



# NTNU

Kunnskap for en bedre verden

# Bacheloroppgave

**TN303212 Hovedprosjekt - Bachelor i nautikk**

**Utvikling av nøyaktighet, integritet, kontinuitet og  
tilgjengelighet av GNSS fram til i dag og i fremtiden**

Kandidatnummer 10014, 10025, 10029

Totalt antall sider inkludert forsiden: 58

Innlevert Ålesund, 30.05.2019

## Obligatorisk egenerklæring/gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. **Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.**

<i>Du/dere fyller ut erklæringen ved å klikke i ruten til høyre for den enkelte del 1-6:</i>		
1.	<b>Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	<b>Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands.</li><li>• ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt.</li><li>• ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt.</li><li>• har alle referansene oppgitt i litteraturlisten.</li><li>• ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse.</li></ul>	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	<b>Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å <u>betrakte som fusk</u> og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høyskoler i Norge, jf. <a href="#">Universitets- og høgskoleloven</a> §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen.</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	<b>Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert i Ephorus, se <a href="#">Retningslinjer for elektronisk innlevering og publisering av studiepoenggivende studentoppgaver</a></b>	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	<b>Jeg/vi er kjent med at høgskolen vil behandle alle saker hvor det foreligger mistanke om fusk etter NTNUs studieforskrift.</b>	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	<b>Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider</b>	<input checked="" type="checkbox"/>

# Publiseringsavtale

Studiepoeng: 15

Veileder: Hallgeir Giske

## Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten ([Åndsverkloven §2](#)).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage med forfatter(ne)s godkjenning.

Oppgaver som er unntatt offentlighet eller båndlagt vil ikke bli publisert.

**Jeg/vi gir herved NTNU i Ålesund en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:**

ja  nei

**Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?**

ja  nei

(Båndleggingsavtale må fylles ut)

- Hvis ja:

**Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?**

ja  nei

**Er oppgaven unntatt offentlighet?**

ja  nei

(inneholder taushetsbelagt informasjon. [Jfr. Offl. §13/Fvl. §13](#))

**Dato:**

## **Forord**

Takk til Longvas Oppmåling AS for utlån av utstyr til feltarbeid, til NTNU for dekning av utgifter til reise til Posisjonskonferansen 2019 og til veileder Hallgeir Giske.

## **Sammendrag**

Hensikten med denne oppgaven er å undersøke utviklingen av GNSS fra 1995 fram til i dag, og hva en kan forvente seg i framtiden. Gruppen retter fokus mot systemenes ytelse, særlig med tanke på maritim bruk. I oppgaven tar gruppen også for seg systemsammensetningen til de ulike systemene per dags dato, samt utviklingen fremover. Under dette vil også noen tekniske aspekter med systemene fremstilles, da spesielt med hensyn til virkemåte og fundamentale forskjeller.

Grunnleggende prinsipp for hvordan satellittposisjonering fungerer er også inkludert i oppgaven. Dette ble gjort for å øke både den teoretiske innsikten til leseren og for å tydeliggjøre de teoretiske sammenhengene. Utover dette ble det inkludert noen avanserte prinsipper, som grunnlag for forståelse av drøfting og resultater.

For å undersøke nærmere om ytelsen har forbedret seg med tiden, utførte gruppen et praktisk forsøk med en satellittmottaker som kan motta signaler fra alle GNSS. På mottakeren kunne man velge hvilke kombinasjoner av satellitter man ønsket å ta inn, og en kunne tilpasse forsøket i stor grad selv. Dette lot gruppen undersøke ytelsen på den nye kombinasjonen av alle systemene, opp imot individuelle system som ble benyttet tidligere.

Det gruppen fant ut var at ved benyttelse av alle systemene samtidig ble ytelsen sterkt forbedret og lite forringet av en fysisk blokkering.

## **Terminologi**

### *Antennestasjon*

Landbasert fasilitet for å opplaste data til satellitter.

### *BeiDou*

GNSS utviklet av Kina.

### *Bitfeilsannsynlighet*

Et mål på hvor stor sannsynlighet det er for feil i mottatt data.

### *Båndbredde*

Størrelsen på et frekvensbånd. Størrelsen defineres av forskjellen mellom høyeste og laveste frekvens.

### *COSPAS/SARSAT*

Internasjonal samarbeidsorganisasjon som jobber med søk og redning.

### *Demodulasjon*

Å gjenvinne den informasjon som ble preget inn på bæreølgen under modulasjonsprosessen. Den omvendte prosessen av modulasjon.

### *DGNSS*

Differensiell GNSS. Nettverk av landstasjoner som forbedrer posisjonsnøyaktigheten for brukerne ved å kringkaste korreksjonssignaler.

### *DOP*

Dilution of precision. Et mål for hvordan geometrien til synlige satellitter påvirker posisjonens nøyaktighet. Lav DOP gir høy nøyaktighet.

### *Dopplermåling*

Benyttelse av et dopplerskifte for å finne en posisjon.

### *Dopplerskifte*

Den tilsynelatende endringen i frekvens som oppfattes av en observatør når et objekt som sender ut en frekvens passerer observatøren.

### *Elevasjon*

Høyden et himmelobjekt har relativt til observatøren. Måles i grader.

### *ESA*

European Space Agency (Den Europeiske Romfartsorganisasjon).  
Samarbeidsorganisasjon mellom 22 europeiske land.

### *Fix*

En posisjon bestemt av peilinger.

### *Galileo*

GNSS utviklet av ESA.

### *GLONASS*

Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema (Globalt navigasjonssatellittsystem). GNSS utviklet av Russland.

*GNSS*

Global Navigation Satellite System. Globalt dekkende system av satellitter for navigasjon.

*GPS*

Global Positioning System. GNSS utviklet av USA.

*GSA*

European Global Navigation Satellite Systems Agency. GNSS utviklet av EU.

*HDOP*

Horizontal dilution of precision. DOP-verdien som påvirker posisjonen i horisontalplanet.

*Himmelplott*

Grafisk framstilling av synlige satellitter, med identifisering av disse. Viser satellittenes peiling, elevasjon og bevegelsesmønster.

*Interferens*

Interferens er det at to eller flere bølger opptrer på samme sted og danner et nytt bølgemønster.

*Konstellasjon*

Visse himmellegemers stilling i forhold til hverandre.

*Modulasjon*

Å gjøre et analogt signal digitalt, for å kunne overføre det med digitale grensesnitt.

*Multi-GNSS*

Bruk av flere GNSS samtidig.

*PDOP*

Position dilution of precision. DOP-verdien som påvirker posisjonen i alle tre dimensjoner.

*PRN*

Pseudo random noise. En unik kodesekvens som blir lagt på utsendt signal fra hver enkelt satellitt.

*SA*

Selective availability. Kunstig feil lagt inn i GNSS for å forringe nøyaktigheten for sivile brukere.

*SAR*

Search and rescue (søk og redning).

*SBAS*

Satellite based augmentation system. Korreksjonssignal utsendt fra kontrollstasjoner på land som forbedre ytelsen på satellittene.

## **Innhold**

<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Teori</b> .....	<b>2</b>
2.1	Historikk .....	2
2.2	Bruksområder i dag .....	4
2.3	Generell GNSS oppbygning .....	5
2.4	Ytelse.....	6
2.5	Grunnleggende prinsipp for posisjonering med satellitt .....	7
2.6	Modulasjon .....	12
2.7	Karakteristikker for forskjellige GNSS .....	14
2.8	GNSS i framtiden .....	18
2.9	Multi-GNSS.....	20
2.10	Feilkilder og geometri .....	21
2.11	DGNSS .....	24
2.12	Metodelære .....	25
<b>3</b>	<b>Metode</b> .....	<b>26</b>
3.1	Valg av metode.....	26
3.2	Forventninger .....	27
3.3	Rammeverk .....	28
3.4	Pålitelighet og Validitet.....	29
3.5	Styrker og svakheter .....	30
<b>4</b>	<b>Prosess</b> .....	<b>31</b>
4.1	Forberedelsesfase .....	31
4.2	Målefasen .....	32
<b>5</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>34</b>
5.1	Drøfting av utførelse .....	34
5.2	Drøfting av resultater.....	35
<b>6</b>	<b>Konklusjon</b> .....	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>Bibliografi</b> .....	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>Vedlegg: Resultater</b> .....	<b>40</b>



## Figur- og tabelliste

Figur 1. Endring av feil ved avslutning av SA.....	3
Figur 2. Brukerandeler av GNSS .....	4
Figur 3. Linjer i 3 akser.....	7
Figur 4. Illustrasjon om dopplerskift.....	8
Figur 5 Vei-fart-tid-trekanten.....	10
Figur 5. Pulsmåling og fasemåling .....	11
Figur 6. Forskjellige typer modulasjon .....	12
Figur 8. Utvikling av antall operative satellitter i Galileo .....	19
Figur 9. Første lokasjon til venstre. Målelokasjon til høyre. ....	32
Figur 10. Trimble R10, digital målebok og PC.....	33
Figur 11. Utvikling av PDOP gjennom de tre målingene. ....	34
Figur 12. Utvikling av horisontal phi gjennom måling 1.....	40
Figur 13. Utvikling av PDOP gjennom måling 1.....	40
Figur 14. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 1 .....	41
Figur 15. Parametere for måling 1 .....	41
Figur 16. Himmelplokk for måling 1 .....	42
Figur 17. Utvikling av horisontal phi gjennom måling 2.....	43
Figur 18. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 2.....	43
Figur 19. Utvikling av PDOP gjennom måling 2.....	44
Figur 20. Parametere for måling 2 .....	44
Figur 21. Himmelplokk for måling 2.....	45
Figur 22. Utvikling av horisontal phi under måling 3 .....	46
Figur 23. Parametere for måling 3 .....	46
Figur 24. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 3.....	47
Figur 25. Utvikling av PDOP gjennom måling 3.....	47
Figur 26. Himmelplokk for måling 3.....	48
Figur 27. PDOP og antall synlige satellitter gjennom alle 3 målingene .....	49
Tabell 1. Sammendrag av nøkkelverdier fra målingene. ....	34
Tabell 2. HDOP-verdier notert ned for hand under forsøket. ....	49

## **1 Innledning**

I dagens samfunn blir GNSS stadig tatt mer i bruk. Satellitteknologien har gått fra å være et system hovedsakelig brukt for navigering og posisjonering, til en teknologi som benyttes i de fleste områder av samfunnet. Utviklingen av GNSS har funnet sted på grunn av den økende bruken av de forskjellige systemene og de økte bruksområdene. Selv om den maritime sektoren er en svært liten brukergruppe av GNSS, er viktigheten av systemene blitt større. Nøyaktig posisjonering er essensielt under navigering av et fartøy, og her bidrar GNSS med mye informasjon.

På bakgrunn av endringene som er underveis på romsegmentene i de forskjellige satellittsystemene, vil gruppen undersøke hva disse endringene har å si for benyttelse av satellittsystem og nøyaktigheten i fremtiden. Da spesielt med tanke på moderniseringen av satellittene, flere frekvensbånd og nyere mottakere, i hovedsak for den maritime målgruppen. Gruppen ville finne ut om at flere tilgjengelige satellitter fører til en mer nøyaktig posisjonering.

I teoridelen presenteres relevant teori, som omhandler temaet gruppen har jobbet rundt. I del tre, som er metoddelen, blir det drøftet hvilken metode gruppen brukte. I prosessdelen, som er nummer fire, skrives det om prosessen. I del fem fremlegges og drøftes resultat og utførelse. Konklusjonen befinner seg i del seks.

## 2 Teori

### 2.1 Historikk

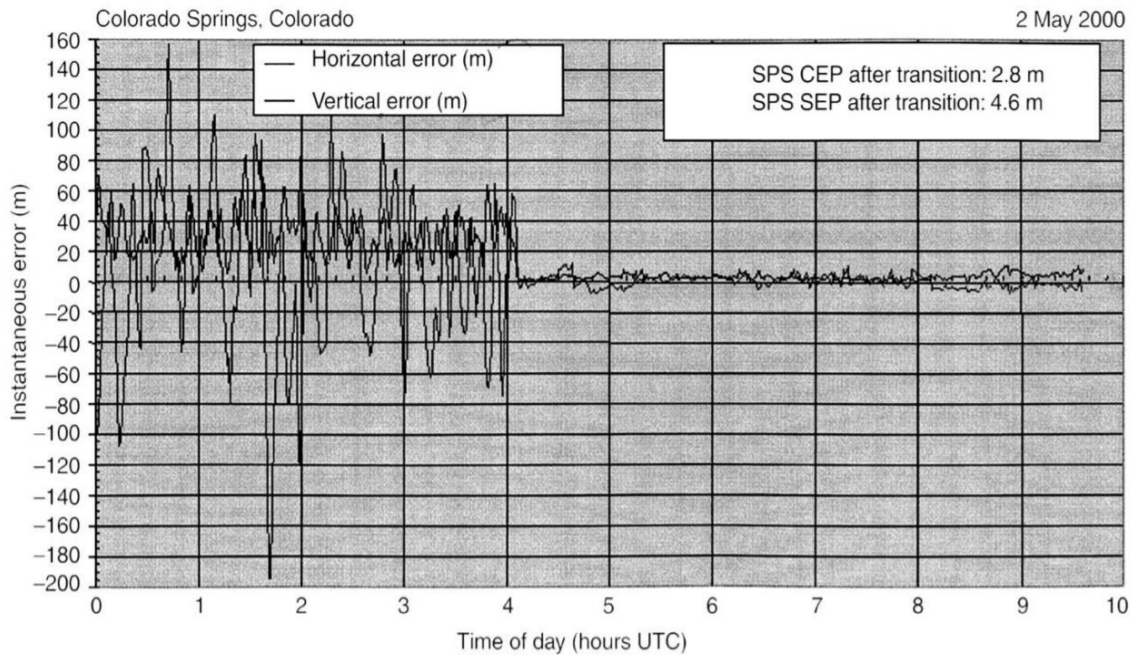
Forgjengerne til dagens GNSS oppstod på 60-tallet under romkappløpet mellom USA og Sovjetunionen. I 1957 skjøt Sovjetunionen opp Sputnik 1, som var den første kunstige satellitten som gikk i bane rundt Jorden. Dette var en primitiv satellitt som kun sendte ut radiopulser. Amerikanske forskere registrerte disse pulsene og kunne ved hjelp av dopplereffekten regne ut satellittens posisjon.

Transit, også kalt NAVSAT og NNSS var det første satellittbaserte navigasjonssystemet som kunne brukes operasjonelt, og ble utviklet av USA. Dette systemet var et resultat av forskningen gjort på Sputnik. I stedet for å finne posisjonen til en satellitt fra et kjent punkt på Jorden, kunne man finne sin egen posisjon på Jorden ved hjelp av en satellitt i en kjent bane (Kjerstad, 2015).

Man benyttet seg av dopplermålinger av en konstant bærebølge fra en enkelt satellitt (se kapittel 2.5.1 Doppler). Man trengte kun en enkel satellitt for å få et fix, men det gikk minst en time mellom hvert fix. Dopplermålinger ble hovedsakelig brukt av militære ubåter, men ble åpnet for sivil bruk i 1968. I 1997 ble Transit lagt ned, etter at NAVSTAR GPS ble erklært operativt i 1995. GPS var i utgangspunktet tiltenkt militær bruk, men etter ulykken med Korean Airlines flight 007 i 1983 – et fly som feilnavigerte inn i russisk luftrom og ble skutt ned – erklærte president Ronald Reagan at GPS skulle gjøres tilgjengelig for sivile brukere (Kjerstad, 2017).

