



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2019 30 stp

Fakultetet for realfag og teknologi
Jon Glenn Omholt Gjevestad

Galileo – ytelsesanalyse langs norskekysten

Galileo -
performance analysis along the Norwegian coast

Sindre Løchting og Lars Wisth Kolltveit
Geomatikk

(Tom side)

Sammendrag

Dagens samfunn er svært avhengige av satellittbaserte systemer for navigasjon (GNSS). I 1999 startet den europeiske romfartsorganisasjonen (ESA) arbeidet med et sivilt satellittnavigasjonssystem som skal være uavhengig fra de militære systemene til USA og Russland. Etter snart 20 år har dette blitt til Galileo med 22 aktive satellitter i bane. Siden 2010 har Norge, med Norsk Romsenter i spissen, vært en del av Galileo-prosjektet. På oppdrag fra Norsk Romsenter skal denne oppgaven evaluere den tilgjengelige ytelsen til Galileo langs norskekysten, samt gi en pekepinn på ytelsen til ionosfæremodellen, NeQuick-G. Galileo vil bli evaluert opp mot bransjestandarden, GPS, mens NeQuick-G vil bli sammenlignet med Klobuchar, som benyttes for GPS.

For å gjøre en analyse av Galileo sin ytelse ble det brukt et datasett samlet inn fra en Kongsberg Seatex-antenne montert på MS Polarlys. Datasettet inneholder 1 Hz målinger fra oktober 2017 frem til oktober 2018. Skipet går i rute fra Bergen, langs kysten og inn i fjordarmer, helt opp til Kirkenes hvor det deretter returnerer. For analyse av NeQuick-G-ionosfæremodellen leverte Kartverket beregnede TEC-verdier basert på observasjoner fra deres stasjon i Honningsvåg.

For at resultatene skulle være sammenlignbare mellom GPS og Galileo kunne vi ikke bruke en ren Galileo-løsning. Dette var fordi antallet aktive Galileo-satellitter var for lavt i perioden datasettet dekker. Det ble derfor brukt en kombinert løsning med GPS- og Galileo-observasjoner. For å lage differanser ble en PPP-løsning med alle tilgjengelige satellitter brukt som fasit for skipets posisjon. Resultatene viser at den kombinerte løsningen gir en mer pålitelig posisjonsbestemmelse med lavere differanser og RMS-verdier. PDOP-verdiene for den kombinerte løsningen er også bedre. For posisjonsbestemmelse i Norge er det hensiktsmessig å se på måleforhold som trange fjorder og nordområdene. Den kombinerte løsningen gir også lavere differanser og RMS-verdier her.

Fra datasettet som inneholder beregnede TEC-verdier for NeQuick, Klobuchar og for fasiten basert på tofrekvente observasjoner, viser resultatene at NeQuick-G-ionosfæremodellen gir mer pålitelige verdier enn Klobuchar. NeQuick-G har absolutte TEC-verdier som stemmer bedre overens med fasiten enn Klobuchar, og dermed er også kvalitetstallene bedre.

(Tom side)

Abstract

Today's society relies heavily on global navigation satellite systems (GNSS). In 1999, the European Space Agency (ESA) started to work on a civilian satellite navigation system that will be independent from the military systems of the United States and Russia. After almost 20 years, this has become Galileo with 22 active satellites in orbit. Since 2010, Norway, with the Norwegian Space Agency at the forefront, has been part of the Galileo project. On behalf of the Norwegian Space Agency, this thesis will evaluate the available performance of Galileo along the Norwegian coast, and give an indication of the performance of the ionospheric model, NeQuick-G. Galileo will be evaluated against the industry standard, GPS. The NeQuick-G model will be compared to Klobuchar, which is used for GPS.

To analyse the performance of Galileo, a Kongsberg Seatex antenna were mounted on MS Polarlys. This antenna collected a data set that contains 1 Hz measurements from October 2017 until October 2018. The ship goes on route from Bergen, along the coast and into fjord arms, right up to Kirkenes where it then returns. For analysis of the NeQuick-G ionospheric model, the Norwegian Mapping Authority provided calculated TEC values based on observations from their station in Honningsvåg.

For the results to be comparable between GPS and Galileo, we could not use a solution solely based on Galileo observations. This was because the number of active Galileo satellites were too low during the data set period. Therefore, a combined solution with GPS and Galileo observations was used. To create differences, a PPP solution, with all available satellites, was used as a definitive solution of the ship's position. The results show that the combined solution has a more reliable position determination with lower differences and RMS values. The PDOP values for the combined solution are also better. For position determination in Norway, it is appropriate to look at measuring conditions such as narrow fjords and the northern areas. The combined solution also gives lower differences and RMS values here.

From the data set containing calculated TEC values for NeQuick, Klobuchar and for the reference values based on two-frequency observations, the results show that the NeQuick-G ionospheric model provides more reliable values than Klobuchar. NeQuick-G has absolute TEC values that matched the calculated solution than Klobuchar, and thus the quality figures are better.

(Tom side)

Forord

Vi vil med denne oppgaven avslutte henholdsvis fire og tre års studier i geomatikk ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Gjennom disse årene har vi hatt mange spennende fag som har bygget opp til masteroppgaven, og de siste poengene for å fullføre graden i geomatikk. Studiet har vært svært innholdsrikt og spennende, med mange gode forelesere. Vi har valgt en 30 poengsoppgave som passer for to personer ettersom det var store mengder data som måtte behandles.

Vi vil gjerne takke vår hovedveileder, professor Jon Glenn Omholt Gjevstad, for god veiledning i løpet av arbeidet med denne masteroppgaven. Jon Glenn har alltid hatt et åpent kontor når vi har kommet med spørsmål, noe som har gitt en god flyt i arbeidet med oppgaven. Vi vil også takke Norsk Romsenter og Christian Rost for oppgaven og hjelp i løpet av dette halvåret. Stor takk til Narve Kjørsvik fra TerraTec for lisens og hjelp med bruk av programvaren TerraPos. Takk til Kjersti Moldeklev for svar angående Norges og Norsk Romsenter sin rolle i Galileo-programmet. En siste takk til Yngvild Andalsvik fra Kartverket for hjelp med tilgang til data i forbindelse med NeQuick-modellen.

Stor takk til familie og venner som har støttet oss gjennom arbeidet med denne oppgaven, og studiet generelt. Takk til medstudentene på masterrommet, som har gitt faglig og sosialt påfyll i løpet av dette siste semesteret ved NMBU.

Norges miljø- og biovitenskapelige universitet, 15.mai 2019.

Sindre Løchting og Lars Wisth Kolltveit

(Tom side)

Innhold

Kapittel 1 – Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven.....	1
1.2 Nøkkelhendelser i Galileo-programmet.....	1
1.3 Norges rolle i Galileo-prosjektet.....	2
1.4 Problemstilling.....	4
1.5 Om datasettet	4
1.6 Mobiltelefoner.....	5
1.7 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G.....	6
1.8 Begrensinger i oppgaven.....	6
Kapittel 2 – Teori	7
2.1 GNSS-systemer.....	7
2.1.1 Segmentene	7
2.1.2 GPS	8
2.1.3 GLONASS	8
2.1.4 BeiDou	8
2.2 Galileo.....	9
2.2.1 Romsegmentet.....	9
2.2.2 Kontrollsegmentet.....	10
2.2.3 Brukersegmentet	10
2.3 Kodemåling.....	13
2.4 Fasemåling	14
2.5 PPP (Precise Point Positioning)	14
2.6 Feilkilder GNSS.....	15
2.7 Satellittrelaterte feilkilder	15
2.7.1 Banefeil	15
2.7.2 Satellittklokkefeil	15
2.8 Feil relatert til signalets forplantning gjennom atmosfæren	16
2.8.1 Ionosfæreforsinkelse	16
2.8.2 Ionosfæremodeller	17
2.8.3 NeQuick	17
2.8.4 Klobuchar.....	17
2.8.5 Ionosfærefri lineærkombinasjon	18

2.8.6 Troposfære	18
2.9 Mottakerrelaterte feilkilder	18
2.9.1 Fasesentervariasjon hos antenne	18
2.9.2 Multipath.....	19
2.10 RINEX-formatet	19
2.10.1 Hatanaka-kompresjon	19
Kapittel 3 – Metode	21
3.1 Innledning og teoridel	21
3.2 Databehandling	21
3.3 Prosessering	23
3.4 Ytelsesmål.....	24
3.4.1 RMS	24
3.4.2 DOP – Dilution of precision	24
3.5 Oppskytingsplan Galileo.....	26
3.6 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G.....	26
Kapittel 4 – Resultater	27
4.1 Statisk måling og sanne feil	27
4.2 Tilgjengelige satellitter og antall observasjoner	30
4.3 Kvalitetstall for hele datasettet.....	33
4.4 Sammenlikning GPS og GPS + Galileo.....	34
4.5 Bidrag fra Galileo i trange fjordarmer	36
4.6 Bidrag fra Galileo ved rutens nordligste del	42
4.7 Sammenlikning GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a.....	48
4.8 Sammenlikning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G.....	51
Kapittel 5 – Diskusjon	57
5.1 Statisk måling.....	57
5.2 Tilgjengelige satellitter og antall observasjoner	57
5.3 Kvalitetstall for hele datasettet.....	58
5.4 Sammenlikning GPS og GPS + Galileo.....	59
5.5 Bidrag fra Galileo i trange fjordarmer	60
5.6 Bidrag fra Galileo ved rutens nordligste del	60
5.7 Sammenlikning GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a.....	61
5.8 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G.....	62
5.9 Valg av metode	63
Kapittel 6 – Konklusjon.....	65
Kapittel 7 – Veien videre	66
Kilder	67

