 GPS (20 GPS L1+L2+GLONASS on Cinderella ² days)
Tracking Channels, optional	20 GPS L1+L2 (GD), 20 GPS L1 + GLONASS (GG), 20 GPS L1+L2+GLONASS (GGD)
Signals Tracked	L1/L2 C/A and P Code & Carrier
Performance Specifications (1 sigma)	
Baseline Accuracy	Horizontal: 3mm + 1ppm for L1+L2; 5mm + 1.5ppm for L1 Vertical: 5mm + 1.5ppm for L1+L2; 6mm + 1.5ppm for L1
RTK (OTF) Accuracy	Horizontal: 10mm + 1.5ppm for L1+L2; 15mm + 2ppm for L1 Vertical: 15mm + 1.5ppm for L1+L2; 20mm + 2ppm for L1
Cold Start / Warm Start Reacquisition	<60 seconds / <10 seconds <1 second
Power Specifications	
Battery	External (maximum of 2 ports)
Power input / consumption	6 to 28 volts DC / less than 3.3 watts
Continuous Operating Time	7 hours (typical w/2.3AH rechargeable battery)
GPS+ Antenna Specifications	
GPS / GLONASS Antenna	External
Antenna Type	Microstrip (Zero-Centered)
Ground Plane	Antenna on a flat ground plane or Choke Ring
Radio Specifications	
Type	External, UHF/VHF radio modem
Base Power Output	0.5W/2.0W/35W
I/O	
Communication Ports	Serial (RS232), 4 maximum, 2 standard
Other I/O Signals	1pps, event marker, frequency input, frequency output
Status Indicator	2x3-color LED's, two-function keys (MINTER)
Control & Display Unit	External: Husky FS/2, FS/3, Ranger, 3rd Party
Memory & Recording	
Internal Memory	Up to 96 Mbytes
Raw Data Recording	Up to 20 times per second (20Hz)
Data Type	Code and Carrier from L1 and L2, GPS and GLONASS
Data Output	
Real time data outputs	RTCM 104 version 2.2 and/or CMR2
ASCII Output	NMEA 0183 version 2.2/2.3 (2.3 default)
Other Outputs	TPS format
Output Rate	Up to 20 times per second (20Hz)
Environmental Specifications	
Enclosure	Waterproof
Operating Temperature	-40°C to 55°C / -40°F to 130° F
Dimensions	W:240 x H:110 x D:35 mm / 9.45 x 4.33 x 1.38 in
Weight	0.6 kg / 1.32 lbs

Standard Configuration

- Legacy-E Receiver (0Mb)
- Cinderella GPS L2 + GLONASS activation
- 1 Hz Update Rate
- Co-op Tracking
- NMEA 0183 output
- User Defined Outputs
- MINTER Interface
- 2x RS232 Serial Ports
- 1x External Power Port
- Power Cables
- RS232 Cable

- Frequency I/O
- Event Marker
- Two additional serial ports
- Additional power port

Common Accessories

- Topcon Antennas
LegAnt-2 flat ground plane
RegAnt-1 SD choke-ring
RegAnt-2 DD choke-ring
- UHF/VHF/Spectrum Base or Rover radio kit
- Topcon Power Station
- 2.3AH rechargeable battery
- Lithium-ion battery
- LitePole
- Tripod, tribrach & adapter
- Pinnacle software
- Carlson GPS software
- Survey Pro software
- Backpack, carrying case

¹ Specifications are subject to change without notice. Performance specifications assume a minimum of 6 GPS or 7 GPS/GLONASS satellites above 15 degrees in elevation and adherence to procedures recommended by TPS in the appropriate manuals. In areas of high multipath, during periods of high PDOP and during periods of high ionospheric activity performance may be degraded. Robust checking procedures are highly recommended in areas of extreme multipath or under dense foliage.

² Cinderella feature activates GPS L2 and GLONASS reception at GPS midnight every other Tuesday for 24 hours.