De første årene GPS var i drift var det en begrensning på nøyaktigheten for sivile brukere. Det var en varierende feil i posisjonen, kalt Selective Availability (SA). Den varte fra 1995 til 2000 og ga en tilsiktet feil på rundt 100 meter til sivile brukere. Med høy DOP kunne denne feilen bli forstørret.

Størrelsen på SA var hemmelig, men ved bruk av DGNSS basert på et stort antall bakkestasjoner klarte brukere å regne vekk denne feilen (Grewal, Weill og Andrews, 2007, s. 120-121). President Bill Clinton besluttet å avslutte bruken av SA 1. mai 2000 (Kjerstad, 2017). På Figur 1 ser man størrelsen på forbedringen av ytelse dette medførte.



Figur 1. Endring av feil ved avslutning av SA (Grewal, Weill og Andrews, 2007, s. 145). Det står at målingene er fra 2. mai. Dette er fordi tiden er i UTC.

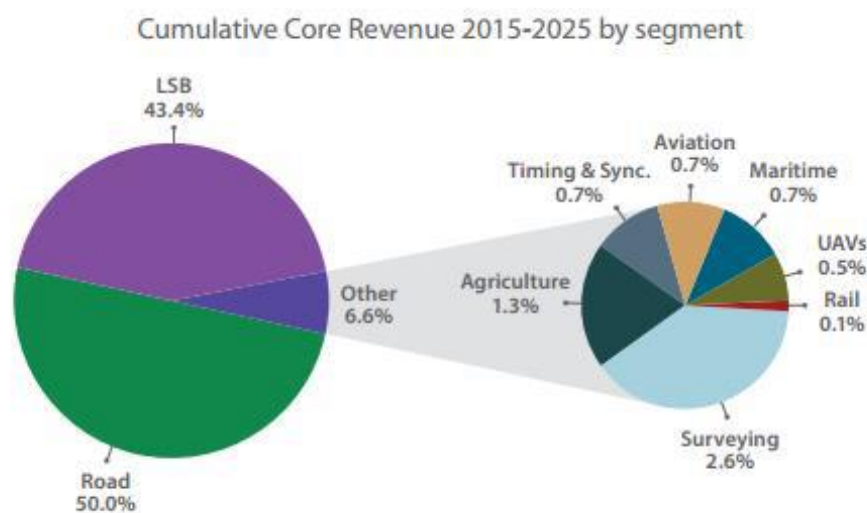
I 1982 ble den første GLONASS-satellitten skutt opp av Sovjetunionen og i 1995 var 24 satellitter operative. Dette ga global dekning, men kun i kort tid. Satellittene hadde kort levetid, og i 2001 var det kun 6 operative satellitter igjen. Det ble bestemt av neste generasjons satellitter skulle skytes opp, og GLONASS var igjen operativt globalt i 2011 med 24 satellitter i konstellasjon.

På slutten av 1900-tallet begynte Kina å utforske ideen om å lage et eget posisjoneringssystem. Dette kalles BeiDou og var tilgjengelig lokalt i Kina fra slutten av 2000. Ved slutten av 2018 var dette systemet globalt tilgjengelig, og vil være fullt operasjonelt med 30 satellitter rundt 2020 (BeiDou Navigation Satellite System, u.å.).

Tidlig på 2000-tallet ble det bestemt at EU skulle lage et eget GNSS kalt Galileo. De første operasjonelle satellittene ble skutt opp i oktober 2011, og man klarte å få en posisjon fra Galileo i mars 2013. Systemet er fortsatt under utvikling og det ventes å være fullstendig operasjonelt med alle sine 30 satellitter i 2020, men man kan, i likhet med BeiDou, allerede bruke systemet (European Commission, u.å.).

## 2.2 Bruksområder i dag

I dag har GNSS mange bruksområder. Det blir brukt i alt fra fly, anleggsmaskiner, biler, romfarkoster og kartlegging til jordbruk. GNSS har revolusjonert hvordan kartlegging og oppmåling blir gjort. En får nå et mer nøyaktig resultat og prosessen har blitt mer effektiv enn tidligere. Når en navigerer droner og finner posisjonen til satellitter i lave baner og romfartøyer brukes GNSS. Et førerinformasjonssystem som er basert på GNSS er en standard på de fleste nye personbiler. I følge Bjørn Magne Elnes i Aventi, en av foredragsholderne på Posisjonskonferansen 2019, er det eksperimentert på å ha kontinuerlig signal til førerinformasjonssystemet gjennom tunneler, da signal fra GNSS faller ut i tunneller (Forssell, 2018a).



Figur 2. Brukerandeler av GNSS (Redelkiewicz, 2019)

Andre viktige, men noe mindre kjente bruksområder av GNSS er styring av kraftnett, synkronisering av mobiltelefonnett og deteksjon av jordskjelv og kontinentaldrift. En kan også forbedre værvarslingstjenesten ved at GNSS-målinger skaffer informasjon om troposfæreforhold. Dette kan bli gjort fordi slike stasjoner er i kjente posisjoner, og siden hastigheten av GNSS-signaler avhenger av forholdene i troposfæren får en da informasjon om forholdene i troposfæren (Forssell, 2018a).

På Figur 2, med data fra GNSS Market Report, ser en at produktet med GNSS, som blir solgt mest, er smarttelefoner (Redelkiewicz, 2019). Mobiler får etter hvert to-frekvens GNSS-mottakere, noe som fører til at nøyaktigheten forbedres til 5-10 meter (Söderholm, 2019).

Figur 2 beskriver omsetningstall fra næringer der GNSS blir benyttet. Denne figuren gir da en oversikt over de forskjellige aktørene som utnytter satellitteknologien. Ut ifra tallene kan man også anta en sammenheng mellom omsetning og graden av bruk i de respektive næringene (Redelkiewicz, 2019). Her ser man da at den maritime andelen består bare av 0,7%. Til tross for avhengigheten fartøy har av GNSS, er mobil- og bil-næringen større aktører innen GNSS (Forsell, 2018a).

### **2.3 Generell GNSS oppbygning**

Kontrollsegmentet overvåker og opererer satellittene. Det består av bemannede bakkestasjoner, samt ubemannede antenner rundt om i verden. Norge har blant annet en antenne stående på Svalbard som blir brukt av Galileo (ESA, 2018a). Fra kontrollsegmentet kan romorganisasjonene kontrollere posisjon og banedata til satellittene i rommet, samt endre baneparametere.

Brukersegmentet bruker GNSS-mottakere til å observere og registrere overføringer fra satellittene og utføre posisjon-, hastighet-, retning- og tidsberegninger. Dette segmentet består av både privatpersoner og bedrifter, fra mange forskjellige næringer.

Romsegmentet består av de forskjellige systemenes satellitter. Det finnes flere typer satellitter, men de mest benyttede er satellitter som går i medium earth orbit (MEO), low earth orbit (LEO) og geostationary orbit (GEO) (ESA, 2017). Avhengig av hvilken bane satellittene går i, vil satellittene ha forskjellig bruksområde. GEO satellitter brukes oftest til kommunikasjon, MEO til beregning av posisjon og LEO blir hovedsakelig brukt til søk og redning.

## 2.4 Ytelse

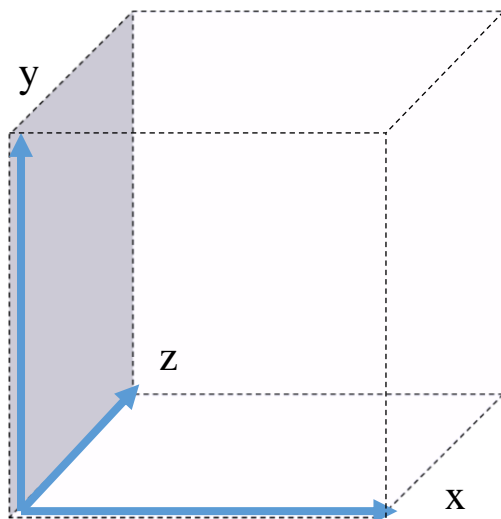
Ytelsen og kvaliteten til et navigasjonssystem kan beskrives ved hjelp av fire sentrale begreper. Disse er nøyaktighet, integritet, kontinuitet og tilgjengelighet. Nøyaktighet er forskjellen mellom brukerens beregnede og faktiske posisjon. Dette vil framstilles sammen med en prosentandel eller brøk, som viser hvor mye av tiden systemet er innenfor en viss feilmargen (Kjerstad, 2015, s. 1-18). Integritet beskriver hvor troverdig man kan regne med at systemet er. Dette innebærer systemets evne til å varsle brukeren ved ytelse lavere enn en satt alarmgrense (Kjerstad, 2015, s. 1-27). Kontinuitet er sannsynligheten for at systemets ytelse er innenfor visse parametere under hele operasjonen (Kjerstad, 2015, s. 1-27).

Hvis et system skal være tilgjengelig, må det tilfredsstille gitte krav til nøyaktighet, integritet og kontinuitet, som gjør at systemet er brukbart. Tilgjengelighet er dermed sannsynligheten for at det er innenfor disse kravene. Tilgjengelighet avhenger både av omgivelsene og utstyrets fysiske egenskaper (Department of Defense, Department of Homeland Security og Department of Transportation, 2017).

I følge Department of Defense, Department of Homeland Security og Department of Transportation (2017) er det mange gode grunner til å øke ytelsen til navigasjonssystemer brukt i den maritime sektoren. Man har i dag økende risiko for sammenstøt og grunnberøringer, større fartøy med lavere smidighet, større behov for trafikkovervåkningssystemer, større trafikk i trange farvann og ønske om å kunne operere i situasjoner med utfordrende værforhold. Man har i tillegg større behov for navigasjonssystemer med høy ytelse for å kunne nyttiggjøre ressurser fra havet og havbunnen på en bærekraftig måte og behov for en mer effektiv logistikk for å senke drivstofforbruk og kostnader.

## 2.5 Grunnleggende prinsipper for posisjonering med satellitt

Det grunnleggende prinsippet for å oppnå enhver posisjon er å danne minimum to stedlinjer. Der stedlinjene krysses vil objektet befinne seg med en viss sikkerhet, men det vil for øvrig eksistere en feilmargin uansett. Denne feilen kaller man standardavvik eller feilellipsoide (se kapittel 2.10.6).



Figur 3. Linjer i 3 akser

Stedlinjepriippet vil kunne utvides til også å gjelde høyde. Det vil da være mer korrekt å betrakte stedlinjene som stedflater. Posisjonen kan derfor bestemmes i tre dimensjoner, både i x, y og z retning (Kjerstad, 2015, s. 1-19). I Figur 3 er de forskjellige retningene i et tredimensjonalt system illustrert.

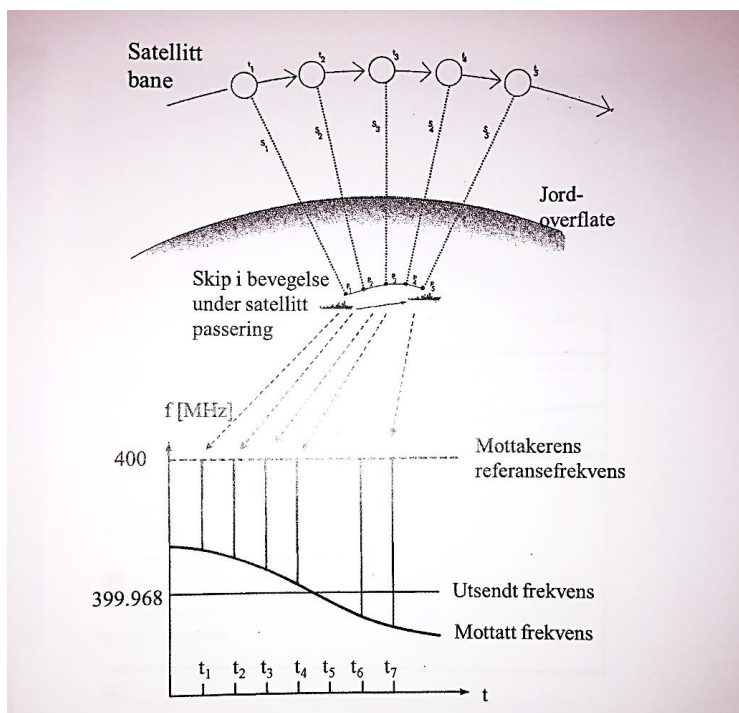
Dersom man skal anvende stedlinjepriippet for hvordan satellitter måler en posisjon, må man se på hvordan stedlinjene dannes ved hjelp av satellitter. Stedlinjene som satellittene gir er sirkulære, og sier bare noe om en gitt avstand til satellitten man benytter seg av. Dersom man mottar signal fra flere satellitter samtidig vil man få flere sirkulære stedlinjer som vil overlape hverandre noe. Posisjon formes deretter fra punktet der stedlinjene sammenfaller. Dette trenger man minimum tre satellitter til.

Fix fra satellitter kommer av å måle tiden det tar signalet å nå mottaker på Jorden. Hastigheten signalet blir sendt ut med er tilnærmet likt lysets hastighet, det vil si 300 000 km/t. Når man vet begge verdiene kan man beregne avstand. Det finnes to hovedprinsipper for å få til dette; dopplermålinger og tids-/avstands målinger (Kjerstad, 2015, s. 1-49).



### 2.5.1 Doppler

Dopplermålinger benytter seg av frekvensskiftet som oppstår mellom den relative hastigheten til sender og mottaker. Senderen vil sende ut informasjon på en konstant frekvens, imidlertid vil den mottatte frekvensen endre seg idet senderen passerer og forflytter seg bort. Dette fenomenet er synlig på Figur 4. For å oppnå en posisjon og stedlinjer der det benyttes dopplerskift, vil det i teorien være nok med to målinger tatt med et tidsintervall imellom. I praksis vil man benytte seg av mange flere målinger, og ideelt sett målinger over noe lengre tid. Har man flere målinger vil feil i banedata bli lettere å fjerne (Kjerstad, 2015, s. 1-49).



Figur 4. Illustrasjon om dopplerskift (Kjerstad, 2015, s. 1-47).

Selv om satellittene med høy elevasjon fungerer godt ved høy bredde, vil det fortsatt vedvare noe problematikk rundt dette. Det ene er at til tross for en god nøyaktighet i bredderetning (nord-sør), vil det oppstå redusert nøyaktighet i lengderetning (øst-vest). Grunnen til at man får redusert nøyaktighet i lengderetning kommer av at stedlinjene man får av de gjentatte målingene vil være omtrent parallelle.

Dersom satellitten som blir benyttet går i en lavere bane, vil det oppstå andre problemer. Det ene er at lavere elevasjon fører til kortere tid der satellitten er synlig, noe som gir færre målinger. For det andre vil problematikk med ionosfære fremtrede her (se kapittel 2.10.5 Ionosfæren og troposfæren). Signalet vil da få en lengre vei å gå gjennom ionosfære og

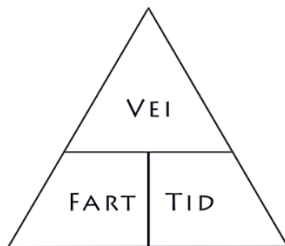
troposfære, noe som fører til støy og reduserer hastigheten til signalet. Derimot vil en satellitt med lavere bane ha større hastighet, og vil derfor lettere oppnå frekvensskiftet.

Samtidig vil benyttelse av dopplerprinsippet føre til en tvetydighet av posisjon, og det vil bli utledet to posisjoner etter en enkelt satellittpassering. Posisjonene som utledes vil ha en lik avstand mellom hverandre, og avstanden mellom de to posisjonene kan bli ganske stor. En trenger derfor minimum to satellittpasseringer for å kunne verifisere den riktige posisjonen av de to. Dette kommer av at ved neste passering vil den ene posisjonen samsvare noenlunde med den første, og den andre vil fortsatt være feil.