Appendiks	69
A.1: Oversikt over programvare som er benyttet i oppgaven	69
A.2: Moduler brukt i Python	69
Vedlegg	70
Vedlegg 1: Ruteplan MS Polarlys.....	70
Vedlegg 2: Oversikt over Galileo-satellitter, og deres status.....	71

Figurer

Figur 1: Bilde av antenneplassering. Utklipp fra (Solberg, 2016)	5
Figur 2: Tracking av Galileo-satellitter for iPhone 6S ved bruk applikasjonen GNSS View.....	5
Figur 3: Signalbånd for de ulike GNSS-systemene. (Subirana et al., 2013).....	8
Figur 4: Galileo IOV. (Subirana et al., 2013)	9
Figur 5: Blokk-diagram for Galileo-satellitter. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)	9
Figur 6: Oversikt frekvensbånd og signalkomponenter. (Subirana et al., 2013)	11
Figur 7: Oversikt over navigasjonsmeldinger Galileo (Subirana et al., 2013).....	12
Figur 8: F/NAV (Navipedia, 2011).....	12
Figur 9: I/NAV (Navipedia, 2011).....	13
Figur 10: Oppsettfil PPP-løsning DOY277	22
Figur 11: Mappedoppsett som viser struktureringen av filer tilhørende batch-prosesseringen.	22
Figur 12: Oppsett av resultatfilene fra TerraPos	23
Figur 13: STEC-verdier Klobuchar for 04.11.2019.....	26
Figur 14: Oversiktsbilde av Fosen Yard, Utklipp fra Norge i bilder (norgebilder.no).	28
Figur 15: Differanser mellom løsning fra statisk PPP og kinematisk målinger med PPP, GPS og GPS + Galileo for DOY 285.	29
Figur 16: Antall satellitter for PPP-løsningen, Galileo-satellitter og GPS-satellitter i 2017	30
Figur 17: Antall beregnet posisjoner for de forskjellige løsningene i 2017.....	31
Figur 18: Antall satellitter DOY 195-295 2018	32
Figur 19: Prosent beregnede posisjoner DOY 195-295 2018	32
Figur 20: RMS σ , N, H for hele datasettet. GPS + Galileo og GPS.....	33
Figur 21: Hurtigrutens anløp i Trondheim havn. Fra norgebilder.no	33
Figur 22: DOY 295-301 i 2017.....	34
Figur 23: DOY 340-346 i 2017.....	34
Figur 24: DOY 52-58 i 2018.....	34
Figur 25: DOY 162-168 i 2018.....	34
Figur 26: DOY 228-234 i 2018.....	35
Figur 27: DOY 272-277 i 2018.....	35
Figur 28: Ruten til skipet inn i Geirangerfjorden DOY229	36
Figur 29: Geirangerfjorden. Hentet fra (Hurtigruten, 2019).....	36
Figur 30: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 163 2018	37
Figur 31: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 229 2018	38
Figur 32: PDOP og NOS DOY 163 GPS + Galileo.....	39
Figur 33: PDOP og NOS DOY 163 GPS.....	39
Figur 34: PDOP og NOS DOY 229 GPS + Galileo.....	39
Figur 35: PDOP og NOS DOY 229 GPS.....	39
Figur 36: RMS-verdier DOY 163	40
Figur 37: RMS-verdier DOY 229	40
Figur 38: RMS-verdier DOY 174	41
Figur 39: RMS-verdier DOY 240.....	41
Figur 40: Ruten til skipet for DOY 234	42
Figur 41: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 168 2018	43
Figur 42: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 229 2018	44
Figur 43: PDOP og NOS DOY 168 GPS + Galileo.....	45

Figur 44: PDOP og NOS DOY 168 GPS.....	45
Figur 45: PDOP og NOS DOY 234 GPS + Galileo.....	45
Figur 46: PDOP og NOS DOY 234 GPS.....	45
Figur 47: RMS-verdier DOY 168.....	46
Figur 48: RMS-verdier DOY 234.....	46
Figur 49: RMS-verdier for kombinerte løsninger med GPS L1/L5 + GLONASS G1/G2 og GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a.....	47
Figur 50: RMS-verdier for GLONASS G1/G2 og GPS L1/L5.....	47
Figur 51: Differanser mellom GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a for DOY 288 i 2018.	49
Figur 52: PDOP og NOS DOY 288 Galileo E1/E5a.....	50
Figur 53: PDOP og NOS DOY 288 GPS L1/L5.....	50
Figur 54: RMS-verdier for DOY 288 i 2018.	50
Figur 55: Beregnede STEC-verdier fra tofrekvente observasjoner.....	51
Figur 56: Beregnede STEC-verdier for NeQuick-G.....	52
Figur 57: Beregnede STEC-verdier for Klobuchar.....	52
Figur 58: Differanser mellom NeQuick-G og Klobuchar og beregnede STEC-verdier for 04.11.18... 53	
Figur 59: Differanser mellom NeQuick-G og Klobuchar og beregnede VTEC-verdier for 04.11.18.. 53	
Figur 60: ROTI-verdier for 04.11.18 klokken 11:00	54
Figur 61: ROTI-verdier for 04.11.18 kl 19:00.....	54
Figur 62: RMS-verdier beregnet fra differansene mellom NeQuick-G, Klobuchar og observerte verdier.	55

Tabeller

Tabell 1: Feilkilder GNSS og ca. RMS avstandsfeil (Seeber, 2008).....	15
Tabell 2: Oversikt over etterprosesseringen.....	23
Tabell 3: Statisk måling 24 t.....	27
Tabell 4: RMS, maks- og minimums-differanse for STEC og VTEC-verdier	55
Tabell 5: Appendiks A.1: Programvare benyttet i oppgaven	69
Tabell 6: Vedlegg 1: Ruteplan for MS Polarlys 2017 og 2018.....	70
Tabell 7: Vedlegg 2: Oversikt over Galileo-satellitter	71

Kapittel 1 – Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Dagens samfunn er svært avhengige av satellittbaserte systemer for navigasjon (GNSS), alt fra personlig navigasjon til landmåling og militært bruk. På folkemunne brukes oftest ordet GPS når man egentlig snakker om GNSS-systemer. GPS, som er et amerikansk militært system, er det første operasjonelle GNSS-systemet som har vært tilgjengelig for sivil bruk siden oppstarten på 70-tallet. GPS var ikke mer nøyaktig enn omtrent 100 meter før i år 2000. Før dette var det lagt på en tids- og baneforstyrrelse for sivil bruk, slik at posisjonen til brukeren ikke var særlig nøyaktig.

I 1999 ble de største bidragsyterne til den europeiske romfartsorganisasjonen, ESA, enige om at et sivilt satellittnavigasjonssystem som er uavhengig av de militære systemene til USA og Russland er nødvendig. Ved å opprette et eget sivilt system ville man sikre brukerne av GNSS mot at de militære systemene ville kunne skrus av ved en mulig politisk konflikt. Under følger en kronologisk rekkefølge over nøkkelhendelser i Galileo-programmet:

1.2 Nøkkelhendelser i Galileo-programmet

- **1999:** De største bidragsyterne til ESA, Frankrike, Italia og Tyskland blir enige om et konsept for Galileo som et sivilt satellittnavigasjonssystem som er uavhengig av GPS. Dette skulle sikre brukerne mot at USA skulle skru av sitt system ved en mulig politisk konflikt. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)
- **2002:** Etter problemer rundt bestemmelsen av finansieringen av prosjektet ble det bestemt at to tredeler av Galileo-programmet skulle finansieres av private selskaper og investorer, mens resten av kostnadene skulle deles mellom EU og ESA. EU fikk samtidig ansvaret for det politiske aspektet ved prosjektet, mens det ble bestemt at ESA skulle ta seg av det teknologiske. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)
- **2003:** Kina blir med i prosjektet, og ventes å investere 230 millioner euro i Galileo-programmet. (BBC News, 2003)
- **2004:** Fordi Galileo opprinnelig skulle sende ut signaler på de samme frekvensbåndene som GPS, uttrykte USA bekymring for at de ikke hadde mulighet til å jamme Galileo-signalene uten samtidig å sette sitt eget system ut av spill. Faren var at fiendtlige makter skulle utnytte det mer presise Galileo-systemet ved for eksempel et missilangrep på USA. Det ble etter hvert enighet, og EU bestemte seg for å bruke andre frekvenser. Dette gjorde at det også ble inngått et samarbeid om å benytte Binary-offset-carrier (1.1) -modulasjon på Galileo-signalene for å sikre sameksistens og kombinert bruk av systemene. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)
- **2005:** GIOVE (Galileo-In-Orbit-Validation-Element) -A blir vellykket skutt opp. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)
- **2006:** Det offentlige-private samarbeidet blir avsluttet, og EU bestemmer seg for å nasjonalisere Galileo-programmet. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) Senere dette året bestemmer Kina seg for å trekke seg ut av prosjektet for å heller videreutvikle sitt regionale BeiDou-system. Dette gjøres på grunn av sikkerhetshensyn og finansieringsproblemer rundt Galileo. (Levin, 2011)
- **2007:** EUs medlemsland bestemmer seg for den videre finansieringen av prosjektet, og planlegger etableringen av bakkekontrollsentre (GSS) i Tyskland og Italia. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