Optional Features

- GPS L2 and GLONASS
- Update rate 5Hz, 10Hz, 20Hz
- RTK @ 5Hz, 10Hz, 20Hz
- Data Recording 4Mb to 96Mb
- CMR/RTCM input/output
- Advanced Multipath Reduction

Tillegg B

Punktbeskrivelse



(a) PPP1, nord-vest mot sør-øst



(b) PPP2, øst mot vest



(c) PPP3, nord mot sør



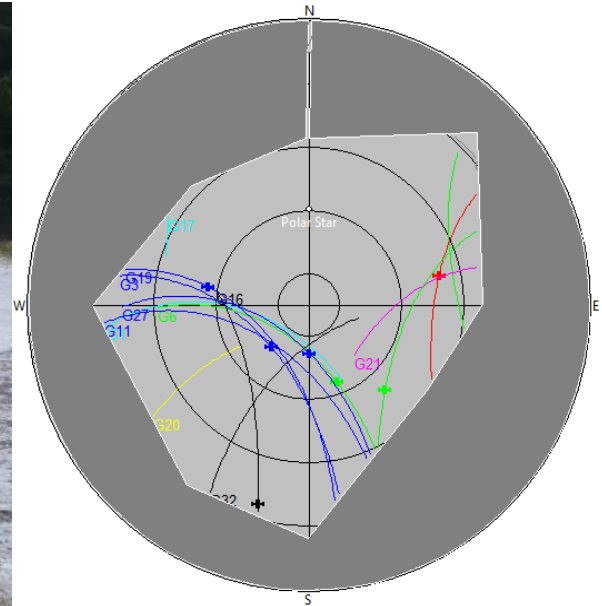
(d) PPP4, vest mot øst

Figur B.1: Stasjonene i geografisk rekkefølge med himmelretning

B.1 PPP1/B - 8.November 2013



(a) PPP1, vest mot øst



(b) Skyplot PPP1

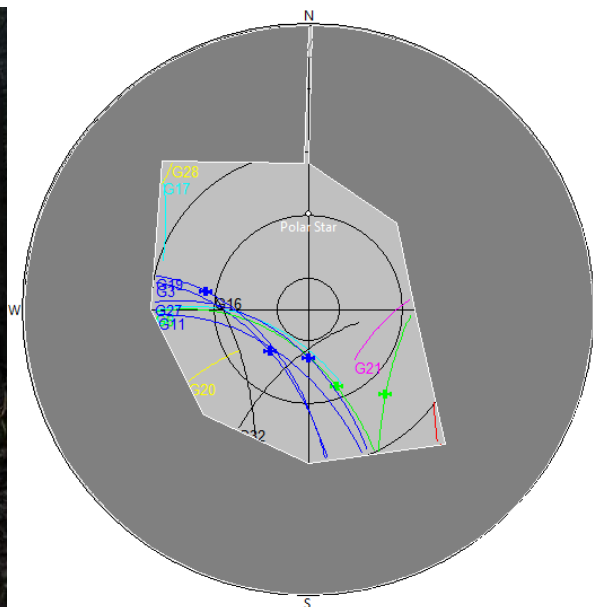
Tabell B.1: Måleparametre PPP1/B

	Fri sikt:	62 %		
Mottakernr:	340-0235	Antennenr:	308-0839	
Målestart:	12:01:52	Måleslutt:	15:23:19	
	Posisjon			
	N	E	H	Kvalitet (3d rms)
Håndholdt	6580098	549625	338	10m
RTK	6580093,268	549621,405	335,375	0,03m
TerraPos PPP	6580093,247	549621,415	335,398	0,03m
CSRS-PPP	6580093,272	549621,463	335,4	0,06m