Doppler-metoden har hovedsakelig blitt brukt innen SAR-systemet COSPAS/SARSAT. Hver satellitt brukt i SAR vil kunne være synlig i opptil 20 minutter. I dette tidsrommet vil man få ut flere målinger, noe som vil gi en overenstemmelse av posisjonen til fartøyet i bevegelse over tid (Kjerstad, 2015, s. 1-47).

## 2.5.2 Tids-/avstandsmåling

Den andre metoden brukt i satellitt posisjonering er tids-/avstandsmåling, også kalt pseudorange. Denne metoden er mer anvendt i satellitt posisjonering i dag enn doppler-metoden. Her benyttes det MEO-satellitter som går i en sirkulær bane rundt Jorden, med forskjellige baneplan. Disse har en høyde på 19.000-24.000 km.



Figur 5 Vei-fart-tid-trekanten

Tids-/avstandsprinsippet bygger på formelen for vei-fart-tid. Kjenner man utbredelsehastigheten på signalet, og måler tiden signalet overføres over en kjent avstand, får man ut avstanden. Formelen kan settes opp slik:  $R = c \times t$ , hvor R er range, c er fart og t er tid. I Figur 5 kan man se en fremstilling av vei-fart-tid formelen. I likhet med all benyttelse av satellittposisjonering, vil man her også være utsatt for feilkilder (se kapittel 2.10).

I teorien trenger man tre satellitter for å finne posisjon med pseudorange. En løsning som dette vil være utsatt for feil i tidsmålingen. For å komme rundt dette benyttes det en fjerde avstandsmåling for å korrigere for eventuelle tidsfeil. Tidsfeil i oversendt signal fører til at stedlinjene forflytter seg, og at den faktiske posisjonen ligger utenfor feilellipsoiden stedlinjene danner (Kjerstad, 2015, s. 1-49).

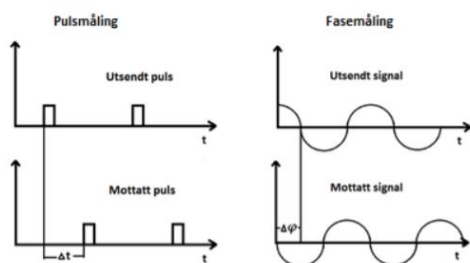
### 2.5.3 Kodemåling

Kodemåling på bærebølgen er den mest robuste metoden for å bestemme avstanden til satellitten (Kjerstad, 2015, s. 1-71). Den unike kodesekvensen fra pseudo-random noise (PRN) blir brukt til å bestemme satellittsignalenes ankomsttid til mottakeren. Ved hjelp av navigasjonsmeldingen finner man ut når utsendingstidspunktet var. Ved å multiplisere lydhastigheten med forskjellen mellom utsendelses- og ankomst-tidspunktet finner man avstanden mellom mottaker og satellitt (Forssell, 2018a).

På bærebølgen fra GPS-satellittene er det modulert to PRN-koder. Disse kodene er kalt P-kode (Precision eller Protected) og C/A-kode (Clear/Acquisition). Både P-koden og C/A-koden er i utgangspunktet åpne og fritt tilgjengelige for alle. P-koden er i tillegg kryptert. Resultatet etter kryptering kalles Y-kode. Y-koden kan derfor kun benyttes i spesielle mottakere, i hovedsak militære brukere i NATO-land (Forssell, 2018a).

Man kan ikke direkte korrigere for ionosfærens innvirkning ved å bruke C/A-koden, siden den bare er tilgjengelig på L1 frekvensen. Dersom en bruker bærebølger med både L1 og L2 kan en beregne feilen som oppstår i ionosfæren (Forssell, 2018a). (Se kapittel 2.10.5).

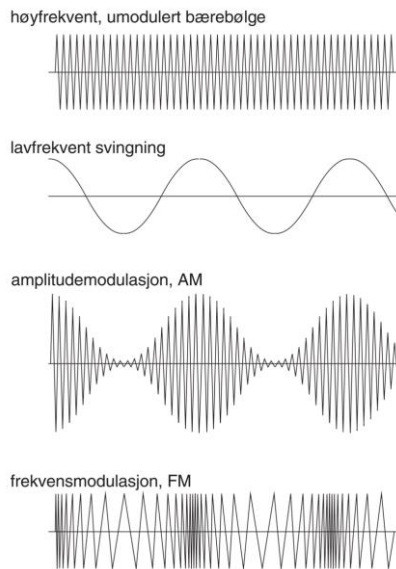
### 2.5.4 Fasemåling



Figur 6. Pulsmåling og fasemåling (Tanner, 2016).

En annen metode for å bestemme avstanden til satellitten er fasemåling på bærebølgen. Som en ser på Figur 6 er fasen periodisk på  $360^\circ$ , noe som tilsvarer en bølgelengde. Dette skaper flertydighetsproblem fordi det er et meget stort antall bølgelengder i signalet til satellittene. Flertydighetsproblemet kan løses ved at mottakeren måler forskjellen mellom signaler fra to og to satellitter og sammenligner disse forskjellene med tilsvarende målinger i en annen mottaker i en kjent posisjon. Ved bruk av statiske metoder og avansert signalbehandling kan resterende flertydigheter løses. En bestemmer da mottakerens posisjon i forhold til referansemottakerens posisjon (Forssell, 2018a).

## 2.6 Modulasjon



Figur 7. Forskjellige typer modulasjon (KF/Store norske leksikon; Lundheim, 2018a)

I radiobaserte systemer er det direkte signaltilstander som skal preges inn på bærebølgen. På Figur 7 er det illustrert de vanligste metodene som blir brukt, amplitudemodulasjon (AM) og frekvensmodulasjon (FM). Pulsmodulasjon (PM) er også vanlig. En bruker gjerne en kombinasjon av disse modulasjonene. Ved valg av modulasjonsmetode tar man hensyn til lav bitfeilsannsynlighet og god utnyttelse av båndbredde.

### 2.6.1 Amplitudemodulasjon

Amplitudemodulasjon er basert på at informasjonen blir uttrykt ved små variasjoner i bærebølgens styrke (amplitude), i takt med basisbåndsignalet. Den vanligste formen for AM er double sideband-modulasjon (DSB). Denne består av to sidebånd som begge er en kopi av basissignalet, og en umodulert signalkomponent av bærebølgen. Den umodulerte bærebølgekomponenten kan fjernes eller undertrykkes for å redusere sendereffekten, men det vil da komplisere demodulasjonen. AM krever høy utsendingseffekt og er følsom for støy, men båndbredden er relativt liten (Kjerstad, 2015, s. 4-63; Lundheim, 2018b).

### **2.6.2 Frekvensmodulasjon**

Frekvensmodulasjon er når bærebølgens styrke er konstant og modulasjonsfrekvensen varierer i takt med bærefrekvensen. Informasjonen blir uttrykt ved små variasjoner i bærefrekvensen. Frekvensbildet til FM er mer sammensatt enn AM og vil derfor kreve større båndbredde.

Den modulerte bærebølgen har ved deviasjon på  $<1$ , et spektrum med to sidebånd og en båndbredde som er omtrent to ganger båndbredden av det modulerte signalet. Det ene sidebåndet har 180 graders faseforskjell til det andre, men begge inneholder all informasjonen. Ved å øke deviasjonen øker kvaliteten til det overførte signalet, og dermed båndbreddeforbruket (Kjerstad, 2015, s. 1-34, 34-63; Lundheim, 2018c).

### **2.6.3 Pulsmodulasjon**

Den vanligste formen for pulsmodulasjon, er at bærebølgen blir slått på og av. Tiden når bærebølgen går ut er pulsen. Informasjonen preges inn i bærebølgen ved å variere amplituden av den enkelte pulsen, og vil være en form for kode.

Lengre bort fra pulsens grunnfrekvens blir amplituden redusert gradvis. Båndbredden vil være direkte avhengig av pulslengden, og blir derfor relativt stor (Kjerstad, 2015, s. 1-34 til -35; Øverby, 2013).

## **2.7 Karakteristikker for forskjellige GNSS**

### **2.7.1 GPS**

Romsegmentet består av 24 satellitter. Dette kan variere noe da en ofte har litt flere satellitter tilgjengelig, siden en må ta satellitter ut av drift for å drive vedlikehold. GPS har normalt 31 operative satellitter, og kan ikke ha flere satellitter enn dette i omløp. I tillegg har man noen eldre satellitter i omløp, som reserve. Satellittene til GPS er fordelt i seks jevnt fordelte baneplan langs ekvator. Dette for at brukere skal kunne ta imot signaler fra minst fire satellitter til enhver tid (Forssell, 2019a).

Baneplanet danner en vinkel med ekvatorplanet som er  $55^\circ$ . Satellittene er 20180 kilometer over jordoverflaten. GPS har et kodedelt system der hver satellitt har en egen PRN-kode. Hovedkontrollstasjonen til GPS, i Colorado Springs, USA, kontrollerer satellittene via 12 antennestasjoner som laster opp data til satellittene og 16 monitorstasjoner som mottar og evaluerer satellittenes signaler (Forssell, 2019a).

### 2.7.2 GLONASS

GLONASS ligner veldig på GPS og Galileo i virkemåte og posisjonsnøyaktighet. Det er opprinnelig et russisk militært system som er åpent for sivilt bruk. Satellittene går i baner 19100 km fra Jorden. Banene til satellittene er fordelt på tre plan med en inklinašjonsvinkel på  $64,8^\circ$ ,  $120^\circ$  fra hverandre og satellittene er jevnt fordelt i sine baneplan (Forssell, 2018b).

Dagens satellitter er GLONASS-M, andre generasjon, som har en levetid på minst syv år og GLONASS-K, tredje generasjon, som har en levetid på 12 år. GLONASS-M bruker laserreflektorer til nøyaktig banebestemmelse og cesiumklokker gir tidsreferansen. (Forssell, 2018b). Kontrollstasjoner på russisk territorium styrer satellittene i GLONASS. Dette svekker presisjon og kontrollmulighetene, siden en da bare har tilgang til satellittene i en begrenset tidsperiode når satellittene er synlige over Russlands horisont. Utvidelse av stasjoner til andre verdensdeler er derfor i gang (ESA, 2018b).

GLONASS er frekvensdelt, noe som betyr at satellittene sender de samme kodene på forskjellige bærefrekvenser. Bredden på det totale frekvensbåndet har vært mulig å halvere, siden to satellitter som ligger på motsatt side av Jorden kan benytte samme frekvenser uten å forstyrre hverandre (Forssell, 2018b). Klokkefrekvensen som blir brukt i kodene (P- og C/A-koden) til GLONASS, er halvparten av GPS sin. Koordinatsystemet, tidsreferansen og modulasjonsformen i navigasjonsmeldingen til GLONASS er litt forskjellig fra GPS, men navigasjonsmeldingen har samme bit-hastighet (Forssell, 2018b).



### 2.7.3 Galileo

Galileo er et sivil system etablert av ESA og EU-kommisjonen. Galileo har større nøyaktighet enn GPS, og ventes å være fullt operativt med 30 satellitter i 2020 (Rost, 2019). The European GNSS Agency (GSA) administrerer Galileo. To kontrollsentraler, utenfor Roma og utenfor München, styrer og kontrollerer satellittene. ESA sitt forskningssenter ESTEC i Nederland, der den tekniske utviklingen styres fra, har et tett samarbeid med EU som har overordnet ansvar for finansiering og ledelse.

Galileo skal bestå av 30 satellitter i tre baneplan, med en banehøyde på 23222 km. Disse satellittene har alle en inklinasjonsvinkel på  $56^\circ$ . De fire første oppskutte satellittene ble brukt til å validere konseptet, men de blir også brukt i den ferdige konstellasjonen. Prinsippet er stort sett som andre satellittnavigasjonssystemer, men Galileo har egen modulasjonsform for signalene.

10 navigasjonssignaler blir sendt i frekvensbåndene 1164–1215, 1215–1300 og 1559–1592 MHz av satellittene. I 1559-1592 er bærefrekvensen 1575,42 MHz, dette er den samme som blir brukt i GPS L1. Dette gjør slik at en-frekvensmottakere forholdsvis enkelt kan benytte seg av både GPS og Galileo. Satellittene sender og mottar egne signaler for SAR.

Atomklokker ivaretar tidsstyringen i hver satellitt, to rubidiumatomklokker og to passive hydrogenmasere. Hovedårsaken til at posisjonsnøyaktigheten til Galileo er bedre enn tidligere eksisterende satellittnavigasjonssystemer er bedre klokker i satellittene (Rost, 2019).

Galileo vil tilby fire typer satellittnavigasjonstjenester. En åpen tjeneste, Open Access Service (OS), er basert på hovedfrekvensen, 1575,42 MHz. Denne er beregnet for massemarkedet og gratis å bruke. De vil også tilby en høynøyaktighets-tjeneste, med krypterte signaler, som gir utvidede ytelser i forhold til OS og fører til garantert kontinuerlig tilgang, integritet og en høyere nøyaktighet. Regulerte tjenester for myndigheter, som er en adgangskontrollert tjeneste, er mer robust, kryptert og med utvidet pålitelighet og driftssikkerhet. Til slutt har de en støttetjeneste til SAR-romsegmentet (Forssell, 2019b).

#### **2.7.4 BeiDou**

BeiDou, tidligere Compass, er et kinesisk prosjekt for å utvikle et uavhengig satellittnavigasjonssystem. BeiDou skal ha satellitter i GEO plassert på 58,75°, 80°, 110,5°, 140° og 160° øst, i MEO 21500 km over bakken og med en inklinasjon på 55° og i IGSO med en inklinasjon på 55°. Det globale systemet skal bestå av tre IGSO, fem GEO og 27 MEO, totalt 35 satellitter (Kjerstad, 2015, s. 1-83; Forssell, 2015).

Frekvensbruk, virkemåte og ytelse til BeiDou vil prinsipielt være temmelig likt GPS. BeiDou har tre bærefrekvenser; B1 (1561,098 MHz), B2 (1207,14 MHz) og B3 (1268,52 MHz). BeiDou sine bånd overlapper delvis med Galileo og GPS sine bærefrekvenser, noe som kan føre til at systemene forstyrrer hverandre (Kjerstad, 2015, s. 1-83; Forssell, 2015).

BeiDou vil tilby to satellittnavigasjonssystemer. En åpen tjeneste som er fritt tilgjengelig for sivile brukere med horisontal nøyaktighet på 10 m, hastighetsnøyaktighet på 0,2 m/s og tidsnøyaktighet på 20 nanosekunder når en har standardavvik på 2  $\sigma$ . Den andre satellittnavigasjonstjenesten for autoriserte brukere vil være mer pålitelig og nøyaktig, også i kompliserte situasjoner. Denne tjenesten vil sannsynligvis kunne inkludere en meldingstjeneste (Kjerstad, 2015, s. 1-83; Forssell, 2015).

## **2.8 GNSS i framtiden**

### **2.8.1 GPS**

Det er påbegynt en omfattende forbedring og modernisering av GPS, som følge av, blant annet, utviklingen av Galileo. Systemytelsen forbedres med nye modulasjonsmetoder, bedre koder og litt høyere utsendt effekt fra satellittene. Alle bakkestasjonene er forbedret og utvidet. GPS har fått et nytt sivilt signal på L2 og en helt ny frekvens kalt L5. Både L2 og L5 vil ha lengre og bedre koder, noe som innebærer økt ytelse for sivile brukere. GPS vil ha 24 satellitter med L2 innen 2020, og 24 med L5 innen 2024. I sammenheng med dette vil flere av de eldre signalene avsluttes (Department of Defense, Department of Homeland Security og Department of Transportation, 2017, s. 3-10; Forssell, 2019a).