- **2008:** Den neste testsatellitten, GIOVE-B skytes opp. Forskjellen fra satellitten som ble skutt opp i 2005, er at GIOVE-B har passive hydrogen masere, i tillegg til de to rubidiumklokkene som finnes i GIOVE-A. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)
- **2010:** EU-ministrene velger Praha som sted for hovedkvarteret for Galileo-programmet. (Keating, 2010)
- **2011:** De første to IOV (In-Orbit-Validation) -satellittene skytes opp fra ESAs romsenter i Guyana. To nye fulgte året etter. (Vedlegg 2)
- **2014:** De to første FOC (Full-Operational-Capability)-satellittene blir skutt opp, men havner i elliptiske baner, og kunne dermed ikke bli brukt til navigasjonsformål. (Arianespace, 2014)
- **2015:** GSAT-203 og 204 skytes opp som de første vellykkede FOC-satellittene. (Vedlegg 1)
- **2018:** GSAT-219, 20, 21 og 22 skytes opp, og øker antall FOC-satellitter i Galileo-konstellasjonen til 22. Disse ble aktive i februar året etter. (Vedlegg 1)

Innen 2020 er det forventet at Galileo skal ha full konstellasjon og at man skal ha muligheten til å beregne posisjonen sin uansett hvor man er i verden. Norsk Romsenter er i gang med å evaluere ytelsen til Galileo i norske områder. Som en del av dette ble vi presentert med oppgaven å analysere bidraget til Galileo langs norskekysten. Norsk Romsenter eier et datasett som inneholder rådata fra en GNSS-mottaker montert på Hurtigruteskipet MS Polarlys. Galileo er det eneste GNSS-systemet som Norge, gjennom Norsk Romsenter, har muligheten til å påvirke.

1.3 Norges rolle i Galileo-prosjektet

For å få oppdatert og utfyllende informasjon om Norges og Norsk Romsenter sin rolle i Galileo-prosjektet har vi intervjuet seniorrådgiver innen satellittnavigasjon, Kjersti Moldeklev, hos Norsk Romsenter. For å få klarhet i Norges rolle har vi valgt å spørre om følgende temaer:

- Norges Involvering
- Norsk Romsenters rolle
- Hensikt og eventuell gevinst for Norge
- Norske selskapers involvering i prosjektet
- Bakkestasjoner på norsk jord
- Brexit

Når ble Norge involvert i Galileo-prosjektet, og på hvilken måte er vi involvert?

- *Kjersti:* Norge har vært involvert i Galileo-prosjektet siden 2010, og er nesten fullverdig medlem. Norges medlemskap har ikke stemmerett og plass i sikkerhetskomiteen. Dette er fordi vi ikke er EU-medlem. Vi er med i Galileo-prosjektet gjennom EØS-avtalen. Selv om Norge ikke har stemmerett har dette ikke vært noe problem, ettersom det er svært få avgjørelser hvor stemming har vært nødvendig. Norge knytter seg til prosjektet i 7-års perioder. Nåværende avtale strekker seg fra 2014-2020, og det jobbes med å få med Norge i neste periode fra 2021 til 2027. Budsjettet for Galileo-prosjektet fordeles på medlemslandene. Norge forplikter seg til å bidra med en viss andel av BNP som tilsvarer rundt 200 millioner NOK i året, avhengig av eurokursen. (Moldeklev, 2019)

Hva er Norsk Romsenters rolle?

- *Kjersti:* NRS er såkalt prosjektkontor for Norges deltakelse i Galileo. NRS fungerer som et bindeledd mellom både norske selskaper, den Norske stat og EU/ESA. Romsenteret har ansvaret for å ivareta de norske interessene, deriblant ytelsen over de nordlige områdene. Romsenteret argumenter også overfor departementet hvorfor Norge skal bidra videre i Galileo-prosjektet. Dette vil bli enklere når Galileo er et operativt system og man kan si mer om ytelsen. (Moldeklev, 2019)

Hva er hensikten med at Norge er involvert, og hva er eventuell gevinst for Norge?

- *Kjersti:* Hovedgrunnen til Norges involvering i Galileo-prosjektet er å sikre norsk industri muligheten til å være med å konkurrere om kontrakter tilknyttet utbyggingen av systemet. Ved at Norge er involvert i prosjektet får vi også tilgang til systemkompetanse og dyptgående informasjon om Galileo. Dette gjør at norsk industri forhåpentligvis enklere kan ta systemet i bruk. Alle kan ta den åpne tjenesten til Galileo i bruk uten å være medlem, men Norge mener det ikke er akseptabelt å være gratispassasjer for vår del. Ved å være medlem sikrer Norge også påvirkningskraft når det gjelder å sikre systemets ytelse over våre områder. Potensiell tilgang til den krypterte tjenesten PRS (omtrent tilsvarende M-kode på GPS) er også et godt argument for å være medlem. (Moldeklev, 2019)

Hvilke norske selskaper er involvert i Galileo, og hva produserer de?

- *Kjersti:* Firmaet Kongsberg Norspace har de største kontraktene av norske selskaper tilknyttet Galileo. De produserer SAR-transpondere og frekvensgeneratoren up-converter-unit (få signalet som produseres ut på riktig frekvens). Kongsberg Seatex har også kontrakter tilknyttet etablering av bakkestasjoner (GSS). Andre aktører som har kontrakter er Kongsberg Satellite Services (KSAT), Fugro og Widerøe. Kartverket er også inne tilknyttet uavhengige ytelsesmålinger. KSAT driver bakkestasjonene på Svalbard og Antarktis. (Moldeklev, 2019)

Finnes det bakkestasjoner i Norge som bidrar til Galileo-programmet, og hva er deres oppgaver?

- *Kjersti:* Norge har bakkeinfrastruktur for Galileo på eget territorium. Nærmere bestemt på Jan Mayen, Svalbard og Troll (Antarktis). Vi har også bakkestasjoner for hjelpesystemet EGNOS Safety-of-Life på Svalbard, Kirkenes, Jan Mayen, Tromsø, og Trondheim. Dette gjør at det er dekning for dette systemet opp til 72 grader nord, og kan dermed tilby blant annet ionosfærekorrigerer og integritetsinformasjon over våre områder. (Moldeklev, 2019)

Hvilke konsekvenser får Brexit for Galileo?

- *Kjersti:* Storbritannia har stått for 12 % av det totale Galileo-budsjettet, så i første omgang må EU finne en måte å få dekket dette på. Som ikke-medlem av EU må Storbritannia revurderes som eventuelt nytt medlem. Dette kan bli som et medlem med lik avtale som Norge, altså uten stemmerett. Tilgang til kryptert PRS-tjeneste blir også vanskeligere for de. Bakkestasjoner på britisk territorium har også blitt flyttet, og britisk industri sin videre rolle i prosjektet er uvis. Spørsmålet om britene nå i det hele tatt vil være involvert er usikkert, i og med at de har vært skeptiske før, blant annet til kostnadene. Brexit har nok gjort EU enda mer bevisst på hvem som er medlem og ikke-medlem i prosjektet. Alt i alt så er Brexit en veldig uklar situasjon, og hvilke konsekvenser det vil få for Galileo er enda uvisst. (Moldeklev, 2019)

1.4 Problemstilling

Norsk Romsenter ønsker at vi med denne oppgaven skal svare på følgende spørsmål:

1. Vil inkludering av Galileo i mottaker benyttet på nordlige breddegrader bidra til en mer pålitelig posisjonsbestemmelse?
2. Kan påvirkningen av ionosfæriske forstyrrelser reduseres ved bruk av Galileos ionosfæremodell?

For å svare på spørsmålene har vi fått oppdraget fra Norsk Romsenter å sammenligne forskjellige signalkombinasjoner basert på kodemåling, med GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a. For å lage en fasit vil det bli brukt en multi-frekvens multi-GNSS PPP-løsning, som er basert på GPS, GLONASS, Galileo og BeiDou. Dette er kombinasjoner som er aktuelle både for profesjonelle og private brukere.

1.5 Om datasettet

Datasettet som ble levert av Norsk Romsenter var GNSS-rådata fra en multi-GNSS-mottaker. Mottakeren har i utgangspunktet målt kontinuerlig med en datarate på 1 Hz med visse unntak grunnet strømbrudd eller problemer med innsamling av data.

Det har blitt samlet inn observasjoner (kode, fase, doppler) på frekvensbåndene:

- GPS: L1/L2/L2C/L5
- GLONASS: G1/G2
- Galileo: E1/E5
- BeiDou

Datasettet vi har brukt i denne oppgaven består av 352 dager mellom 4. oktober 2017 og 22. oktober 2018. Vi mangler to dager fra oktober og november 2017, samt 30 dager fra april og mai 2018.