B.2 PPP2/D - 8. November 2013



(a) PPP2, sør-øst mot nord-vest



(b) Skyplot PPP2

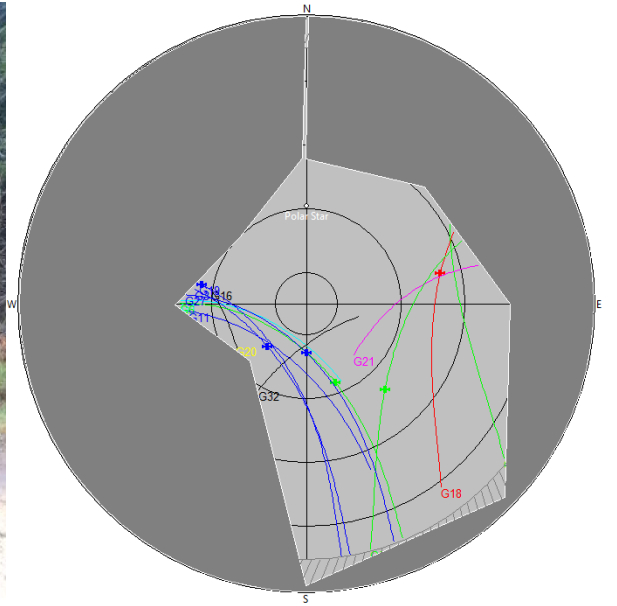
Tabell B.2: Måleparametre PPP2/D

	Fri Sikt:	42 %		
Mottakernr:	340-0248	Antennenr:	308-0830	
Målestart:	11:27:43	Måleslutt:	15:55:59	
	Posisjon			
	N	E	H	Kvalitet (3d rms)
Håndholdt	6578746	549626	297	13m
RTK	65787740,21	549622,366	290,324	0,03m
TerraPos PPP	657839,796	549623,001	288,924	1,59m
CSRS-PPP	6578740,041	549623,04	289,864	1,127m

B.3 PPP3/C - 8. November 2013



(a) PPP3, øst mot vest



(b) Skyplot PPP3

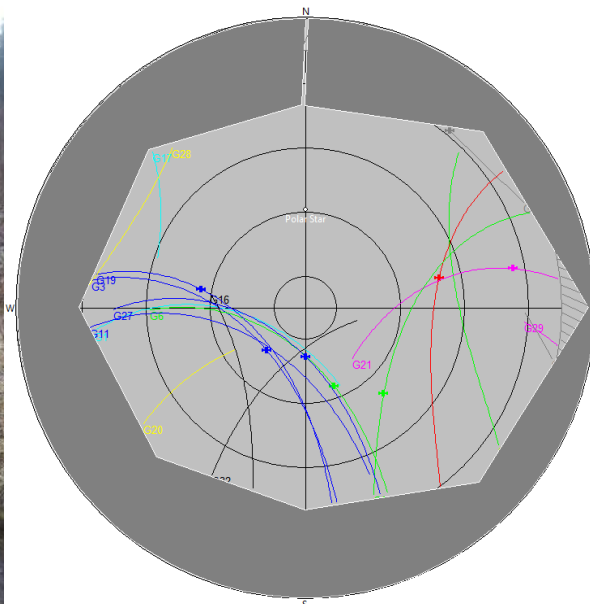
Tabell B.3: Måleparametre PPP3/C

	Fri Sikt:	47 %		
Mottakernr:	340-0294	Antennenr:	308-0851	
Målestart:	10:24:00	Måleslutt:	16:01:45	
	Posisjon			
	N	E	H	Kvalitet (3d rms)
Håndholdt	6578506	550159	215	10m
RTK	6578508,471	550154,748	204,356	0,02m
TerraPos PPP	6578508,45	550154,902	204,192	0,22m
CSRS-PPP	6578508,468	550154,889	204,375	0,14m

B.4 PPP4/A - 8. November 2013



(a) PPP4, nord mot sør



(b) Skyplot PPP4

Tabell B.4: Måleparametre PPP4/A

Fri sikt:		71 %		
Mottakernr:	340-0261	Antennenr:	308-9555	
Målestart:	09:39:08	Måleslutt:	16:14:51	
Posisjon				
	N	E	H	Kvalitet (3d rms)
Håndholdt	6578646	550085	194	7m
RTK	6578646,885	550082,005	185,302	0,02m
TerraPos PPP	6578646,855	550082,007	185,32	0,02m
CSRS-PPP	6578646,88	550082,044	185,3141	0,05m

Bibliografi

- Mohamed Abd-Elazeem, Ashraf Farah, and Farrag Farrag. Assessment study of using online (csrs) gps-ppp service for mapping applications in egypt. *Journal of Geodetic Science*, 1(3):233–239, 2011.
- European Global Navigation Satellite Systems Agency. *Galileo Is The European Global Satellite-Based Navigation System*, April 2014. URL <http://www.gsa.europa.eu/galileo-0>.
- Richard J Anderle. Point positioning concept using precise ephemeris. In *Satellite Doppler Positioning*, volume 1, pages 47–75, 1976.
- Natural Resources Canada. *The Canadian Spatial Reference system Precise Point Positioning*, April 2014. URL <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>.
- Kongzhe Chen and Yang Gao. Real-time precise point positioning using single frequency data. In *ION GNSS*, 2005.
- Shi Chuang, Yi Wenting, Song Weiwei, Lou Yidong, Zhang Rui, et al. Glonass pseudorange inter-channel biases and their effects on combined gps/glonass precise point positioning. *GPS solutions*, 17(4):439–451, 2013.
- R Conley, R Cosentino, CJ Hegarty, ED Kaplan, JL Leva, M Uijt de Haag, and K Van Dyke. Performance of stand-alone gps. *Kaplan & CJ Hegarty (Eds.), Understanding GPS: Principles and applications*, pages 301–378, 2006.
- Kenneth Davies. *Ionospheric radio*. Number 31. IET, 1990.