Satellittmoderniseringen kan ta 10-15 år å fullføre. Først da har man byttet ut alle de gamle satellittene med nye satellitter som har de nye funksjonene. GPS III, som er tredje generasjons GPS-satellitter, har funksjoner og ytelser som er sammenlignbare med Galileo. Begge vil bruke samme modulasjonsprinsipp og L1-frekvensen. De vil ha forskjellige koder for mottakersignalet som er tilsiktet massemarkedet. En kan da benytte seg av både Galileo- og GPS- signaler samtidig (Forssell, 2019a).

Første oppskytning av GPS III-satellittene skjedde i desember 2018. L1C og L5 på satellittene har en annen type modulasjon og spektralutnyttelse. Dette gir en bedre nøyaktighet og de er kompatible med Galileo sitt signal på samme bærefrekvens (Forssell, 2018a). Hovedsakelig skal de nye GPS-satellittene også ha SAR-mottakere plassert på seg. På lang sikt vil dette ytterligere forbedre redningsmulighetene via SAR-systemet (Mazzuca, 2018).

### **2.8.2 GLONASS**

GLONASS er gjenstand for omfattende forbedringer og modernisering, som blir realisert med K-typen satellitter. GLONASS-K har samme signaler som i dag GALILEO og GPS III har, i tillegg til kodelte signaler på som GPS L1 og GPS L5. Dette er for å lette bruken av alle de tre systemene i samme mottaker. GLONASS-K vil også ha L3, et tredje frekvensdelt signal. Navigasjonsmeldingene vil også inneholde informasjon om avvik mellom tidsreferansene i GPS, GALILEO og GLONASS (Forssell, 2018b).

### 2.8.3 Galileo

Galileo-systemet er planlagt fullt operativt i 2020 (Rost, 2019). Selv om det i skrivende stund ikke er erklært fullt operativt, er satellittene tilgjengelig for sivil bruk allerede nå. Det er planlagt at integritets-overvåking og SAR-tjeneste skal være ukryptert. Tidligere hadde ESA planlagt at disse tjenestene skulle være kryptert (Moldeklev, 2019). Disse tjenestene er tenkt benyttet som støtte til SAR-systemet COSPAS/SARSAT. Satellittene er en utvidet del av SAR-systemet, og blir omtalt som MEOSAR.

Satellittene kan ta imot nødsignaler fra EPIRB på 406 MHz, som er en av de internasjonale nødfrekvensene. Når satellitten tar inn et signal fra denne frekvensen videresender den dette til en bakke-stasjon. Samtidig som signalet blir sendt til en bakke-stasjon, sender den også svar tilbake til nødpeilesenderen, som vil gi en indikasjon til nødstedte om at signalet er mottatt på land. Denne funksjonaliteten vil redusere tiden det tar før nødsignalet blir fanget opp, til omtrentlig sanntid (ESA, 2018a).

Galileo har også allerede iverksatt planlegging for neste generasjons satellitter (Moldeklev, 2019). Grunnlaget for dette er at de tidligste satellittene Galileo skøyt opp i 2011-2013 har begynt å bli gamle, og forventet levetid på satellittene er 12 år. Målet deres er å ha klare transisjonssatellitter innen 2025, som er planlagt å bli skutt ut mellom 2025-2027. På denne måten vil de klare å opprettholde kontinuiteten i antall satellitter i konstellasjonen etter hvert som de nåværende ikke lenger er operative. I Figur 8 ser man at etter 2027 vil antall operative satellitter reduseres dersom konstellasjonen ikke fornyes. Satellittene vil i tillegg trolig ha fleksibelt design og være framtidsrettet mot brukernes behov. sssss

*Figur 8. Utvikling av antall operative satellitter i Galileo (Moldeklev, 2019).*

### 2.8.4 BeiDou

BeiDou skjøt i april opp den 20. satellitten for sin globalt dekkende BDS-3-konstellasjon (BeiDou Navigation Satellite System, 2019). Etter dette gjenstår oppskytning av 10 satellitter før hele konstellasjonen er i drift (BeiDou Navigation Satellite System, u.å.). Kina har ikke offentliggjort hvilke planer de har for å videreutvikle det globale systemet etter 2020, men de skal utvikle et nasjonalt navigasjonssystem med høy presisjon, basert på BeiDou innen 2035 (China National Administration of GNSS and Applications, 2018).

## **2.9 Multi-GNSS**

Multi-GNSS er bruk av mottakere som kan ta inn signaler fra flere GNSS samtidig. Disse satellittene vil ha forskjellige posisjoner og kunne sende på flere frekvenser enn hvis man kun bruker ett GNSS. Man kan dermed få en mer nøyaktig posisjon, en bedre posisjon under dårlige forhold, og man er mindre utsatt for interferens, ved at man benytter seg av flere frekvenser samtidig.

## **2.10 Feilkilder og geometri**

Det finnes flere feilkilder som kan midlertidig redusere ytelsen til GNSS. Den geografiske utstrekningen til disse feilene kan variere i stor grad. Årsaker som kan senke nøyaktigheten til GNSS er fysisk blokkering av antennen, multipathing, interferens, solaktivitet og satellitter som utfører manøvre eller vedlikehold (National Coordination Office for Space-Based Positioning, 2017). Ved normal funksjon kan feilkildene deles inn i tre grupper; satellittene, signalutbredelsen og mottakerne (Forssell, 2018a).

### **2.10.1 Satellittene**

Det er i navigasjonsmeldingen satellittfeilene publiseres. Denne informasjonen inneholder feilinformasjon om satellittklokkenes avvik fra satellittsystemets tidsreferanse og unøyaktige banedata. Disse feilene gir i dag en unøyaktighet på i underkant en meter (Forssell, 2018a).

### **2.10.2 Signalutbredelse**

Utbredelseshastigheten til signalet i Jordens atmosfære, ionosfæren og troposfæren, er ikke det samme som hastigheten i vakuum. Siden signalet går saktere i Jordens atmosfære blir dette en uønsket unøyaktighet. Det finnes forskjellige metoder for å redusere atmosfærefeilene. Reduksjon av troposfærefeilen blir gjort ut fra innlagte modeller i mottakerne, siden troposfærens innvirkning ikke er frekvensavhengig (Forssell, 2018a).

I en en-frekvensmottaker kan en redusere ionosfærefeilen gjennomsnittlig med ca. 50%, siden navigasjonsmeldingen inneholder modellbaserte koeffisienter. En mottaker som måler på to frekvenser vil kunne redusere ionosfærefeilen betraktelig, siden ionosfærens innvirkning er omvendt proporsjonal med bærefrekvensen i kvadrat. Når signalet er korrigert slik vil ionosfærefeilen bli redusert fra omtrent 5-50 m ned til 10 cm (Forssell, 2018a).

### **2.10.3 Mottakere**

Flerveisinterferens, multipath, er en forholdsvis stor feilkilde som blir skapt av signalreflekser fra omgivelsene rundt mottakerantennen. Satellitter som er lavt over horisonten har størst refleksjoner og atmosfærefeil. En bruker derfor å ekskludere satellitter under en viss elevasjonsvinkel, oftest  $10^\circ$  (Forssell, 2018a).

Avstandsfeilen på grunn av multipath kan bli titalls meter ved kodemåling, og feilen er verst for mottakere som står i ro. Ved å ha spesielle antenner og avansert signalbehandling i mottakerne, blir avstandsfeilen med kodemåling bedre. Reflekser av signalet er største feilkilde på to-frekvens kodemåling. Unøyaktigheter i beregningene og støy i forskjellige former er feilbidrag fra mottakerne. Avstandsfeilen som mottakeren bidrar med er ca. en halv meter (Forssell, 2018a).

### **2.10.4 Jamming og spoofing**

Jamming og spoofing kan være er en annen mulig feilkilde. Prinsippet bak jamming er at det sendes støy på en bestemt frekvens fra en radiosender. Dette kan skape store problemer for brukere i nærheten av senderen. Grunnen til at jamming er så effektivt som det er, er at effekten på signal utsendt fra satellittene er ganske svakt. Siden utsendt effekt er så svak, og avstand til Jorden er stor, kreves det ikke mye støy for å slå ut signalet helt. En annen faktor er at alle satellittsystemene benytter nærliggende frekvenser i båndet. Dette fører til at jammingen vil påvirke all eksisterende satellittkommunikasjon i området.

Spoofing er en mer avansert metode for å forstyrre satellittkommunikasjon. Prinsippet her er at en radiosender sender ut falske signaler til mottakere. Mottakere vil da oppfatte dette signalet som om det var en ekte satellitt som sendte signalet. Dette vil føre til at mottakere innenfor spoofingens rekkevidde vil avgi feil posisjonsinformasjon. Til motsetning til jammere vil slikt utstyr være dyrere, og kreve mer kompetanse for å bruke. Spoofing kan bli forvekslet med multipath, og er derfor vanskelig å oppdage. (Kjerstad, 2015).

### **2.10.5 Ionosfæren og troposfæren**

Ionosfæren vil også påvirke kvaliteten på satellittkommunikasjon. Det er et lag som ligger rundt Jorden med en høyde på 60-100 km. Laget er dannet av ladede partikler, hovedsakelig bestående av elektroner og ioner. Partiklene opprettholdes fra stråling fra solen, og variasjoner i graden det vil påvirke et signal vil variere med årstid og tid på døgnet. Når et signal fra en satellitt passerer gjennom ionosfæren, reduseres hastigheten og en avbøyning i signalet oppstår, dette resulterer i en usikkerhet i posisjon (Kjerstad, 2015).

### **2.10.6 Feilellipse**

En feilellipse kan man beskrive som sannsynlighet i en tredimensjonal kurve. Feilellipsen er basert på en Gaussisk kurve (normalfordelt). Denne kurven blir anvendt mot flere stedlinjer, og danner da en to-dimensjonal geometrisk figur.

«Standardavviket,  $\sigma$ , beskriver det sannsynlige avviket fra gjennomsnittsverdien (ca.68% sannsynlig)» (Kjerstad, 2015, s. 1-22). Denne verdien viser hvor stort område man vil finne 68% av målingene innenfor. Dersom en øker standardavviket vil flere målinger være innenfor tillatt feilmargin. Ved  $2\sigma$  vil sannsynligheten være økt til 95% (Kjerstad, 2015).

### **2.10.7 DOP**

Dilution of precision (DOP) er et uttrykk for feil i bestemmelse av avstand til satellittene, og det kan beregnes som et produkt av en geometrifaktor og avstandsfeilene. Ved bruk av fire satellitter blir DOP minst dersom en satellitt er i senit og de andre tre har lav elevasjon og er jevnt fordelt i horisontalplanet.

Lav DOP er ønskelig, og oppnås ved å ha god satellittgeometri. Skip navigerer på et todimensjonalt plan, og trenger – til forskjell fra luftfartøy – ikke å bruke den vertikale akse til å bestemme sin posisjon med tilstrekkelig nøyaktighet. Dette gjør at den mest relevante DOP-verdien for oppgaven vil være HDOP, som er horisontal DOP. Dersom man også inkluderer DOP i høyderetning, får man PDOP.

Posisjonsfeilen horisontal blir ca. 50% større enn feilen i avstandsbestemmelsen, siden horisontal DOP, HDOP, er ca. 1,5. Det er mindre sannsynlig at en satellitt er høyt over horisonten enn at den er lavt over horisonten, derfor blir vertikalfeilen, VDOP, ca. 50% (Forsell, 2018a).



## **2.11 DGNSS**

DGNSS står for differensiell GNSS. DGNSS er en fellesbetegnelse på alle støttesystemer som sender korreksjonsdata benyttet i satellitnavigasjon. Metoden benyttet kalles for differensiell navigasjon, og den baserer seg på at mottakeren får tilsendt korreksjoner fra eksterne kilder som tar høyde for feil fra satellittene. De fleste feil, bortsett fra multipath, kan reduseres ved hjelp av DGNSS (Grewal, Weill og Andrews, 2007).

### **2.11.1 SBAS**

SBAS står for Satellite Based Augmentation System. Her benyttes det GEO-satellitter til distribusjon av korreksjoner. Korreksjonsdataene blir først innsamlet av et nettverk av referansestasjoner, som igjen kommuniserer med en hovedstasjon. I hovedsak er korreksjonene som blir beregnet klokke, banefeil og ionosfærefeil. Siden distribusjonen av korreksjoner er utsendt fra GEO-satellitter, vil et slikt støttesystem ha god rekkevidde. De forskjellige romorganisasjonene har utarbeidet egne SBAS, som dekker de respektive geografiske områdene rundt organisasjonene (Kjerstad, 2015, s. 1-93).

### **2.11.2 CPOS**

CPOS står for Centimeter Position, og er en korreksjonstjeneste levert av Kartverket. Korreksjonene blir levert i sanntid fra et GSM-modem i mottakeren. Det beregnes en virtuell referansestasjon, ut ifra hvor man befinner seg innenfor nettverket til de fysiske basestasjonene. Slik slipper brukeren å benytte seg av en mobil basestasjon for å sende korreksjoner til mottakeren man benytter seg av (Kjerstad, 2015, s. 1-91).

### **2.11.3 Presisjonsbestemmelse**

Precise Point Position (PPP) er ikke basert på differensielle metoder og blir i økende grad brukt. I PPP får mottaker mer nøyaktige data for satellittens baneparameter, klokkefeil og ionosfæreforsinkelse enn det navigasjonsmeldingen gir, via andre kanaler (Forssell, 2018a). Flere bedrifter leverer slike korreksjonstjenester til brukere, for eksempel tjenesten til Fugro, kalt Seastar (Fugro, 2019).

## **2.12 Metodelære**

«Metode er (...) læren om de verktøy en kan benytte for å samle inn informasjon» (Halvorsen, 2012, s. 20). Metode kan deles inn i to hovedgrener; kvantitativ og kvalitativ. Kvantitativ metode baserer seg på å analysere målbare enheter, ofte kan dette være tall. Et annet kjennetegn er at det benyttes et større antall enheter i innsamlingen. Siden innsamlet data ofte er tall, analyseres ved hjelp av statistiske eller økonometriske metoder (Dahlum, 2018). Kvalitativ metode skiller seg fra den kvantitative med at her undersøkes det i dybden, ved hjelp av en eller få observasjoner (Dahlum, 2018). Et annet kjennetegn er at forskeren jobber ofte tett inn mot forskningsobjektet, og ofte er objektet en person. I slike undersøkelser er det viktig at forskeren vet mer enn hva selve observasjonen forteller. Forskeren må være flink til å la egne forutinntatte meninger ikke påvirke observasjonene (Halvorsen, 2012).

## **3 Metode**

### **3.1 Valg av metode**

Tidlig i arbeidet med oppgaven var det litt usikkerhet angående hvordan data skulle innsamles. Denne usikkerheten kom av at oppgaven var veldig fleksibel med tanke på hvilken retning den kunne tolkes. Gruppen var innom flere mulige fremgangsmåter og metoder.

Planen først var å gå for en mer kvalitativ fremgangsmåte, herunder intervju. Tanken bak var å få satt opp intervju med instrumentleverandører. Gruppen ville da undersøke om leverandørene planla å lansere produkt som var kompatible med alle systemene samtidig. Etter grundig undersøkelse fant gruppen ut at det var i planene til flere leverandører, og noen hadde allerede slike produkt tilgjengelig.

Siden dette var tilfellet valgte gruppen å ha en annen vinkling. Målet endret seg da til å intervju personer som jobbet med Galileo systemet. Ønsket var da å finne ut mer om fremtidsplanene til Galileo, og tekniske spørsmål angående systemet som er underveis i skrivende stund.