Datasettet har en samlet størrelse på omtrent 180 gigabyte. MS Polarlys har vært i kontinuerlig drift gjennom hele datasettet, utenom to uker i oktober 2018. I disse ukene var skipet lagt i tørrdokk ved Fosen Yard for vedlikehold. GNSS-mottakeren var operativ under vedlikeholdet.

MS Polarlys sin rute starter i Bergen og ender i Kirkenes. På vei nordover bruker skipet omtrent seks dager, mens den bruker fem dager sørover. Nordover legger skipet til kai 35 ganger, mens det gjør det samme 34 ganger sørover. Ruten går nær kysten hele veien og inn i blant annet Geirangerfjorden.

Antennen som er montert på MS Polarlys er levert av Kongsberg Seatex. Antennen er montert mot toppen av skipet, se figur 1. Ved å plassere antennen høyt på skipet unngår man noen av forstyrrelsene til signalet.



Figur 1: Bilde av antenneplassering. Utklipp fra (Solberg, 2016)

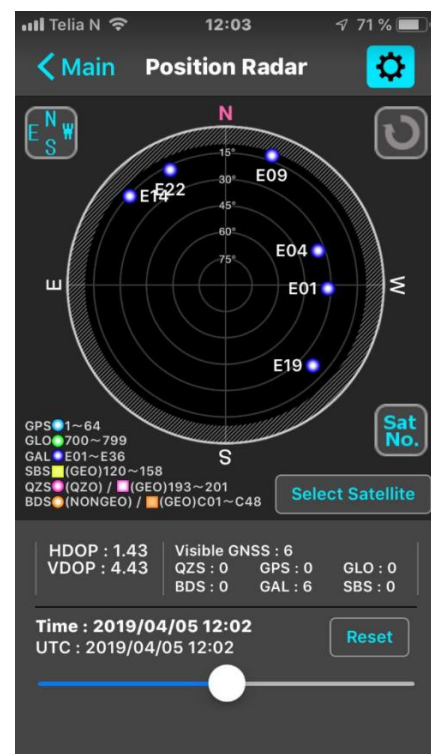
1.6 Mobiltelefoner

Bedre tilgjengelig GNSS-ytelse som følge av et operativt Galileo vil også i teorien gi økt posisjonsnøyaktighet for mobiltelefoner. Siden løsningene som denne oppgaven baserer seg på er kodemålinger (se kapittel 2.3), vil det si at resultatene fra denne oppgaven er svært aktuelle for å si noe om hvordan Galileo også påvirker GNSS-ytelsen til mobilbrukere.

I følge den GSA (European Global Navigation Satellite Systems Agency) drevne nettsiden www.usegalileo.eu, er det per 07.05.2019 132 typer mobiltelefoner og nettbrett som innehar chip som kan motta Galileo signaler. Over 95% av produsentene av GNSS chipset har inkludert støtte for Galileo i sine nye produkter. (GSA, 2018) Det vil si at de fleste brukere av nye mobiltelefoner vil dra nytte av Galileo-systemet.

Figur 2 viser et skjermbilde fra iPhone 6S hvor applikasjonen «GNSS View» er brukt til å vise et polarplott (elevation-cutoff på 10 grader) over tilgjengelige Galileo-satellitter per 05.04.2019, UTC-tid 12:02. Plottet viser 6 tilgjengelige satellitter.

En annen ting som ser ut til å bli aktuelt i nær fremtid hos flere mobiltelefoner er støtte for måling på to frekvenser. I 2018 ble den kinesiskproduserte mobiltelefonen Xiaomi Mi 8, den første med en GNSS chip med tofrekvent støtte. (Price, 2019) Selv om Xiaomi og Huawei per 05.04.2019 er de eneste mobiltelefonene med denne funksjonaliteten, er det sannsynlig å tro at dette er noe konkurrentene også vil implementere i sine telefoner. Med tofrekvent støtte vil det være sannsynlig å se for seg at posisjonsnøyaktigheten hos mobiltelefoner forventes å bedres, da det kan dannes ionosfærefrie lineærkombinasjoner (se Teori avsnitt 2.8.5) og estimeres multipath effekt. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) Dette vil gi GNSS-funksjonaliteten i mobiltelefoner større bruksområder. Den største gjenværende begrensningen vil da være antennen i mobilen. (Riley et al., 2018)



Figur 2: Tracking av Galileo-satellitter for iPhone 6S ved bruk applikasjonen GNSS View.

1.7 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G

Det andre spørsmålet definert i problemstillingen var som nevnt: «Kan påvirkning av ionosfæriske forstyrrelser reduseres ved bruk av Galileos ionosfæremodell?». Mer presist betydde dette at vi skulle sammenligne den tradisjonelle ionosfæremodellen Klobuchar, som GPS kringkaster koeffisienter til, med den Galileo-tilpassede modellen NeQuick. Vi har sett på sanntidsimplementasjonen av NeQuick, NeQuick-G.

I første omgang ble denne delen av oppgaven nedprioritert på grunn av manglende støtte for NeQuick-modellen i TerraPos, og i andre tilgjengelige programvarer. Et alternativ kunne ha vært å programmere det selv, men dette ble altfor tidkrevende i tillegg til det andre oppgaven skulle omfatte. Vi endte opp med å få hjelp fra Yngvild Andalsvik fra Kartverket. Hun skaffet oss data fra Kartverkets målestasjon i Honningsvåg for to døgn i november 2018. Nærmere bestemt den 02. og 04. Vi valgte å bruke data fra den 04.11 i oppgaven fordi dette var den dagen da det var mer ionosfæreaktivitet. Honningsvåg ble valgt som stasjon fordi vi ønsker å se på ytelsen til ionosfæremodellene i de nordligste områdene av fastlands-Norge. Fordi vi kun brukte et døgn som grunnlag for å svare på problemstillingen, så blir det ikke nok data til å kunne komme til noen konklusjon. Resultatene som vi oppnådde blir da heller å betrakte som en pekepinn.

Observasjonene gjort fra stasjonen i Honningsvåg ble brukt til å beregne TEC (Total Electron Content) -verdier med både Klobuchar, NeQuick-G og med to frekvenser. Hensikten med de tofrekvente beregningene var å etablere en fasit for å kunne ha noe å sammenligne ionosfæremodellene mot. Fordelen ved å sammenligne TEC istedenfor posisjon, er at da ser vi kun på ionosfæredelen av signalforstyrrelsene.

Dataene for hvert døgn inneholdt både beregnet STEC og VTEC. Begge disse størrelsene var igjen delt inn i flere tekstfiler med forskjellig innhold. Både STEC- og VTEC-mappen hadde følgende tekstfiler:

- TEC-verdier beregnet med Klobuchar.
- TEC-verdier beregnet med NeQuick-G.
- TEC-verdier beregnet med tofrekvente observasjoner.
- Differanser Klobuchar – tofrekvente data.
- Differanser NeQuick-G – tofrekvente data
- Differanser Klobuchar – NeQuick-G.

1.8 Begrensinger i oppgaven

For denne oppgaven har vi måtte sette oss noen begrensninger for hva den skal inneholde grunnet omfanget og utfordringer:

- Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar- og NeQuick-G har vi ikke gjennomført med eget datasett grunnet mangel av egnet programvare.
- En fullverdig sammenligning av en kodeløsning med kun Galileo-satellitter har ikke vært mulig ettersom systemet ikke har full konstellasjon.

Kapittel 2 – Teori

Dette kapittelet inneholder teori innenfor de følgende temaene:

- GNSS-systemer
- Kort om GNSS-systemer
- Utfyllende om Galileo
- Navigasjonsmeldinger
- Teori rundt kode- og fasemålinger
- Precise Point Positioning
- Feilkilder knyttet opp mot GNSS.
- Ionosfæremodeller
- RINEX-formatet
- Hatanaka-kompresjon

2.1 GNSS-systemer

De mest aktuelle satellitt-navigasjonssystemene som finnes i dag er GPS, GLONASS, BeiDou og Galileo. Mottakeren som ble benyttet i denne oppgaven innhentet observasjoner fra alle disse systemene. I denne delen av teorien vil det gis en kort omtale av de tre førstnevnte, mens hovedvekten vil legges på Galileo, da oppgaven i hovedsak omhandler Galileo sin ytelse.