- Bureau International des Poids et Mesures. *The International System of Units (SI)*, 8th edition, 2006. URL http://www.bipm.org/utills/common/pdf/si_brochure_8_en.pdf.
- U.S. Air Force. *GPS III*, November, 2012. URL <http://www.losangeles.af.mil/library/factsheets/factsheet.asp?id=18830>.
- GPS.gov. *Control segment*, Februar, 2014a. URL <http://www.gps.gov/systems/gps/control/>.
- GPS.gov. *Fourth Civil Signal: L1C*, Februar, 2014b. URL <http://www.gps.gov/systems/gps/modernization/civilsignals/#L1C>.
- GPS.gov. *Current and future satellite generations*, Februar, 2014c. URL <http://www.gps.gov/systems/gps/space/>.
- Thomas Grinter and Craig Roberts. Real time precise point positioning: Are we there yet? 2013.
- Werner Gurtner, Gerald Mader, and D Arthur. A common exchange format for gps data. *CSTG GPS Bulle*, 1989.
- S. Hieber. *Satellite systems for geodesy and geodynamics*. Number 6. CSTG Bull, 1983.
- Bernhard Hofmann-Wellenhof, Herbert Lichtenegger, and Elmar Wasle. *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, 2007.
- HS Hopfield. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical research*, 74(18):4487–4499, 1969.
- IGS. *The IGS Tracking Network*, April 2014a. URL <http://www.igs.org/network/complete.html>.
- IGS. *IGS Products*, April 2014b. URL <http://www.igs.org/components/prods.html>.
- IGS. *Real-time Service*, April 2014c. URL <http://rts.igs.org/>.

- ITRF. *Science background - General concepts*, Mai, 2012. URL <http://itrf.ensg.ign.fr/general.php?page=1>.
- Kartverket. *Overgang til NN2000*, April 2014. URL <http://159.162.103.4/geovekst/georef.jsp?fylke=00&komm=0000&georef=NN2000&Submit1=G%E5+til+kommune>.
- Kartverket. *Norgeskart.no*, Januar 2014. URL <http://www.norgeskart.no>.
- Kartverket. *CPOS*, Mars 2014. URL <http://www.kartverket.no/Posisjonstjenester/CPOS/>.
- Kartverket. *Referanserammer for Norge*, Februar, 2013. URL <http://www.kartverket.no/Kunnskap/Kart-og-kartlegging/Referanseramme/Referanserammer-for-Norge/>.
- John Klobuchar. Ionospheric effects on gps. *Global Positioning System: Theory and applications.*, 1:485–515, 1996.
- John A Klobuchar. Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency gps users. *Aerospace and Electronic Systems, IEEE Transactions on*, (3):325–331, 1987.
- Alfred Leick. *GPS satellite surveying*. 3rd edition, 2004. ISBN 0-471-05930-7.
- James Andrew Lewis. *Galileo and GPS: From Competition to Cooperation*, Juni,2004. URL http://csis.org/files/media/csis/pubs/040601_galileo_gps_competition_coop.pdf.
- FK Lutgens and EJ Tarbuck. *The atmosphere: an introduction to meteorology*, 1998.
- Lockheed Martin. *U.S. Air Force Awards Lockheed Martin GPS III Flight Operations Contract*, Mai,2012. URL <http://www.lockheedmartin.com/us/news/press-releases/2012/may/0531-ss-gpsIII.html>.
- Erik Næsset and Jon Glenn Gjevestad. Performance of gps precise point positioning under conifer forest canopies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(5):661, 2008.