I videre undersøkelse om hvordan dette kunne iverksettes, fant gruppen ut om en konferanse holdt av Kartverket, kalt Posisjonskonferansen 2019. Gruppen så dette som en god mulighet til å få tilgang til mulige intervjuobjekt, siden representanter fra Galileo, samt andre aktører skulle holde foredrag der. I tillegg til dette var konferansen en kilde til informasjon om utviklingen innen satellitteknologi.

Konferansen ble holdt i midten av mars 2019, i Oslo. På konferansen var det flere aktører fra forskjellige næringsområder tilstede. Foredragene til de forskjellige aktørene omhandlet prosjekter som benytter satellitteknologi. Informasjonen som Galileo-representantene la frem i foredragene var omtrent det samme som litteraturstudie gav gruppen. Ettersom dette var tilfellet besluttet gruppen å gå i en annen retning, siden ny informasjon var vanskelig å oppdrive på dette tidspunktet.

Omsider besluttet gruppen å benytte seg av et praktisk forsøk for innsamling av empiri til oppgaven. Et praktisk forsøk ble ansett av gruppen som den beste fremgangsmåten for innsamlingen. Grunnlaget for dette var da at kilden til innsamlede data var sikker, og gruppen kunne styre opplegget selv. I tillegg til dette kunne gruppen undersøke om ytelsen ved bruk av multi-GNSS var høyere.

Forsøket baserte seg på å benytte seg av en multi-GNSS-mottaker for å måle DOP over tid. I mottakeren gruppen benyttet var det mulig å velge hvilke system den skulle følge. Dette gjorde det mulig å teste de ulike systemkombinasjonene mot hverandre. Målet med forsøket var å få testet ytelsen fra multi-GNSS målinger mot de mer tradisjonelle systemene, hhv. GPS eller GPS og GLONASS.

### **3.2 Forventninger**

Forventningene til forsøket var at kvaliteten på signalet fra en mottaker som tar inn signal fra alle GNSS satellitter, kontra en som tar inn kun fra GPS og GLONASS, ville være fremtredende. Grunnen til dette er at en multi-GNSS-mottaker har bedre forutsetninger for å gi bedre målinger, selv om den er utsatt for feilkilder eller hindringer. Dette er fordi at flere satellitter er synlige på himmelen. For å belyse dette måtte testen utføres med noen utfordringer tilstede. Utfordringen som ble valgt var å blokkere for synlige satellitter fra sør. Siden Ålesund ligger på en relativt høy bredde, vil de fleste synlige satellittene gå i en bane sør for Ålesund, og vil bli blokkert av fjell. Denne hindringen ble benyttet fordi den er mulig å verifisere, samt endre ved behov.

### 3.3 Rammeverk

For å utføre testen hadde gruppen behov for å låne måleutstyr fra andre. Behovet kom av at mottakere som tar inn alle GNSS er forholdsvis nytt og kostbart. Gruppen forhørte seg først med Ålesund kommune om muligheten for utlån. Utstyret kommunen hadde tilgjengelig tok ikke inn signal fra alle systemene, men de henviste gruppen videre til en bedrift kalt Longvas Oppmåling AS. De var svært imøtekommende og lånte utstyret gruppen trengte for å utføre forsøket.

Tidsrammen for å få utført forsøket hadde stor innvirkning på innhentningen av data. Utstyret gruppen lånte måtte returneres uken etter, grunnet behovet bedriften hadde. Dette førte til at testen måtte utføres innenfor tidsrommet som var tilgjengelig, og familiarisering med utstyret ble noe begrenset. En annen faktor som påvirket tidsrammen var at National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) publiserte en prognose om økt ionosfærisk aktivitet i deler av perioden gruppen lånte utstyret, og gruppen besluttet derfor å vente til påfølgende uke. Valget om å vente kom av at det er vanskelig å nøyaktig måle effekten av vær i rommet, og det ville medbrakt usikre faktorer som kunne forringe kvaliteten av forsøket.

Litt i tråd med faktorene beskrevet over, besluttet gruppen å redusere dataomfanget som skulle samles inn. Beslutningen kom både av at tiden tilgjengelig ble redusert, og at behovet for målinger over lengre tid ikke ble ansett som nødvendig for ønsket resultat. Målingene ble da tatt over 5 minutter etter hverandre, fordelt på hver systemkombinasjon. Målinger over kort tid gjorde at alle tre målingene ble tatt med så like forutsetninger og himmelplokk som mulig. Lange målinger ville gjøre at satellitter brukt på den første målingen, kunne være utenfor rekkevidde på de neste målingene.

### 3.4 Pålitelighet og Validitet

Gruppen forsikret seg om at målingene ble utført riktig, ved at tidsrommet og sted for utførelse ble planlagt på forhånd. Som nevnt tidligere var stedet for utførelsen sentral, men tidsrommet målingen ble utført på var også viktig, siden forsøket burde utføres når den ønskelige konstellasjonen var tilstede. Konstellasjonen som var ønskelig var å ha flere satellitter sør for målings posisjon enn i nord, dette for å oppnå en blokkering av satellittsignal. For å planlegge når på dagen forsøket skulle utføres, benyttet gruppen Trimble GNSS planning ([gnssplanning.com](http://gnssplanning.com)).

Gruppen sørget også for å kontrollere at tilstander i rommet ville påvirke forsøket så lite som mulig. Mulige faktorer som kan påvirke GNSS målinger er solstormer, geomagnetisk aktivitet og ionosfærisk scintillasjon. Siden graden av påvirkning disse faktorene medbringer er vanskelig å kontrollere, var det ønskelig å utføre forsøket under normale forhold. For å kontrollere slike faktorer ble det brukt informasjon fra NOAA sin nettside ([swpc.noaa.gov](http://swpc.noaa.gov)).

En annen faktor gruppen undersøkte var om det skulle foregå jamming i området. Forsvaret bruker å utføre øvelser som involverer jamming, noe som kunne påvirket forsøket i stor grad. Gruppen undersøkte derfor Etterretning for sjøfarende (EFS) 05/19 for å verifisere at det ikke var planlagte øvelser i nærheten under forsøket.

Før gruppen satte i gang med selve feltforsøket, tok gruppen ut nøyaktig posisjon til mottakeren. For å oppnå dette, ble CPOS tjenesten til Kartverket benyttet. Mottakeren kobles opp til en server hos Kartverket, og man får ut korreksjoner i sanntid. Hensikten med dette var å raskt kunne verifisere at parameterne i mottakeren var korrekt innstilt, da spesielt med tanke på samsvar mellom datum. For å ytterligere verifisere dette sjekket gruppen at posisjonen utledet var korrekt ved å benytte Norges Kart.

### 3.5 Styrker og svakheter

Fordelen ved å ha benyttet en kvantitativ metode, herunder et praktisk forsøk selv, er at gruppen får tilgang til håndfaste data som benyttes i en analyse. Innhentet data vil da være utarbeidet av gruppen selv, og kilden til innsamlet data er kjent og sikker. På en annen side var gruppen noe ukjent med utstyret som ble benyttet. Utstyret var som nevnt tidligere landmålingsutstyr, og det differensierer seg en del fra GNSS-mottakere ombord i skip. En annen fordel ved å utføre et forsøk selv er at datainnsamlingen går raskt, og analyseringen kan starte fortløpende.

Mangel på utstyr, og avhengighet av en tredjepart for utlån var en faktor som reduserte tilgjengelig tid til utførelse av forsøket. Dette er nødvendigvis ikke en svakhet i selve metoden benyttet, men heller en konsekvens av rammeverket rundt oppgaven. En ulempe med utstyret var restriksjoner som begrenset utstyrets automatikk angående ønsket innsamlet data. Det var ikke mulig å få utstyret til å logge HDOP-verdiene automatisk over et gitt tidsrom. Dette måtte følgelig hentes ut manuelt, noe som medførte et usikkerhetsmoment under innsamlingen. For å loggføre HDOP-verdiene mest mulig nøyaktig observerte to studenter verdiene samtidig under hele forsøket, slik at det var enighet i det som ble observert. På denne måten reduserte man risikoen for at redusert oppmerksomhet skulle ytterligere redusere kvaliteten på loggførte data. Til tross for denne restriksjonen var andre funksjoner i utstyret svært nyttig. For å overvåke og loggføre de andre verdiene satte gruppen opp en automatisk loggefunksjon over det planlagte tidsrommet.

## 4 Prosess

### 4.1 Forberedelsesfase

Under arbeidet med oppgaven besluttet gruppen seg for å prøve å utføre et praktisk forsøk av satellittmålinger. For å utføre forsøket var gruppen avhengig av å låne utstyr, og det gikk noe tid for å få til dette. Samtidig som gruppen forhørte seg om mulig utlån, startet forberedelsen og utforming av hvordan forsøket skulle utføres, samt hva målet med selve forsøket var. Det ble etterhvert besluttet å dele inn forsøket i tre deler. Planen var da å utføre målinger på tre ulike kombinasjoner av satellitt system.

Målet var at målingene skulle utføres på tilnærmet lik måte, slik at grunnlaget for analysering var det samme i alle tre målingene. Samtidig var hensikten bak forsøket ikke å gå i dybden på ytelsen til måleutstyret. Gruppen ville finne en måte å benytte DOP verdier for indikasjon på kvaliteten av målingene. Dette ville være en god kvalitetsindikator uten behovet for å gå i dybden på mottaker-/sender-kvalitet.

Under planleggingen var det også viktig å finne et sted å utføre forsøket på. Det var ønskelig å ha en blokkering av sikt under forsøket. Dette for å undersøke påvirkningsgraden det hadde på de forskjellige målingene. I hensyn av dette besluttet gruppen omsider å utføre forsøket på nordsiden av Ålesund, nært Flatholmen. Hele området rundt Flatholmen oppfylte kriteriet om blokkert sikt, men nøyaktig målested skulle bestemmes når forsøket ble utført, av praktiske grunner.

I tillegg til planlegging av utførelsen ble det også tidlig i arbeidet jobbet mye med teoriframlegging. Utarbeidelsen av teori tidlig hadde som hensikt å få gruppen raskt inn i temaet, samt å øke forståelsen for de tekniske elementene som inngår i satellittsystemer.



## 4.2 Målefasen

Det ble benyttet samme måleutstyr for alle tre målingene. For å få så likt grunnlag som mulig under innsamlingen for alle tre kombinasjonene, ble målingene utført fortløpende. Utstyret som ble benyttet er synlig i Figur 10. Trimble R10 (bak), digital målebok og PC Vi brukte en Trimble R10 mottaker, samt en tripod som enheten kunne festes på. For å lese data og endre parametere på mottakeren ble det brukt PC og en målebok tilhørende mottakeren.

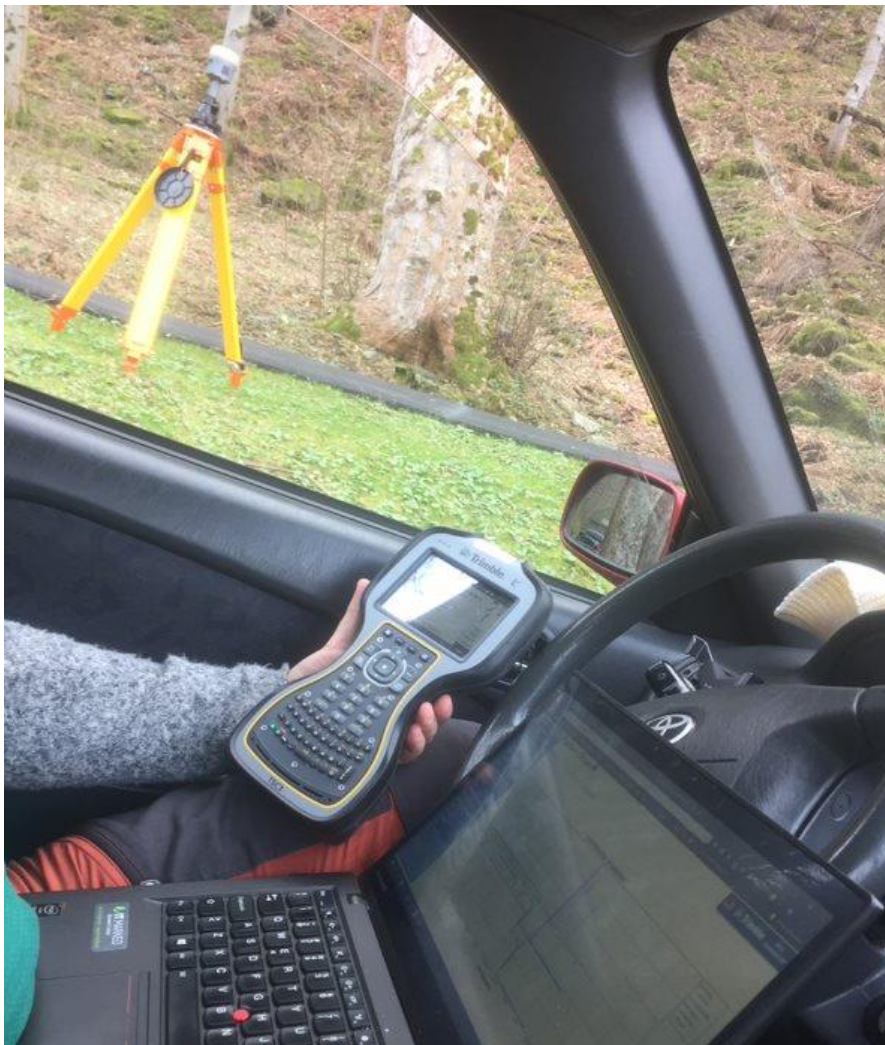
Gruppen ankom målestedet tidlig på formiddagen, etter planen som ble lagt på forhånd. Når forsøket skulle ta sted startet gruppen med å koble seg opp på mottakeren, for deretter å overvåke antall synlige satellitter, og stille inn utstyret. Etter oppsett var gjennomført og første posisjon mottatt, oppdaget gruppen at blokkering av signalet mot sør ikke var tilstrekkelig på original lokasjon. Gruppen besluttet derfor å ta målingene nærmere fjellet, slik at ønsket blokkering av signal ble oppnådd. I Figur 9 er det vist fotografier av lokasjoner og terreng. Etter ny lokasjon var bestemt, startet gruppen å sette opp utstyret på nytt. På ny lokasjon ble blokkeringen med høyere inklinaasje, men observert tap av satellitter ble fremdeles færre enn forventet. Til tross for dette besluttet gruppen å gå videre med forsøket.



Figur 9. Første lokasjon til venstre. Målelokasjon til høyre.

Da oppsett av utstyr var fullført, verifiserte gruppen posisjonen ved benyttelse av CPOS-korreksjoner. Dette ble utført for å kontrollere at måleposisjon var så korrekt som mulig, og at det var samsvar mellom kartdatum som ble benyttet. Dette gjorde vi ved å legge inn posisjonen på norgeskart.no og verifisere mot omgivelsene.

Deretter satte gruppen i gang med selve forsøket. Forsøket ble som tidligere nevnt delt inn i tre deler. Hver måling var fem minutter lang, og data ble logget både på PC og for hånd ved å overvåke måleboken.