2.1.1 Segmentene

Alle de nevnte systemene består av 3 hoveddeler: romsegment, kontrollsegment og brukerssegment. Romsegmentet består av satellitter i bane rundt 20 000 km fra jordoverflaten. Disse har som oppgave å sende ut kode- og fase-signaler, og å distribuere navigasjonsmeldingene som blir beregnet av kontrollsegmentet på bakken. Romsegmentet er bygd opp slik at brukerne skal kunne ha sikt til minst 4 satellitter samtidig uansett hvor man måtte befinne seg på jorden. Navigasjonsmeldingen inneholder i hovedsak satellittkoordinater og diverse informasjon om korreksjoner av feilkilder, samt informasjon om satellittenes helsetilstand. GPS, BeiDou og Galileo viser satellittkoordinatene i navigasjonsmeldingen som Kepler-elementer, mens GLONASS bruker ECEF-koordinater i posisjon og hastighet, samt akselerasjon forårsaket av gravitasjon fra sol og måne. (Subirana et al., 2013)

Kontrollsegmentet har ansvaret for driften av systemet. Det har også ansvaret for beregningen av parametere som blir sendt opp til satellittene. Dataene blir sendt opp via antenner rundt om på jorden. Disse måler også kontinuerlig til satellittene for å innhente data til å beregne disse parametere. Brukerssegmentet består av mottakere rundt om på jorda. Dette kan være alt fra profesjonell landmålingsbruk, til daglig navigasjon med mobiltelefonen. (Subirana et al., 2013)

2.1.2 GPS

Amerikanske GPS består i dag av 30 satellitter som går i 6 baneplan, som igjen er delt inn i 4 «slots». Satellittene beveger seg i en høyde på 20 200 km over jordoverflaten og med en inklinasjonsvinkel på 55 grader i forhold til ekvator. Omløpstiden er 11 timer, 58 minutter og 2 sekunder. De beveger seg i en nær-sirkulær bane, og sender ut signaler på frekvensbåndene L1 (1575.42 MHz), L2 (1227.60 MHz) og L5 (1176.450 MHz) (se figur 3). Systemet er kodedelt. Det vil si at satellittene sender ut signaler på samme frekvensbånd, men som skiller på PRN-koden. (Subirana et al., 2013)

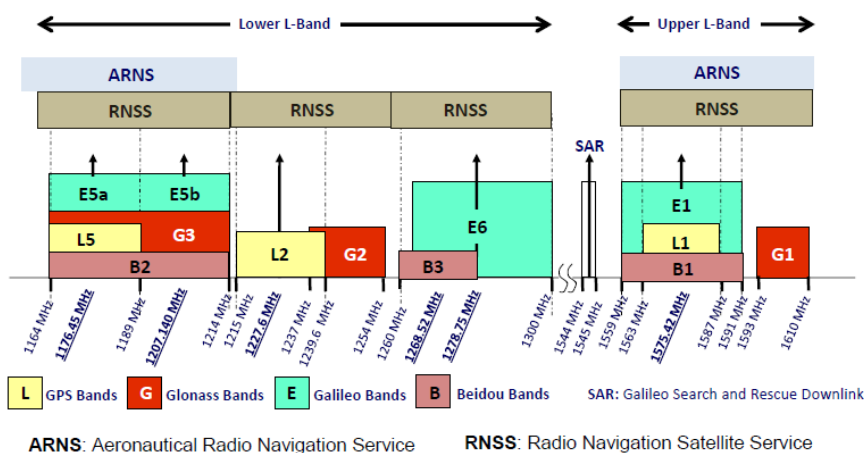
2.1.3 GLONASS

Russiske GLONASS består av 24 satellitter som beveger seg i baneplan på 64,8 grader i forhold til ekvator. Dette gjør at GLONASS dekker nordområdene spesielt bra. Omløpstiden til satellittene er 11 timer, 15 minutter og 44 sekunder, og de beveger seg i nær-sirkulære baner. Systemet bruker FDMA (Frequency Division Multiple Access) for å lage unike bærefrekvenser ut fra frekvenskanalene G1 (1602 MHz), G2 (1246 MHz) og G3 (1204.704 MHz). Satellittene sender altså ut like koder, men på litt forskjellige frekvenser. (Subirana et al., 2013)

2.1.4 BeiDou

Det kinesiske systemet BeiDou vil innen 2020 bestå av totalt av 35 satellitter, hvor 6 av de vil gå i geostasjonære bane, 6 i IGSO-baner og de resterende i polare baner. Alle går i nær-sirkulære baner med en inklinasjonsvinkel på 55 grader og en omløpstid på 12 timer og 53 minutter. Når full satellittkonstellasjon er oppnådd vil BeiDou tilby global dekning. Signalkomponentene blir kringkastet på frekvensbåndene B1 (1575.42 MHz), B2 (1176.45 MHz) og B3 (1268.52 MHz). (Subirana et al., 2013)

For utdypende informasjon om de ulike satellittnavigasjons-systemene henvises det til (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)



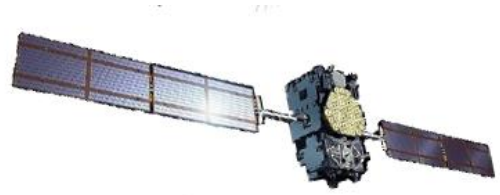
Figur 3: Signalfønder for de ulike GNSS-systemene. (Subirana et al., 2013)

2.2 Galileo

Galileo er Europas eget satellittnavigasjonssystem, og er i motsetning til de andre globale systemene et sivilt system. Dette vil tilby et system som er uavhengig av beslutninger gjort av stormaktene om degradering eller midlertidig stenging av tilgang til deres systemer. Galileo er utviklet av EU gjennom ESA, og det forventes å nå FOC (Full-Operational-Capability) innen 2020. Konstellasjonen vil da bestå av 30 satellitter, 24 operasjonelle og 6 i reserve. (ESA, 2013)

2.2.1 Romsegmentet

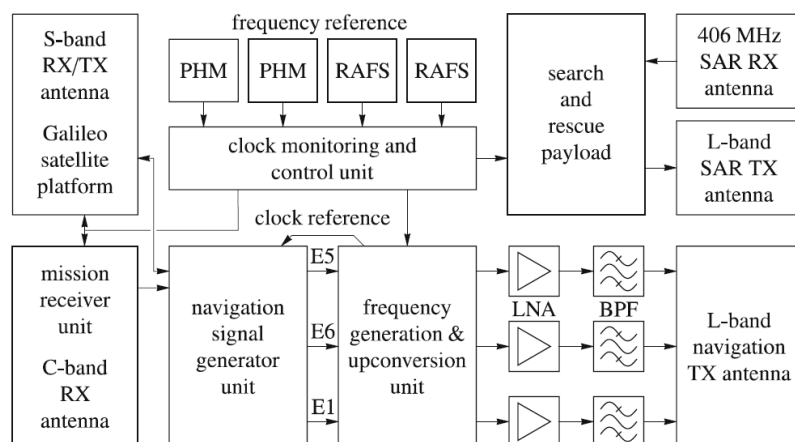
Når Galileo oppnår FOC vil systemet som nevnt bestå av totalt 30 satellitter. Disse vil befinne seg MEO (Medium-Earth-Orbit). Per i dag består systemet av 22 satellitter som er operasjonelle, og 4 er som er under IOT (In-Orbit-Testing). (ESA, 2019)



Figur 4: Galileo IOV. (Subirana et al., 2013)

De går i baner 23 222 km over jorda i 3 baneplan med inklinasjonsvinkel på 56 grader. Dvs. at hvert baneplan vil ha 2 satellitter i reserve. Omløpstiden er 14 timer, 4 minutter og 45 sekunder. Når systemet har oppnådd FOC skal det gi sikt til minst 6 satellitter uansett når og hvor brukeren måtte befinne seg på jorda. (Subirana et al., 2013)

Satellitene bærer med seg i hovedsak to typer nyttelast: navigasjonsdelen og SAR-delen (se kapittel 2.2.3 – *Signaler*). Førstnevnte består av generator for navigasjonssignaler (navigation-signal-generator-unit, NSGU), «frequency generation and upconversion unit», signalforsterker, signalfilter, og antenne for L-bånd-frekvenser. NSGUen genererer navigasjonsmeldingen basert på informasjon mottatt fra uplink-stasjonene i bakkesegmentet, og modellerer den på den utsendte kodesekvensen. Signalene blir synkronisert til Galileo System tid (GST) ved hjelp av klokkeinformasjon fra atomklokkene om bord, og konvertert til frekvenser i L-båndet ved igjen å bruke referansefrekvensen fra atomklokkene. Før signalene blir sendt til brukerne blir signalets effektnivå økt ved bruk av «low-noise» signalforsterkeren (LNA), før det går gjennom et band-pass filter (BPF). Signalene blir til slutt sendt ut via L-bånd-antennen. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)



Figur 5: Blokk-diagram for Galileo-satellitter. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

FOC-satellittene til Galileo-systemet er utstyrt med fire uavhengige atomklokker for å sikre en stabil klokkeferanse. To rubidumbaserte klokker sikrer korttidsstabilitet (10 ns per dag) og fungerer som reserveklokker, mens to passive hydrogen masere (1 ns per dag) fungerer som masterklokker i satellittene ved at de sikrer både lang- og korttidsstabilitet. Dette gjør at klokkekorreksjonene er gyldig i lengre tid. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) Til sammenligning har GPS blokk IIF satellittene to atomklokker basert på rubidium og en cesiumklokke. (Los Angeles Air Force Base, 2012)

SAR-delen mottar nødsignaler og videresender disse til bakkefasilitetene via frekvenser på L-båndet. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

2.2.2 Kontrollsegmentet

Kontrollsegmentet til Galileo har en omfattende infrastruktur på bakken:

- 2 bakkekontrollsentre (GCC) for kontroll av satellittene og deres konstellasjoner.
- 6 telemetri, «tracking» og kontroll (TT&C) stasjoner.
- 10 «uplink-stasjoner» (ULS).
- Et globalt fordelt nettverk av Galileo Sensor Stasjoner (GSS).