- Navipedia. *Carrier Phase Wind-up Effect*, April 2014. URL http://www.navipedia.net/index.php/Carrier_Phase_Wind-up_Effect.
- Thomas Nylen and Seth White. Online precise point positioning using the natural resources canada canadian spatial reference system (csrs-ppp). 2007.
- U.S. Naval Observatory. *Leap seconds*, 2014. URL <http://tycho.usno.navy.mil/leapsec.html>.
- U.S Department of Defence. *Global Positioning System Standard positioning service performance standard*, mars 2014. URL <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>.
- U.S Department of Homeland Security. Februar, 2014. URL <http://navcen.uscg.gov/?Do=constellationStatus>.
- Ola Øvstedal. Absolutt posisjonsbestemmelse med kode-observasjoner fra gps. 2000.
- Ola Øvstedal. Absolute positioning with single-frequency gps receivers. *GPS Solutions*, 5(4):33–44, 2002.
- Ola Ovstedal, Arne E Ofstad, Kjell-Tore Haustveit, and Oddgeir Kristiansen. An empirical comparison between absolute satellite positioning methods and differential methods in a maritime environment. In *Proceedings of the 15th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 2002)*, pages 2679–2687, 2001.
- Ola Ovstedal, Narve Schipper KJORSVIK, and Jon Glenn Omholt GJEVESTAD. Surveying using gps precise point positioning. In *XXIII. FIG Congress, Munich, Germany*, 2006.
- C Rizos, V Janssen, C Roberts, and Th Grinter. Precise point positioning: Is the era of differential gnss positioning drawing to an end? In *In: Proceedings of FIG Working Week 2012*, volume 10, page x, 2012.
- J Saastamoinen. Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, 107(1):13–34, 1973.

- Günter Seeber. *Satellite geodesy, 2nd completely revised and extended edition*. Walter de Gruyter, 2nd edition, 2003. ISBN 3-11-017549-5.
- TerraTec. *TerraPos*, April 2014. URL http://www.terratec.no/terrapos/cms/125/72/hent_artikkel/46.
- Paul A Tipler and Gene Mosca. *Physics for scientists and engineers*. 6th edition, 2007. ISBN 1-4292-0133-9.
- TOPCON. *PC-CDU MS*, Januar 2014. URL <http://www.topconpositioning.com/products/software/updaters-and-utilities/pc-cdu-ms>.
- TOPCON. *Legacy-E*, Mai 2014a. URL http://www.terrisgps.com/product_files/LegacyE_Brochure1_314.pdf.
- TOPCON. *TOPCON Offset sheet*, Mai 2014b. URL http://www.blinken.no/dokumenter/pdf/topcon/Offset_Sheet_PG-A1.pdf.
- TOPCON. *PG-A1 antenna*, Mai 2014c. URL http://www.blinken.no/dokumenter/pdf/topcon/PGA1_Specs_Broch_7010_2006_RevA.pdf.
- Bryan Townsend and Patrick Fenton. A practical approach to the reduction of pseudorange multipath errors in a ll gps receiver. In *Proceedings of ION GPS-94, the Seventh International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, (Salt Lake City, UT), Alexandria, VA*, pages 143–148, 1994.
- ublox. *GPS, Essentials of Satellite Navigation - Compendium*, 2009. URL http://www.u-blox.com/images/stories/Resources/gps_compendiumgps-x-02007.pdf.
- Halvor Vadder. Ppp: test av online tjenester. 2012.
- J Van Melle. Cesium and rubidium frequency standards status and performance on the gps program. Technical report, DTIC Document, 1995.
- Wikipedia. *differensiell GPS historie*, April 2014. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Differential_GPS#History.

Wikipedia. *Choke ring antenna*, Desember, 2013. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Choke_ring_antenna.

Wikipedia.org. *Satellite Navigation*, April 2014. URL http://en.wikipedia.org/wiki/Satellite_navigation.

Wikipedia.org. *Polygon areal*, Mai 2014. URL <http://no.wikipedia.org/wiki/Polygon#Areal>.

Chang-hui XU, Jin-ling WANG, Jing-xiang GAO, Jian WANG, and Hong HU. Precise point positioning and its application in mining deformation monitoring. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 21:s499–s505, 2011.

SY Zhu and E Groten. Relativistic effects in gps. In *GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying*, pages 41–46. Springer, 1988.



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Postboks 5003
NO-1432 Ås
67 23 00 00
www.nmbu.no