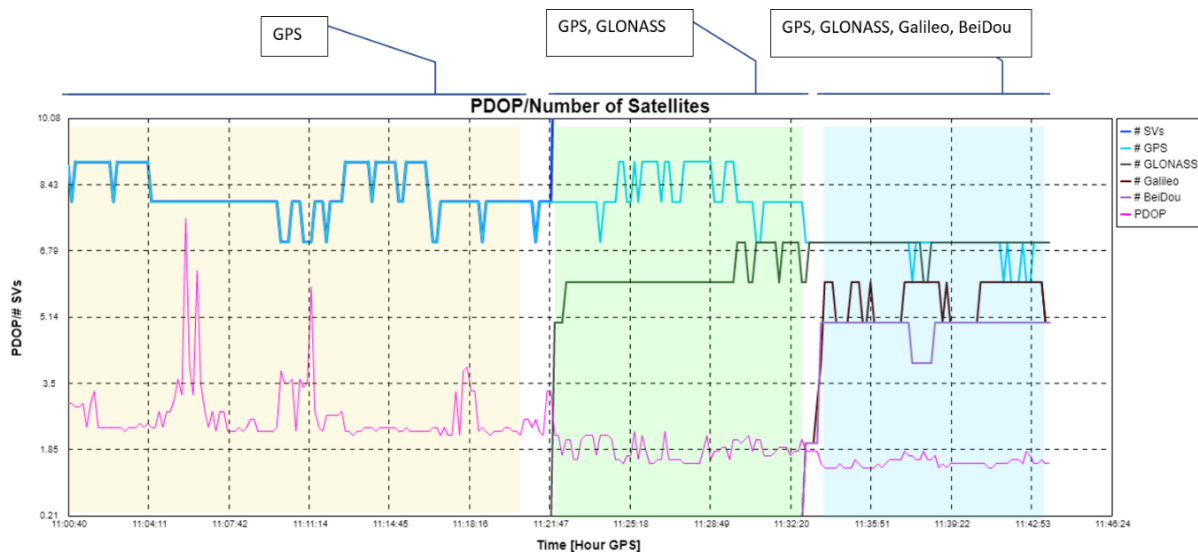


*Figur 10. Trimble R10 (bak), digital målebok og PC*

## 5 Resultater

Tabell 1. Sammendrag av nøkkelverdier fra målingene.

Måling	Antall satellitter										PDOP		HDOP			Horisontal phi [m]			Standardavvik [m] (1σ)		
	GPS		GLONASS		Galileo		BeiDou		Total		min.	max.	min.	avg.	max.	Nord	Øst	Total	Nord	Øst	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	max.	min.	avg.	max.	Nord	Øst	Total	Nord	Øst	
1	7	9								7	9	2	6	1,2	1,4	3,5	2,337	0,242	1,742	11,363	1,865
2	8	9	6	6						14	15	2	2	0,8	1,0	1,5	1,817	0,311	0,938	1,890	0,810
3	6	7	6	7	4	6	4	5	23	25	2	2	0,8	0,8	1,1	0,429	0,104	0,369	1,527	0,628	



Figur 11. Utvikling av PDOP (rosa) gjennom de tre målingene.

### 5.1 Drøfting av utførelse

Gruppen vurderte i utgangspunktet å utføre forsøket noen dager tidligere, men den dagen var det meldt litt forhøyet solaktivitet enn det som er vanlig. Dette ville ha påvirket resultatene og kunne gjort observasjonene mindre nøyaktige. Fartøy opererer ofte med GNSS under slike forhold, så det ville ikke vært lite autentisk, men det ville vært en feilkilde som vi ikke visste størrelsen av. Dermed ville det være vanskeligere å si om endring i ytelse kom fra endring av antall satellitter eller endring av solaktivitetens påvirkning på systemet.

Forsøket ble utført på Flatholmen i Ålesund. Dette er et sted med bratte skrenter i sør og relativt fri sikt mot nord. Dette stedet ble valgt for å simulere en situasjon med litt dårlige forutsetninger for mottak av GNSS-signaler. En slik situasjon kan være at fartøyets GNSS-antenne er hindret i en retning av terreng, en oljeplattform eller et annet skip. Gruppen satte først opp utstyret på et sted hvor det viste seg at terrenget ikke hindret mottak av noen satellitter, og valgte derfor å flytte til et sted som var enda nærmere fjellveggen.

Gruppen valgte å ikke benytte seg av korreksjonssignal som DGNSS, CPOS og SBAS under forsøket. Dette for å få resultater som er så mye som mulig avhengig av tilgjengeligheten av GNSS-satellittene og ikke av andre forhold. Et fartøy vil som regel benytte seg av disse teknologiene. Til tross for at gruppen ikke brukte disse tjenestene, kan det fortsatt hende at mottakeren leverte ytelse som overgår det vil finne på mange skip. Dette er en mottaker beregnet på landmåling, og er blant de beste GNSS-mottakerne som finnes. En annen svakhet er at vi kun brukte én type mottaker. Vi kunne benyttet oss av flere forskjellige modeller for å undersøke likheter og ulikheter i målinger.

Gruppen ønsket å se hovedsakelig på HDOP. Posisjon i høyderetning er sjeldent interessant for fartøy, siden det er en størrelse en ikke kan endre og som de fleste operasjoner ikke blir påvirket av. Gruppen fikk gode grafer for PDOP-verdiene, men det viste seg dessverre å være problematisk å få ut gode data om HDOP fra denne mottakeren og programvaren som ble brukt. Gruppen måtte derfor logge dette ved å se på skjermen til loggeren og notere ned HDOP-verdien for hånd hvert 30. sekund under målingene. Gruppen noterte også ned de høyeste og laveste HDOP-verdiene som ble observert i løpet av målingene. Loggeren oppdaterte HDOP-verdiene med intervaller på cirka ett sekund, så det kan hende det var topper og bunner av HDOP mellom disse intervallene.

Gruppen hadde ikke mulighet til å gjøre alle tre målingene samtidig, og måtte gjøre dem etter hverandre. Derfor valgte vi å gjøre korte målinger på 5 minutter, for at de skulle bli utført under så like forutsetninger som mulig. Lange målinger kunne gjort at himmelplottet endret seg såpass at det ville være vanskelig å si om endringene i ytelse kom fra at gruppen økte antall GNSS som ble brukt, eller om det kom fra en forbedring av geometrien til satellittene gruppen allerede benyttet seg av.

## **5.2 Drøfting av resultater**

Hver av målingene representerer grovt sett sine epoker innen GNSS. Måling nummer 1, som man ser i Tabell 1, er kun GPS og representerer starten av fullt operativ GNSS, måling 2 er GPS og GLONASS, mens måling 3 er både GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou, som representerer det mest moderne innen GNSS. Det er selvfølgelig flere ting enn kun antall GNSS som har utviklet seg siden 1995, slik som teknologien i mottaker og sender, men dette forsøket vil ikke kunne ta hensyn for dette. Målingene gir gruppen fem forskjellige parametere for å vurdere systemets ytelse. Felles for disse fem er at alle disse angår ytelsesbegrepet nøyaktighet.

Antall satellitter vil i tillegg påvirke ytelsesbegrepet kontinuitet. Ved å ha mange satellitter tilgjengelig i utgangspunktet vil man kunne fortsette operasjonen til tross for at noen satellitter blir utilgjengelig.

PDOP og HDOP er geometrien til synlige satellitter. Lave tall gir høy nøyaktighet. I Figur 11 kan en se på den rosa kurven hvordan PDOP endrer seg i de tre målingene. Man ser at kurven er veldig irregulær når det benyttes kun GPS. Deretter blir det en markant endring i variansen til kurven etterhvert som de andre systemene benyttes i tillegg, samt at den holder seg jevnere over tid. Det kan komme av at flere satellitter er tilgjengelig, og dersom en faller ut påvirker det målingen i redusert grad.

Horisontal phi beskriver hvor langt fra startposisjonen mottakeren tror, med 68% sikkerhet, at den har beveget seg i løpet av målingen. En lav phi vil altså bety at posisjonsbestemmelsene som utføres i løpet av målingen har lav geografisk spredning.

Sammendrag og nøkkeltall fra de tre målingene er presentert i Tabell 1. Vi ser på første måling at vi noen ganger kun har 7 satellitter, som ikke er mange flere enn det absolutte minimum for å få en posisjon. Vi kan da ikke stole på at systemet har høy kontinuitet. Til tross for dette har det oftest en PDOP på litt mer enn 2 og en gjennomsnittlig HDOP på 1,4, som fortsatt er bra.

Ved neste måling tar gruppen inn 6 satellitter fra GLONASS i tillegg til GPS-satellittene fra første måling. Nå er så mange satellitter tilgjengelige at man ikke lenger behøver å se på fullstendig tap av posisjon som et nærstående scenario. Gruppen ser en markant forbedring i alle verdiene, men det mest iøynefallende er at PDOP nå er mye mer stabil enn tidligere. Gruppen har dermed en høyere nøyaktighet, altså bedre kontinuitet, og en gjennomsnittlig HDOP som har forbedret seg med 29%. Standardavviket er nå bare en brøkdel av avstanden i første måling. Man ser da at PDOP synker og stabiliserer seg ytterligere.

Siste måling innebærer alle tilgjengelige GNSS-satellitter. Det benyttes 7 fra GPS, 7 fra GLONASS, 6 fra Galileo og 5 fra BeiDou. HDOP forbedrer seg ytterligere 20% fra forrige måling.

## 6 Konklusjon

Gruppen ser at utviklingen av GNSS og oppskytningen av flere systemer har gitt oss en tjeneste med høyere ytelse enn en hadde for 20 år siden. En har tilgang på flere satellitter enn tidligere, som gir en bedre nøyaktighet og kontinuitet. Resterende ytelsesbegreper vil i stor grad være spesifikk for mottaker og operasjon. Selv på områder med dårligere satellittforhold vil en kunne oppnå svært gode DOP-verdier, når en benytter seg av multi-GNSS. Ytelsen vil forbedre seg ytterligere de kommende årene, siden flere satellitter og satellitter med ny teknologi vil skytes opp.

Gruppen klarte ikke i vårt forsøk å dokumentere at det var behov for høyere ytelse. Gruppen fikk utmerkete resultater, selv på et sted hvor en forventet dårlige forhold. Litteratur har likevel påpekt viktigheten av økt ytelse. Alle fem parameterne forbedret seg når gruppen valgte å ta inn flere GNSS. En ser altså at ved å ta inn flere GNSS får man inn flere satellitter som igjen resulterer i bedre nøyaktighet og en kan anta at man oppnår bedre kontinuitet. Dette har man fått muligheten til ved at flere nasjoner har sett nytten av å ha sitt eget GNSS. Siden Galileo og BeiDou vil øke størrelsen på sine konstellasjoner i nær fremtid, kan en anta at en vil kunne få inn flere satellitter og oppnå enda høyere ytelse.

Gjennom utarbeidelsen av oppgaven så gruppen flere muligheter for å utføre lignende forskning i fremtiden. Satellitteknologien er stadig under utvikling, og både Galileo og BeiDou er i ferd med å bli erklært fullt operative. Trolig vil dette øke tilgangen på utstyr som tar inn alle systemene. Lettere tilgang til utstyr vil derfor muliggjøre omfattende tester av systemene under ulike forhold i fremtiden.

## 7 Bibliografi

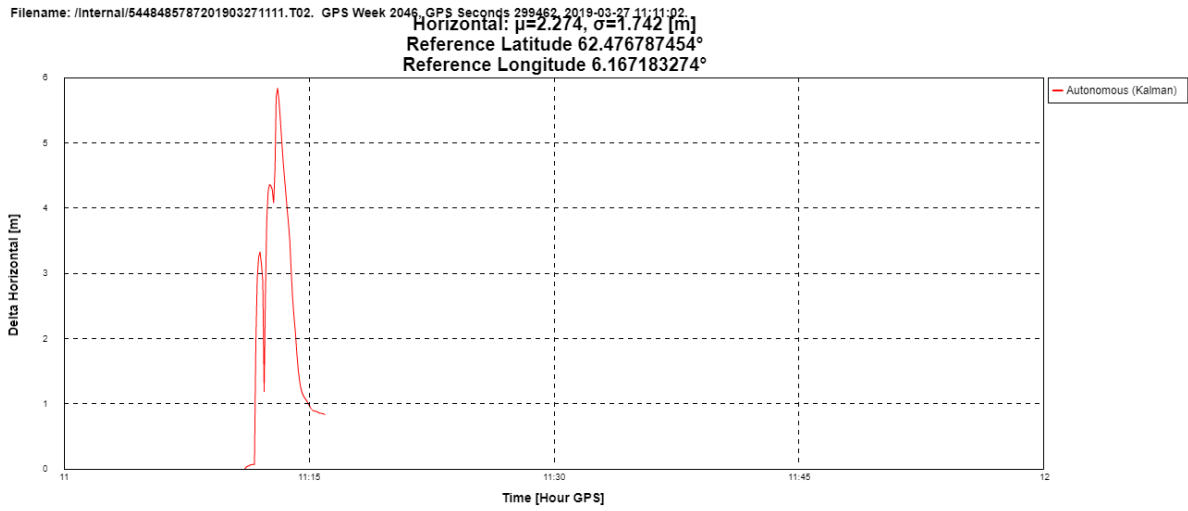
- BeiDou Navigation Satellite System (2019) *China successfully launched the 44th BDS Satellite*. Tilgjengelig fra: [http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201904/t20190423\\_17870.html](http://en.beidou.gov.cn/WHATSNEWS/201904/t20190423_17870.html) (Hentet: 07.05 2019).
- BeiDou Navigation Satellite System (u.å.) *System*. Tilgjengelig fra: <http://en.beidou.gov.cn/SYSTEMS/System/> (Hentet: 01.05 2019).
- China National Administration of GNSS and Applications (2018) *Yang Changfeng, Chief Designer of BeiDou: Next-Generation Constellation Networking of BeiDou Will Be Completed By 2035*. Tilgjengelig fra: <http://en.chinabeidou.gov.cn/c/1133.html> (Hentet: 08.05 2019).
- Dahlum, S. (2018) *Kvantitativ analyse*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/kvantitativ\\_analyse](https://snl.no/kvantitativ_analyse) (Hentet: 07.05 2019).
- Department of Defense, Department of Homeland Security og Department of Transportation (2017) *2017 FEDERAL RADIONAVIGATION PLAN* (Hentet: 01.05 2019).
- ESA (2017) *Types of orbit*. Tilgjengelig fra: [http://m.esa.int/Our\\_Activities/Space\\_Transportation/Types\\_of\\_orbits](http://m.esa.int/Our_Activities/Space_Transportation/Types_of_orbits) (Hentet: 02.05 2019).
- ESA (2018a) *Galileo Search and Rescue Service*. Tilgjengelig fra: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Search\\_and\\_Rescue\\_Service](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Search_and_Rescue_Service) (Hentet: 02.05 2019).
- ESA (2018b) *GLONASS Future and Evolutions*. Tilgjengelig fra: [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS\\_Future\\_and\\_Evolutions](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GLONASS_Future_and_Evolutions) (Hentet: 07.05 2019).
- European Commission (u.å.) *The history of Galileo*. Tilgjengelig fra: [https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history\\_en](https://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/history_en) (Hentet: 01.05 2019).
- Forssell, B. (2015) *Beidou (Compass)*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/Beidou\\_%28Compass%29](https://snl.no/Beidou_%28Compass%29) (Hentet: 08.04 2019).
- Forssell, B. (2018a) *GPS*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/.versions/list/83811> (Hentet: 03.03 2019).
- Forssell, B. (2018b) *GLONASS*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/GLONASS> (Hentet: 29.03 2019).
- Forssell, B. (2019a) *GPS*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/GPS> (Hentet: 29.03 2019).
- Forssell, B. (2019b) *Galileo*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/Galileo> (Hentet: 29.03 2019).
- Fugro (2019). Tilgjengelig fra: <https://www.fugro.com/our-services/marine-asset-integrity/satellite-positioning/seastar> (Hentet: 07.05 2019).
- Grewal, M. S., Weill, L. R. og Andrews, A. P. (2007) *Global Positioning Systems, Inertial Navigation and Integration*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- Halvorsen, K. (2012) *Å forske på samfunnet*. 5. utg. J.W Cappelens Forlag.
- KF/Store norske leksikon. Tilgjengelig fra: [https://media.snl.no/system/images/40212/standard\\_1\\_modulasjon-2.png](https://media.snl.no/system/images/40212/standard_1_modulasjon-2.png).
- Kjerstad, N. (2015) *ELEKTRONISKE OG AKUSTISKE NAVIGASJONSSYSTEMER for maritime studier*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Kjerstad, N. (2017) *Utvikling av robust og nøyaktig satellittposisjonering på skip*. Tilgjengelig fra: <https://docplayer.me/68374715-Utvikling-av-robust-og-noyaktig-satellittposisjonering-pa-skip.html> (Hentet: 05.04 2019).
- Lundheim, L. (2018a) *Modulasjon-omforming*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/modulasjon\\_-\\_omforming](https://snl.no/modulasjon_-_omforming) (Hentet: 11.03 2019).
- Lundheim, L. (2018b) *Amplitudemodulasjon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/amplitudemodulasjon> (Hentet: 11.03 2019).
- Lundheim, L. (2018c) *Frekvensmodulasjon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/frekvensmodulasjon> (Hentet: 11.03 2019).
- Mazzuca, D. L. (2018) *SARSAT MEOSAR Status*. Tilgjengelig fra: <https://www.gps.gov/governance/advisory/meetings/2018-12/mazzuca.pdf> (Hentet: 07.05.19).
- Moldeklev, K. (2019) *Galileo - quo vadis*.