Kjernen i bakkesegmentet er de to bakkekontrollsentrene. Noen av deres hovedfunksjoner er:

- Prediktering av satellittbaner.
- Kontrollere satellittene og opplastingen av navigasjonsmeldinger.
- Kontrollere og vedlikeholde alle elementer forbundet med bakkesegmentet i «real-time».
- Konstruere navigasjonsmeldinger.
- Beregne Galileo System Tid (GST), og å være ansvarlig for å tilby stabile referanserammer for tid og koordinater til Galileo-systemet. (Subirana et al., 2013)

2.2.3 Brukersegmentet

Signaler

Galileo sender PRN koder og navigasjonsmelding på frekvensbåndene E1, E5a, E5b og E6. Signalene som blir sendt på disse båndene er tilpasset forskjellige typer brukerbehov og delt inn i ulike tjenester. Det er ikke endelig bestemt hvordan disse tjenestene blir inndelt, men her er siste tilgjengelige forslag:

- OS: Open Service. Åpen tjeneste som tilbyr bruk av opptil 3 forskjellige frekvensbånd. Enfrekvent bruk tilbyr omtrent samme ytelse som ved bruk av GPS C/A-kode. Tjenesten er ment for høyvolum bruk av satellitt-navigasjons tjenester.
- HAS: High-accuracy service. Gratistjeneste som gjennom E6-frekvensbåndet tilbyr høyere nøyaktighet ved å kringkaste PPP-korreksjoner. I utgangspunktet tenkt for kommersiell og profesjonell bruk.
- PRS: Public Regulated Service. Kontrollert tilgang rettet mot sikkerhetsmyndigheter som militæret og politiet. Kun for autorisert bruk. Tilbyr sterkt krypterte signaler for å være robust mot jamming og spoofing.
- SAS: Signal Authentication Service. Tjeneste som tilbyr krypterte koder på signalene, ment for satellittnavigasjon på profesjonelt og kommersielt nivå.

Galileo skal også bidra til:

- SAR: Search and Rescue. Systemet vil plukke opp nødsignal, og sende signal tilbake til brukeren om at hjelp er på vei. SAR er et bidrag til det internasjonale COSPAS-SARSAT systemet.
- SoL: Safety of Life. System som bidrar til forbedring av OS ved å tilby advarsler til brukerne når integriteten til systemet blir for dårlig. (EU, 2018)

Frekvensbåndene E1, E6 og E5ab er delt inn i flere signalkomponenter, vist i figur 6.

Band	Carrier freq. (MHz)	Channel or sig. comp.	Modulation type	Code rate (Mcps)	Data rate (bps)	Services
E1	1575.420	E1-A data	$\text{BOC}_{\text{cos}}(15,2.5)$	2.5575	N/A	PRS
		E1-B data	$\text{MBOC}(6,1,1/11)$	1.023	125	OS, CS, SoL
		E1-C pilot			–	
E6	1278.750	E6-A data	$\text{BOC}_{\text{cos}}(10,5)$	5.115	N/A	PRS
		E6-B data	BPSK(5)		500	CS
		E6-C pilot			–	
E5a	1176.450	E5a-I data	BPSK(10)	10.23	25	OS
		E5a-Q pilot			–	
E5b	1207.140	E5b-I data	BPSK(10)	10.23	125	OS, CS, SoL
		E5b-Q pilot			–	

Figur 6: Oversikt frekvensbånd og signalkomponenter. (Subirana et al., 2013)

Navigasjonsmeldinger

Galileo-satellittene kringkaster 4 forskjellige navigasjonsmeldinger:

- F/NAV (Freely accessible Navigation Message).
- I/NAV (Integrity Navigation Message).
- C/NAV (Commercial Navigation Message).
- G/NAV (Governmental Navigation Message).

Oversikt over hvilke frekvenser de forskjellige navigasjonsmeldingene sendes på finnes i figur 7.

Efemeridene i Galileo-navigasjonsmeldingen består av Kepler-elementer tilsvarende navigasjonsmeldingen for GPS. Almanakkdata, GST-UTC parametere og klokkekorreksjoner er tilsvarende GPS-definisjonen. Galileo har kun mindre tilpasninger. (Kaplan & Hegarty, 2017)

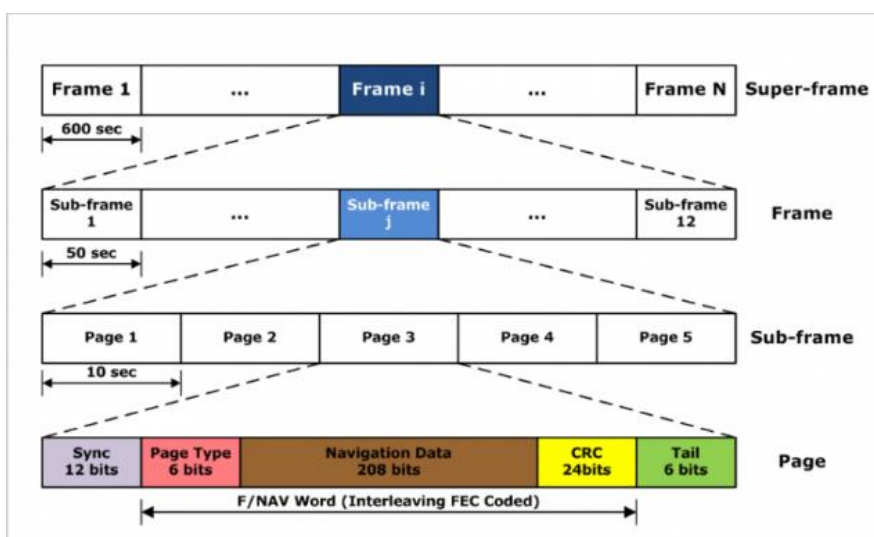
Message-type	F/NAV	I/NAV		C/NAV	G/NAV	
Galileo Services	OS	OS/CS/SoL		CS	PRS	
Channels	E5a-I	E1B	E5b-I	E6B	E1A	E6A
Navigation/Positioning	×	×	×		×	
Integrity		×	×		×	
Supplementary				×		
Public Regulated					×	
Search and Rescue		×				

Figur 7: Oversikt over navigasjonsmeldinger Galileo (Subirana et al., 2013)

F/NAV og I/NAV

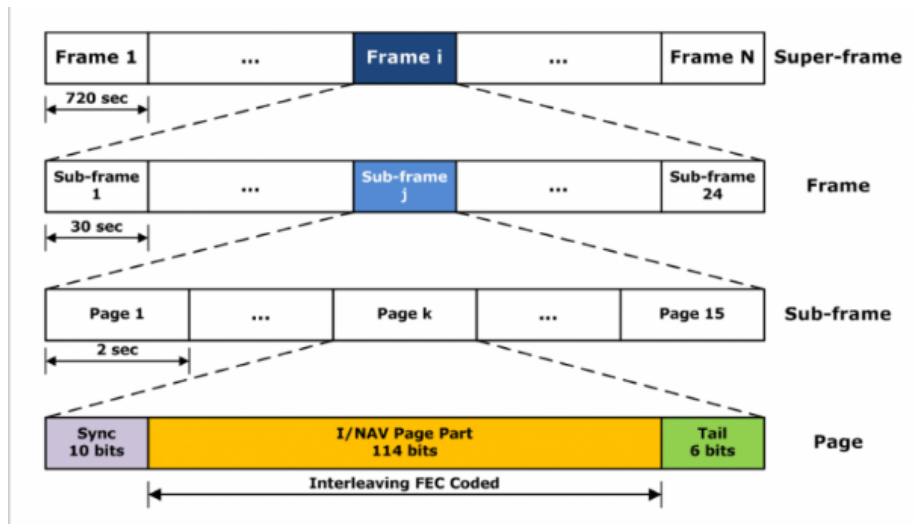
Galileo tilbyr ikke en spesifikk navigasjonsmelding for kombinert bruk av E5a og E5b. I stedet tilbyr hver av subfrekvensene en service-spesifikk navigasjonsmelding hver. F/NAV er modulert på E5a frekvensen, mens E5b tilbyr I/NAV. Banedataene i de to navigasjonsmeldingene er tilsvarende, men klokkekorreksjonene kan være litt forskjellige selv om de forventes å være veldig like. Dette er fordi hver av meldingene er individuelt konstruert for forskjellige frekvenspar. Det vil si F/NAV inneholder klokkekorreksjoner spesifikke for E1/E5a og I/NAV for E1/E5b. F/NAV-meldingen blir kringkastet på E5a, mens I/NAV blir sendt på E1 og E5b. (Kaplan & Hegarty, 2017)

En side i F/NAV-meldingen har en lengde på 238 bit eller 10 sekunder. En F/NAV-melding består av 5 subrammer med 12 sider hver. Det vil si en lengde på 600 sekunder. Den blir kringkastet med en rate på 25 bps.