- National Coordination Office for Space-Based Positioning, N., and Timing, (2017) *GPS Accuracy*. Tilgjengelig fra: <https://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy/> (Hentet: 21.03 2019).
- Redelkiewicz, J. (2019) *The role of accurate location in the Internet of Things reality* (Hentet: 07.03 2019).
- Rost, C. (2019) *Galileo er her - Bruk det!*
- Söderholm, S. (2019) *Sub meter accuracy with mass-market GNSS receivers everywhere - dream or reality?*
- Tanner, A. M. (2016) *En kvalitetsundersøkelse av fjernmålingsmetoder fra fly og RPAS*. Tilgjengelig fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/2402969> (Hentet: 08.05 2019).
- Øverby, H. (2013) *Pulsamplitudemodulasjon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/pulsamplitudemodulasjon> (Hentet: 11/03 2019).

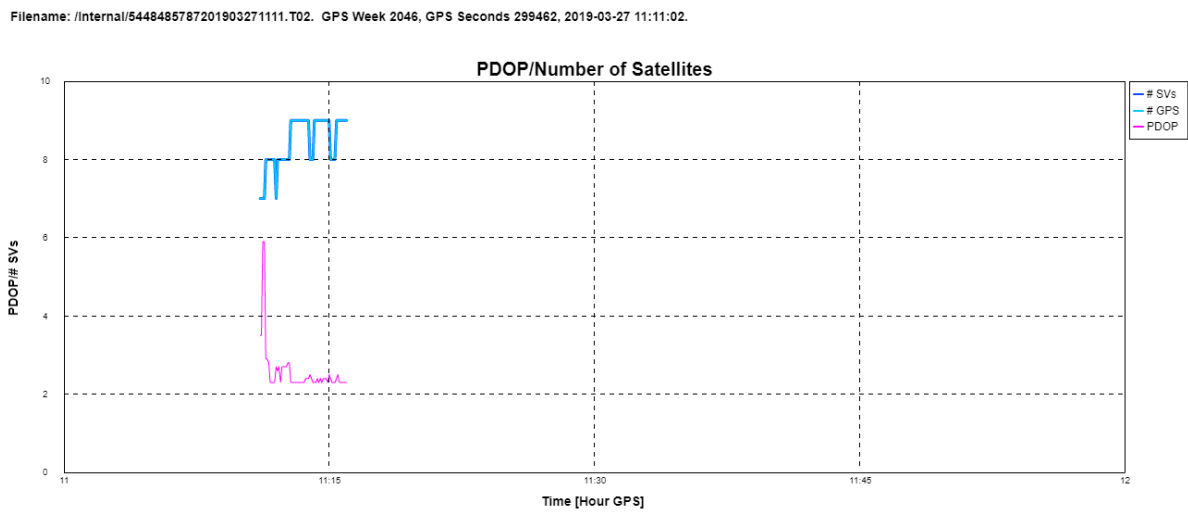


# 8 Vedlegg: Resultater

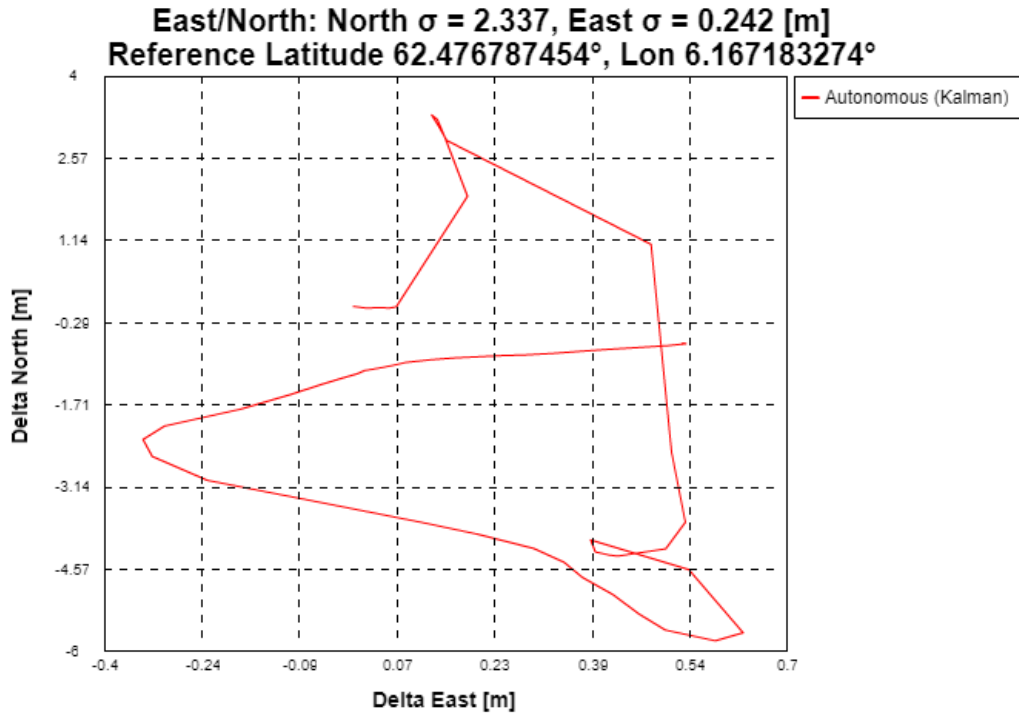
## Måling 1



Figur 12. Utvikling av horisontal phi gjennom måling 1



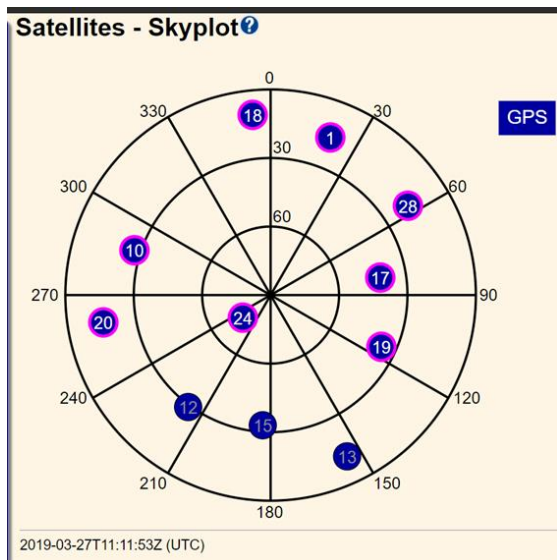
Figur 13. Utvikling av PDOP gjennom måling 1



Figur 14. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 1

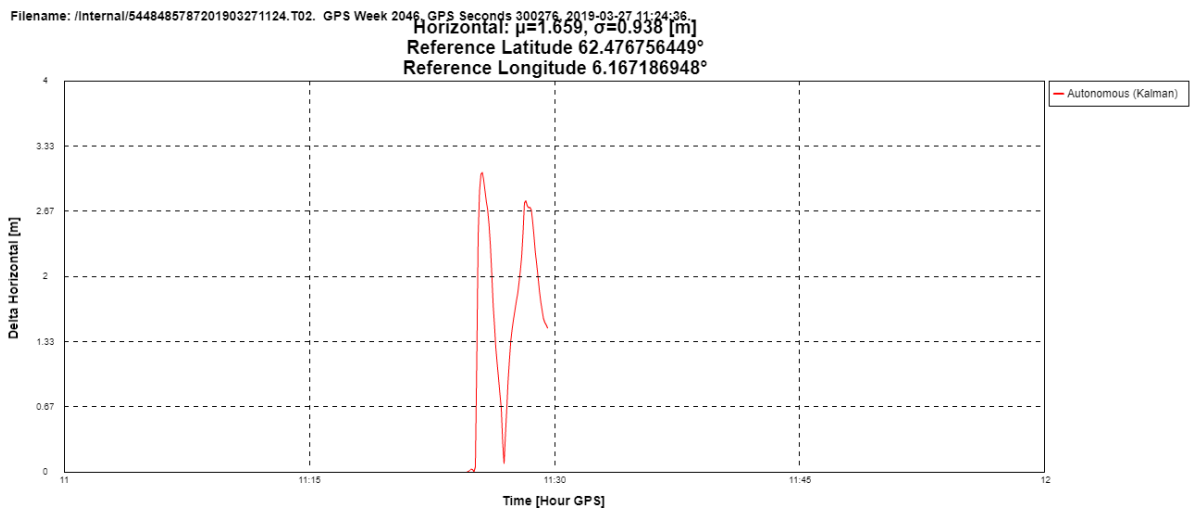
Position		
<b>Position:</b>	<b>Satellites Used:8</b>	<b>Dilutions of Precision:</b>
Lat: 62° 28' 36.29373" N	GPS(8): 1, 10, 17, 18, 19, 20, 24, 28	PDOP: 2.7
Lon: 6° 10' 1.88958" E		HDOP: 1.7
Hgt: 68.631 [m]	<b>Satellites Tracked:9</b>	VDOP: 2.2
Elevation (Ortho.): 23.846 [m,EGM96]	GPS (9): 1, 10, 17, 18, 19, 20, 24, 28, 32	TDOP: 1.4
Type: Autonomous	<b>Receiver Clock:</b>	<b>Error Estimates(1<math>\sigma</math>):</b>
Datum: WGS-84	GPS Week: 2046	East: 1.865 [m]
<b>Velocity:</b>	GPS Seconds: 299555	North: 11.363 [m]
East: 0.01 [m/s]	Offset: -0.09716 [msec]	Up: 11.802 [m]
North: 0.03 [m/s]	Drift: -0.95254 [ppm]	Semi Major Axis: 11.366 [m]
Up: 0.01 [m/s]	<b>Multi-System Clock Offsets:</b>	Semi Minor Axis: 1.847 [m]
<b>Position Solution Detail:</b>	Master Clock System: GPS	Orientation: 178.7°
Position Dimension: 3D	GLONASS Offset: -14.8 [ns]	
Position Engine: Kalman	GLONASS Drift: -0.012 [ns/s]	
Augmentation: GPS		
Height Mode: Normal		
Correction Controls: On		
2019-03-27T11:12:17Z (UTC)		

Figur 15. Parametere for måling 1



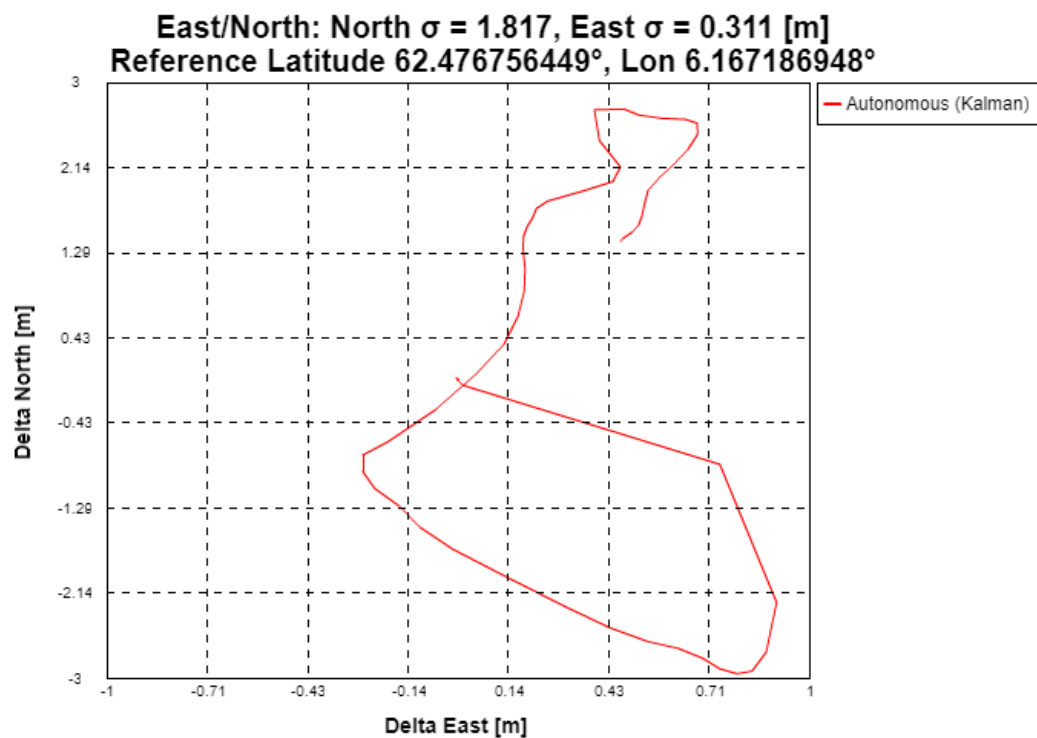
Figur 16. HimmelploTT for måling 1. Satellittene uten rosa sirkel er ikke synlige for mottakeren.

## Måling 2



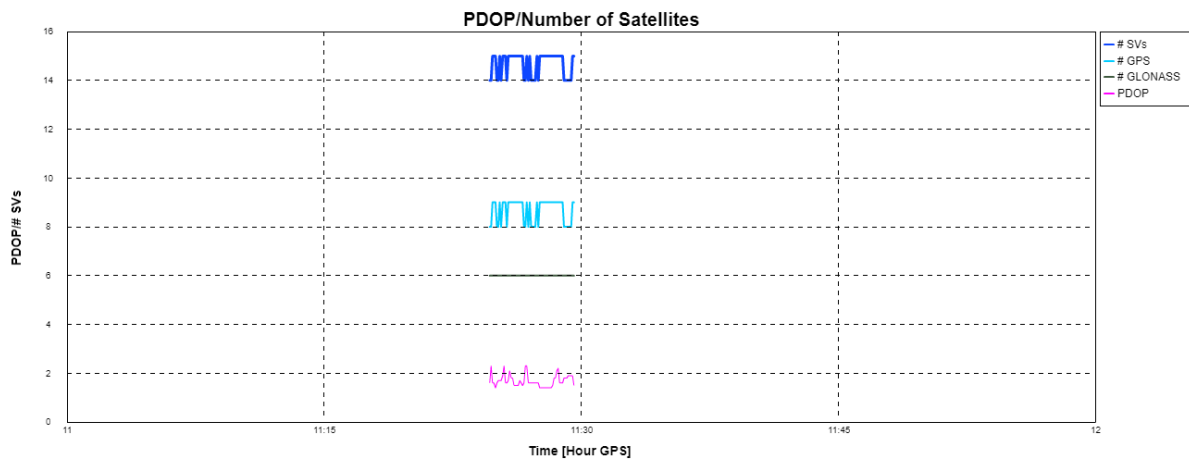
Figur 17. Utvikling av horisontal phi gjennom måling 2

Filename: /Internal/5448485787201903271124.T02. GPS Week 2046, GPS Seconds 300276, 2019-03-27 11:24:36.