Figur 8: F/NAV (Navipedia, 2011)

I/NAV har en lengde på 720 sekunder med 24 subrammer med 15 sider hver. I/NAV drar nytte av at den blir kringkastet på to frekvensbånd. Sidene er delt opp i like og odde deler. Ved bruk av en tofrekvent mottaker lastes motsatte deler ned annenhver gang etter hverandre, delt mellom E1 og E5b. Disse blir satt sammen til slutt. Dette gjør at den komplette I/NAV-meldingen kan lastes ned raskere. Det vi si med en rate på 125 bps. (Kaplan & Hegarty, 2017)



Figur 9: I/NAV (Navipedia, 2011)

2.3 Kodemåling

Ved kodemåling sammenliknes utsendt PRN-kode fra satellitt med et duplikat av koden produsert i mottakeren. Dette gjøres for å kunne bestemme reisetiden til signalet, og dermed avstanden mellom satellitt og mottaker. Duplikatet sammenlignes stegvis med kodesekvensen fra satellitten til maksimum korrelasjon er oppnådd. Tidsskiftet mellom PRN-koden fra satellitten og den som blir laget i mottakeren tilsvarer signalets reisetid. Avstanden som oppnås ved å multiplisere tidsskiftet med lyshastigheten er å betrakte som en pseudoavstand. Dette er fordi den er beheftet med diverse feilkilder, som for eksempel klokke. (Seeber, 2008)

Observasjonsligningen for kodemåling er:

$$PR_{CD} = c(t_r - t_s) = R + cdt_u + cdt_a + cdt_s + \varepsilon_R$$

Ligning 1: Observasjonsligning for kodemåling (Seeber, 2008)

Hvor PR er pseudoavstand mellom satellitt og mottaker, c er lyshastigheten, t_r er tid for maksimum korrelasjon målt i mottaker, t_s er tidspunkt for utsendt signal fra satellitt, R er avstand mellom satellitt og mottaker, dt_u er synkroniseringsfeil mellom klokke, dt_a er atmosfæriske forsinkelser fra troposfære og ionosfære, dt_s er satellittklokkefeilen i forhold til GPS-systemtid og ε_r er annen målestøy.

2.4 Fasemåling

Ved fasemåling er observasjonsstørrelsen faseforskjellen mellom den Doppler-skiftede bærebølgen som mottas, og det mottaker-genererte duplikatet. Fasemåling er betraktelig mer nøyaktig enn kodemåling fordi bølgelengdene til bærebølgen er mye kortere enn kodesekvensene. Den ukjente størrelsen blir antallet hele bølgelengder mellom satellitt og mottaker. For mer utfyllende informasjon henvises leseren til (Seeber, 2008). Observasjonslikningen for fasemåling er:

$$\Phi_r^s = \frac{1}{\lambda}R + N + \frac{1}{\lambda}\Delta\delta_r^s$$

Ligning 2: Observasjonslikning fase (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

Hvor Φ_r^s er den målte bærefasen uttrykt i sykler, R er avstanden mellom satellitten og mottaker, λ er bølgelengden til bærebølgen, N er faseflertydigheten og $\Delta\delta_r^s$ er den samlede mottaker og satellitt klokke biasen.

2.5 PPP (Precise Point Positioning)

PPP kan beskrives som en utvidelse av absolutt posisjonsbestemmelse hvor både kode- og fasemåling er benyttet som observasjonstørrelser, samt som oftest flerfrekvent måling for å kunne danne ionosfærefrie lineærkombinasjoner. Ved posisjonering ved hjelp av PPP blir klokke- og banedata fra satellittene erstattet med mer presise data fra eksterne nettverk som for eksempel fra det International GNSS Service (IGS) organiserer. IGS tilbyr også filer med presise fasesentre for satellitt- og mottakerantenne. Med PPP kan det oppnås nøyaktighet på rundt 1 cm for statisk posisjonering, mens kinematisk måling kan gi nøyaktighet på noen cm. (Ovstedal et al., 2006)

En stor fordel med PPP i forhold til differensielle metoder er uavhengigheten av basestasjoner. Dette betyr at PPP kan fungere i områder hvor referansestasjoner ikke er etablert, og hvor det heller ikke er mobilnettverk. (Ovstedal et al., 2006)

En ulempe i forhold til differensiell måling er at faseflertydigheten blir estimert som et desimaltall (float). Fordi PPP baserer seg på udifferensierte observasjoner kan ikke satellitt- og hardwarebiaser kanselleres. Med fix-løsning, som innebærer å finne faseflertydigheten som et heltall, vil det ta mye kortere tid å oppnå centimeters nøyaktighet. Med svakere geometri som følge av float-løsning trenger PPP en lengre tidsperiode med kontinuerlige observasjoner for å oppnå høy nøyaktighet. Nøyaktigheten øker altså med tiden, så lengden på målesesjonen er noe som må tas med i betraktningen. Ved differensiell måling blir også feilkilder knyttet til satellitt- og mottaker klokker eliminert. Dette blir løst i PPP ved å bruke presise klokke data. (Ovstedal et al., 2006)

2.6 Feilkilder GNSS

Feilkildene innen GNSS deles gjerne inn i satellittrelaterte feilkilder, feilkilder relatert til signalets forplantning gjennom atmosfære og mottakerrelaterte feilkilder. Disse tre kategoriene vises i tabellen nedenfor med tilhørende RMS avstandsfeil på en enkeltobservasjon:

Tabell 1: Feilkilder GNSS og ca. RMS avstandsfeil (Seeber, 2008)

Feilkilde	RMS avstandsfeil på enkeltobservasjon
<i>Satellitt</i>	
- Bane	1 – 2 m
- Klokke	1 – 2 m
<i>Signalforplantning</i>	
- Ionosfære (tofrequent)	cm – dm
- Ionosfære (modell, best)	1 – 2 m
- Ionosfære (modell, middels)	5 – 10 m
- Ionosfære (modell, dårlig)	10 – 50 m
- Troposfære (modell)	dm
<i>Mottaker</i>	
- Multipath	1 – 2 m
- Hardware forsinkelse	dm – m
- Antenne fasesenter	mm - cm

2.7 Satellittrelaterte feilkilder

2.7.1 Banefeil

Denne feilkilden skyldes ulikheter i de predikterte satellittbanene og de reelle banene. Satellittene blir utsatt for ulike krefter, blant annet fra jordas gravitasjonsfelt, strålingstrykk fra sola og gravitasjon fra sol og måne. Disse kreftene inngår i beregningsmodellene for banene, men er vanskelig å modellere helt presist. For å oppnå enda større nøyaktighet kan presise, postprosesserte efemerider benyttes. Disse støtter seg på observasjoner fra globalt distribuerte nettverk.

SPP (Single Point Positioning) påvirkes i mye større grad av banefeil, mens ved relativ posisjonering blir største delen av feilen kansellert når mottakerne er i nærheten av hverandre. (Seeber, 2008)

2.7.2 Satellittklokkefeil

Satellittklokkefeil skyldes avvik mellom systemtiden i GNSS-systemet og klokken i satellittene. Dette skyldes relativistiske effekter og drift i klokken. Ved at satellittklokkene går 38 μs /dag for fort absorberes omtrent 99.6% av denne feilen. En feil på 1 μs vil utgjøre ca. 300 m pseudoavstandsfeil på en enkeltobservasjon. Atomklokker blir brukt for å kontrollere avviket mellom GPS-tid skalaen og de enkelte satellittklokkene på nanosekund-nivå. Korreksjoner for avviket mellom klokken og systemtiden kommer til brukerne gjennom parametere i navigasjonsmeldingen. Ved bruk av disse korreksjonene kan synkroniseringen holdes på et nivå rundt 5 til 10 ns. (Seeber, 2008)

Enda bedre estimater kan oppnås ved å benytte seg av presise klokkekorreksjoner fra for eksempel IGS eller NASA. Feilkilden kan også elimineres ved å danne enkeltdifferanser mellom to mottakere.

2.8 Feil relatert til signalets forplanting gjennom atmosfæren

2.8.1 Ionosfæreforsinkelse

Ionosfæren er den delen av atmosfæren som er lokalisert mellom 60 og 500 km over jordas overflate. I denne delen blir nøytrale gassmolekyler ionisert av ultrafiolett stråling fra sola, og frigir dermed frie elektroner og plasma (ioner). De frie elektronene og ionene som blir sluppet fra gassmolekylene påvirker elektromagnetiske bølgers bevegelse, inkludert GNSS-signaler. Ionosfæren blir igjen delt inn i flere lag med forskjellige egenskaper og elektrontetthet.

Fordi det er stråling fra sola som setter i gang ioniseringen av gassmolekylene, så vil elektrontettheten variere med breddegrad, tid på året og solaktivitet. Solaktiviteten varierer i 11-års sykluser. Solutbruddene er mest hyppige på toppen av disse syklusene, og dermed er også elektrontettheten i ionosfæren stor. Midt på dagen, og på sommeren, er også tidspunkter hvor elektrontettheten normalt sett er størst. Det finnes så klart unntak, og andre irregulære forhold. (Holtet, 2014)

Bærebølgen beveger seg med fasehastigheten og blir forskjøvet fordi refraksjonsindeksen endres langs signalveien. Signalinformasjonen, altså koden, beveger seg med gruppehastighet og blir forsinket med samme verdi. Dette kalles ionosfærisk divergens. Forsinkelsen til bærebølgen og signalinformasjonen er den samme i meter, bare med motsatt fortegn.