Figur 18. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 2

Filename: /Internal/5448485787201903271124.T02. GPS Week 2046, GPS Seconds 300276, 2019-03-27 11:24:36.



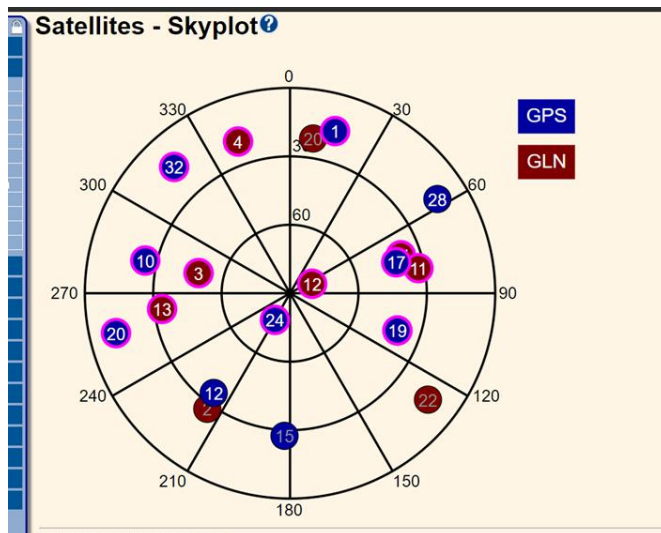
Figur 19. Utvikling av PDOP gjennom måling 2

**Position**

<p><b>Position:</b>                  Lat: 62° 28' 36.32384" N                  Lon: 6° 10' 1.87294" E                  Hgt: 66.962 [m]                  Elevation (Ortho.): 22.177 [m,EGM96]                  Type: Autonomous                  Datum: WGS-84</p>	<p><b>Satellites Used:15</b>                  GPS(9): 1, 10, 12, 17, 19, 20, 24, 28, 32                  GLONASS(6): 3, 4, 11, 12, 13, 21</p>	<p><b>Dilutions of Precision:</b>                  PDOP: 1.7                  HDOP: 0.9                  VDOP: 1.4                  TDOP: 0.9</p>
<p><b>Velocity:</b>                  East: 0.00 [m/s]                  North: 0.00 [m/s]                  Up: 0.00 [m/s]</p>	<p><b>Satellites Tracked:15</b>                  GPS (9): 1, 10, 12, 17, 19, 20, 24, 28, 32                  GLONASS (6): 3, 4, 11, 12, 13, 21</p>	<p><b>Error Estimates(1σ):</b>                  East: 0.810 [m]                  North: 1.890 [m]                  Up: 2.451 [m]                  Semi Major Axis: 1.896 [m]                  Semi Minor Axis: 0.796 [m]                  Orientation: 175.1°</p>
<p><b>Position Solution Detail:</b>                  Position Dimension: 3D                  Position Engine: Kalman                  Augmentation: GPS+GLN                  Height Mode: Normal                  Correction Controls: On</p>	<p><b>Receiver Clock:</b>                  GPS Week: 2046                  GPS Seconds: 300290                  Offset: 0.20368 [msec]                  Drift: -0.95313 [ppm]</p>	<p><b>Multi-System Clock Offsets:</b>                  Master Clock System: GPS                  GLONASS Offset: -14.3 [ns]                  GLONASS Drift: -0.010 [ns/s]</p>

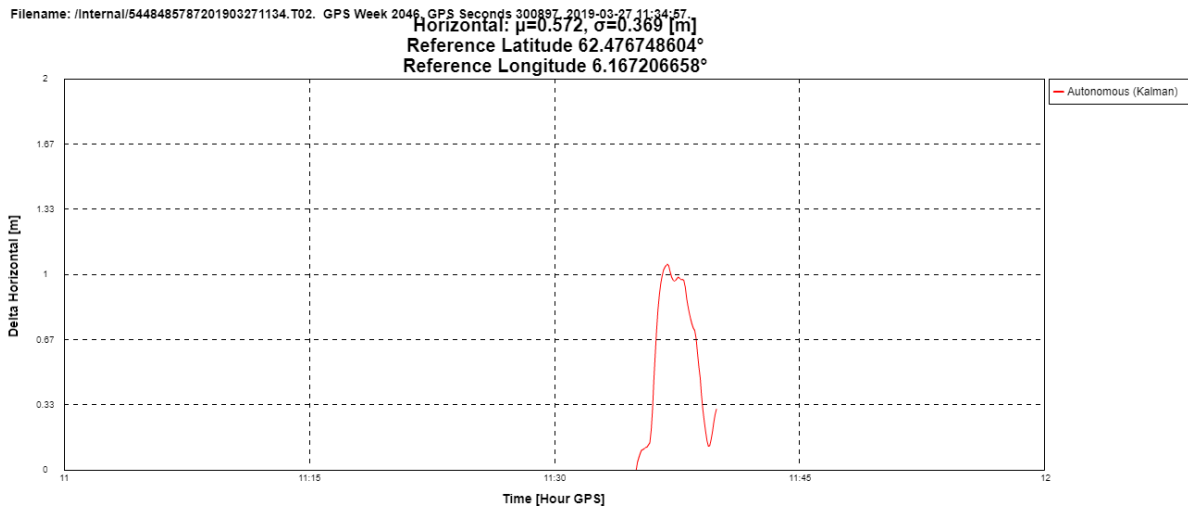
2019-03-27T11:24:32Z (UTC)

Figur 20. Parametere for måling 2

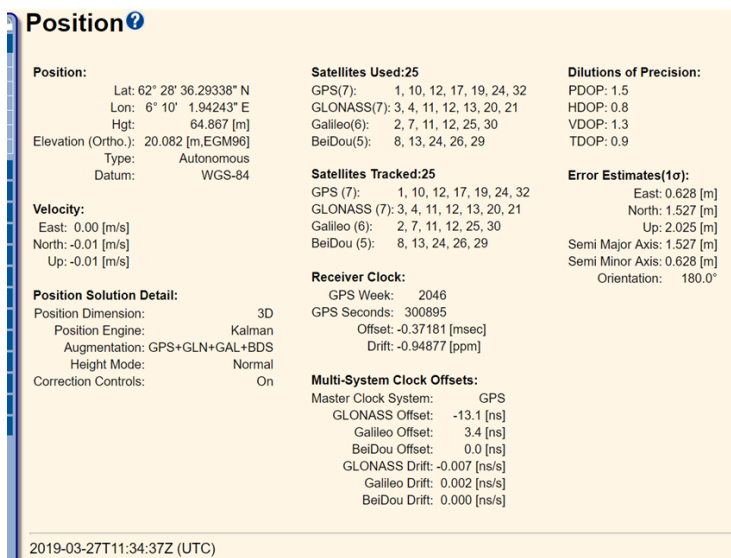


Figur 21. HimmelploTT for måling 2. Satellittene uten rosa sirkel er ikke synlige for mottakeren

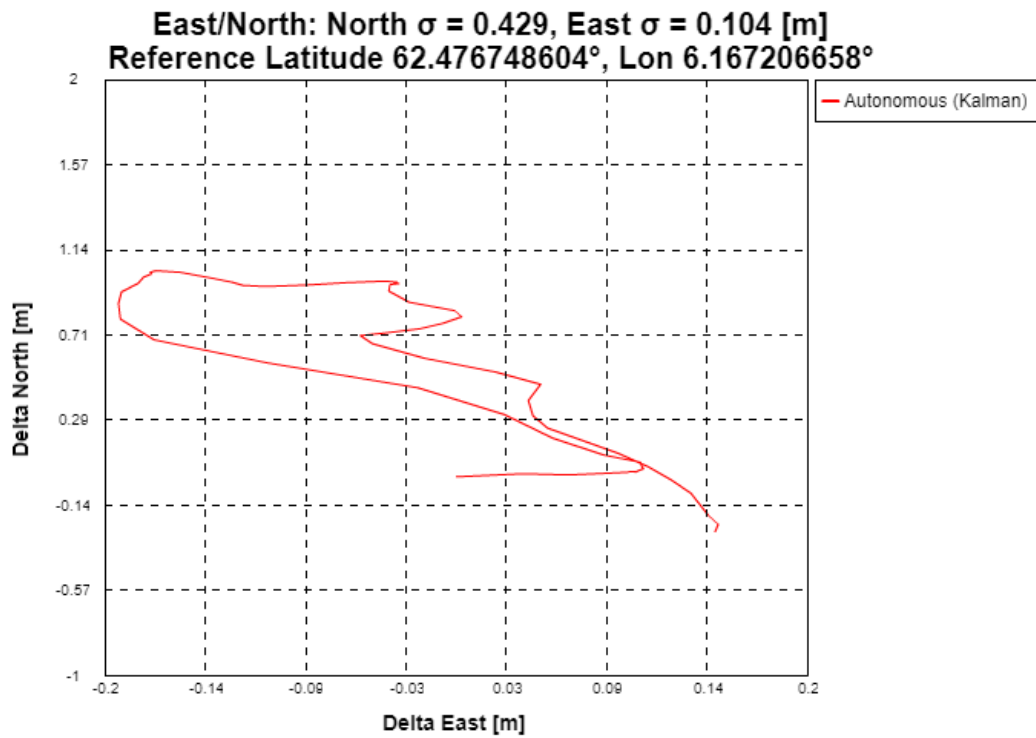
### Måling 3



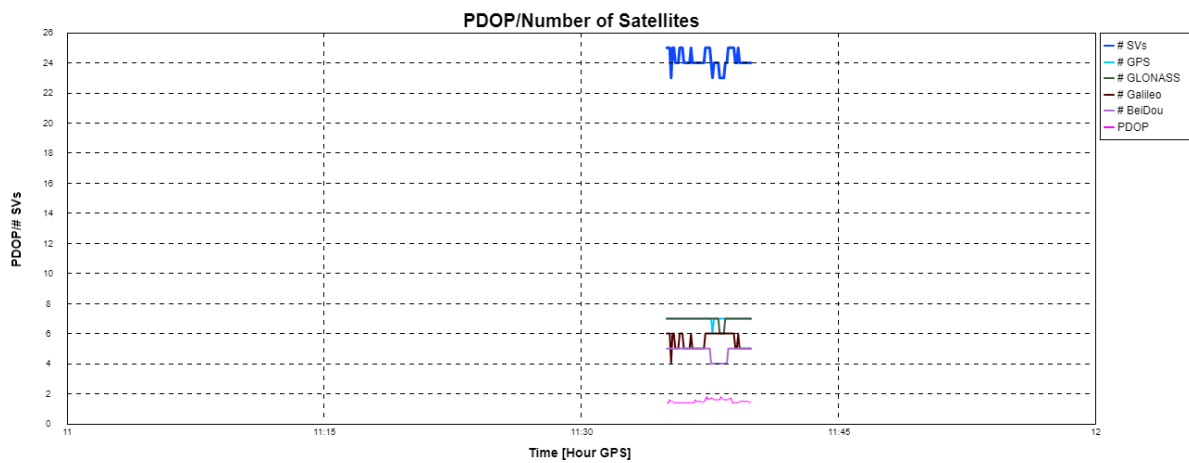
Figur 22. Utvikling av horizontal phi under måling 3



Figur 23. Parametere for måling 3

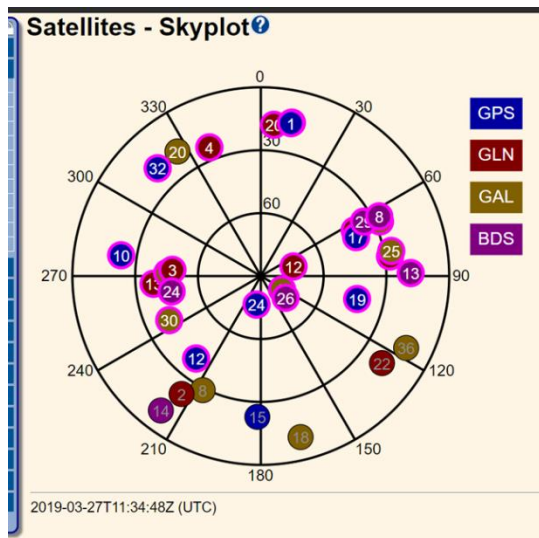


Figur 24. Utvikling av horisontal phi i nord- og øst-retning under måling 3



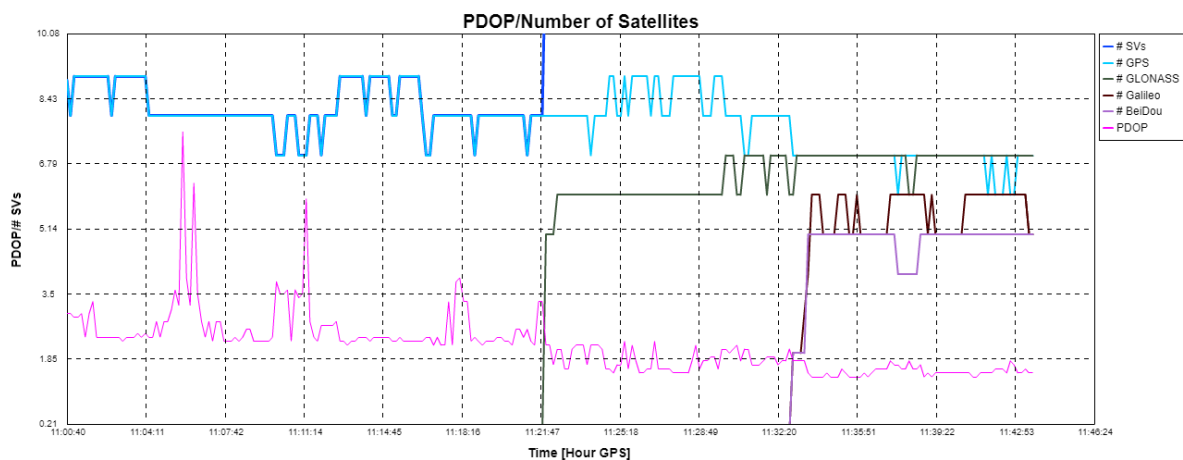
Figur 25. Utvikling av PDOP gjennom måling 3





Figur 26. HimmelploTT for måling 3. Satellittene uten rosa sirkel er ikke synlige for mottakeren.

## Total måling



Figur 27. PDOP og antall synlige satellitter gjennom alle 3 målingene

## Avleste HDOP-verdier

Tabell 2. HDOP-verdier notert ned for hand under forsøket.

Tid (mm:ss)	HDOP		
	Måling 1 GPS	Måling 2 GPS+GLONASS	Måling 3 GPS+GLO+GAL+BEI
00:00	1,7	1,4	0,8
00:30	1,3	0,8	0,8
01:00	1,6	1,3	0,8
01:30	1,2	1,0	0,8
02:00	1,2	1,0	0,9
02:30	1,6	1,0	1,0
03:00	1,2	1,0	0,9
03:30	1,5	0,8	0,9
04:00	1,4	1,0	0,8
04:30	1,2	1,0	0,8
05:00	1,3	0,9	0,8
Observert høyeste	3,5	1,5	1,1
Observert laveste	1,2	0,8	0,8
Gjennomsnitt	1,4	1,0	0,8