Forsinkelsen til gruppen og fasen er uttrykt med følgende ligninger:

$$\Delta S_{iono,p} = \frac{-40.3TEC}{f^2} \quad \Delta S_{iono,g} = \frac{40.3TEC}{f^2}$$

Ligning 3: Ionosfærisk forsinkelse

Hvor TEC er «total electron content» langs integrasjonsveien uttrykt i elektroner/m². TEC blir ofte uttrykt i TEC-enheter, hvor en TECU er 10¹⁶ elektroner/m². F er frekvensen til bærebølgen. Indeksene p og g skiller mellom fase- og gruppehastighet. (Kaplan & Hegarty, 2017) TEC blir definert som:

$$TEC = \int N_e ds_0$$

Ligning 4: Definisjon av TEC

Hvor N_e er elektrontettheten og s₀ er den geometriske avstanden mellom satellitten og mottakeren. Det integreres over en tenkt kolonne med et snitt på 1 m². Integralet over er det samme som STEC (Slant TEC). Ofte er det interessant å se på ionosfæreeffekten integrert i høyderetning (VTEC). Da må man benytte seg av en mapping-funksjon.

For å håndtere problematikken knyttet til ionosfæren brukes i hovedsak 3 metoder:

1. Ionosfæremodeller
2. Hjelpesystemer (SBAS)
3. Ionosfærefrie lineærkombinasjoner

For utdypende informasjon henvises det til *kapittel 5.3.2 i GNSS, Hoffmann-Wellenhof, Lichtenegger, Wasle, 2008. (Hoffmann-Wellenhof et al., 2007)*

2.8.2 Ionosfæremodeller

Mens tofrekvente mottakere ikke trenger å korrigere for ionosfæreforsinkelse ved dannelse av ionosfærefri-lineærkombinasjon. Dette gjelder ikke for enfrekvente målinger som må benytte seg av en modell for å redusere ionosfærepåvirkningen på avstandsmålingene. Forventningen er at modellene som nevnes her skal kunne korrigere for ca. 50% av ionosfæreforsinkelsen. (Lejeune, 2008) Modellene støtter seg på koeffisienter som oppdateres gjennom navigasjonsmeldingen, og er basert på empiriske data knyttet til ionosfæren. Dette betyr at de ikke klarer å korrigere for lokale og uforutsigbare variasjoner i ionosfæreaktivitet. (Lejeune, 2008)

2.8.3 NeQuick

Galileo støtter seg på ionosfæremodellen NeQuick. Dette er en tredimensjonal og tidsavhengig modell som predikerer elektrontettheten i ionosfæren basert på input relatert til solaktivitet.

NeQuick har blitt tilpasset for sanntids bruk kalt NeQuick-G. Denne baserer seg kun på én input-parameter, kalt «effective ionisation level», A_z , uttrykt i solar flux enheter ($10^{-22} \text{Wm}^{-2}\text{HZ}^{-1}$).

$$A_z = a_0 + a_1\mu + a_2\mu^2$$

Ligning 5: Effective ionisation level

Hvor a_0 , a_1 og a_2 er ionosfære-koeffisienter fra navigasjonsmeldingen. Disse blir oppdatert minst en gang per dag. μ er en størrelse som kalles «modified dip latitude». Dette er en verdi man kan finne i en tabell som tilhører NeQuick-G modellen, sortert etter breddegrad.

Fordi NeQuick er en tredimensjonal og tidsavhengig modell kan den beregne både vertikal (VTEC) og skrå elektrontetthet (STEC) gitt i elektroner/ m^2 ved å integrere langs siktelinjen mellom mottaker og satellitt. STEC kan deretter brukes til å beregne gruppeforsinkelse i meter. (Navipedia, 2017)

2.8.4 Klobuchar

I likhet med NeQuick-modellen er Klobuchar en empirisk modell som benytter seg av ionosfære-koeffisientene fra navigasjonsmeldingen. Denne modellen reduserer ionosfærefeilen med rundt 50 % ved å anta at elektrontettheten er konsentrert i et tynt lag rundt 350 km over bakken. For utdypende informasjon om denne modellen henvises leseren til John A. Klobuchar sin artikkel fra 1987 i IEEE som beskriver modellen. (Klobuchar, 1987)

2.8.5 Ionosfærefri lineærkombinasjon

Den ionosfærefrie lineærkombinasjonen er svært nyttig da det er vanskelig å finne gode nok modeller for TEC pga. tidsvarierende effekter. Ionosfæremodeller fjerner som nevnt bare omtrent 50% av effekten. Ved å bruke signaler med forskjellige frekvenser kan denne effekten tilnærmet elimineres. Dette er hovedgrunnen til at GNSS-satellittene sender på to eller flere frekvenser. Signalets bane gjennom ionosfæren avhenger av frekvensen fordi det er et dispersivt medium. Det er dette som utnyttes ved ionosfærefri-lineærkombinasjon. Ved å bruke en tofrekvent mottaker som måler pseudo-avstand på to frekvensbånd kan forsinkelsen på begge frekvenser estimeres. Ulempen med å kombinere frekvenser er at det oppnås mer støy på signalet. (Kaplan & Hegarty, 2017)

2.8.6 Troposfære

Troposfæren er den delen av atmosfæren som befinner seg mellom jordas overflate og omtrent 60 km ovenfor. Det er et ikke-dispersivt medium og forsinker dermed fase- og kodemålinger like mye. Forsinkelsen avhenger av faktorer som temperatur, trykk og fuktighet, i tillegg til mottakerens plassering. Dette betyr at troposfæren må modelleres. Omtrent 90% av forsinkelsen kommer fra den hydrostatiske delen av troposfæren som heldigvis er lett å modellere. Denne delen består tørre gasser, og påvirkes av temperatur og trykk på en forutsigbar måte.

Den våte delen består av vanndamp og kondensert vann i form av skyer, og påvirkes av værforholdene. Dette er vanskelig å modellere på grunn av en ganske tilfeldig variasjon. (Subirana et al., 2013)

2.9 Mottakerrelaterte feilkilder

2.9.1 Fasesentervariasjon hos antenne

For presise anvendelser av GNSS er det viktig å kjenne fasesenteret til antennen. Det mekaniske fasesenteret er som regel definert på submillimeter nivå, mens det gjennomsnittlige elektriske fasesenteret for de ulike frekvensbåndene som regel er oppgitt av produsenten. Det faktiske elektriske fasesenteret er en komponent som er avhengig av retningen til det innkommende radiosignalet, samt frekvensen. Forskjellen mellom det gjennomsnittlige og det faktiske elektriske fasesenteret kalles fasesentervariasjon (PCV). For måling av korte vektorer ved bruk av samme antenne blir PCV eliminert ved differensiering, mens ved bruk av forskjellige antenner eller ved bruk av kun en antenne må det korrigeres for PCV. Den totale korreksjonen er en kombinasjon av avviket mellom PCV og antennes referansepunkt og gjennomsnittlig elektrisk fasesenter. For å kunne ha kontroll på denne feilkilden må det brukes kalibrerte antenner. Ulike metoder for dette er: kalibrering i et anekoisk laboratorium, absolutt kalibrering og relativ kalibrering. For mer om dette henvises det til (Seeber, 2008). Forsinkelse i hardware og ulike former for observasjonsstøy er også feilkilder relatert til mottaker. For utdypelser av dette henvises det til (Seeber, 2008).

2.9.2 Multipath

Med multipath menes det at ett eller flere reflekterte signaler treffer antennen, i tillegg til det direkte signalet. Dette gir en feil i avstandsobservasjonen. De reflekterte signalene kan for eksempel komme fra bygninger, biler eller vannoverflater. Konsekvensen av multipath kan blant annet være fasebrudd. På grunn av at kodesekvensene er betydelig lengre enn bølgelengden hos bærebølgen, vil effekten av multipath påvirke kodemålinger i større grad enn fasemålinger. Dette betyr også at effekten på C/A-koden er større enn på P-koden. (Seeber, 2008)

2.10 RINEX-formatet

RINEX er et format som ble utviklet av W. Gurtner ved Universitetet i Bern i 1989 for utveksling av GNSS-data mellom forskjellige mottakertyper. Det er et ASCII (tekst)-format. Dette gjør at det er lettlest også for mennesker og kan åpnes i et hvilket som helst tekstredigeringsprogram.

Siden starten har formatet blitt videreutviklet til å bli tilpasset utviklingen av de forskjellige GNSS-systemene og deres bruksområder. De vanligste RINEX-typerne er navigasjonsmeldingen som inneholder satellittens efemeridedata, og observasjonsfilen som blant annet inneholder faseobservasjoner, pseudoavstander, dopplermålinger og signal/støyforhold. Det finnes også en metrologisk-fil. Observasjoner fra de forskjellige GNSS-systemene blir skilt fra hverandre ved bruk av en bokstav, f.eks.: «G» for GPS, «R» for GLONASS og «E» for Galileo. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

Den nyeste versjonen av RINEX-formatet er på tidspunktet denne oppgaven er skrevet RINEX 3.03. Spesifikasjonene for RINEX-formatet kan leses på IGS sine nettsider. (IGS, 2015)

2.10.1 Hatanaka-kompresjon

Hatanaka-RINEX (eller compact-RINEX/.crx) er en kompresjonsmetode utviklet av Yuki Hatanaka for å minke størrelsen på RINEX observasjonsfiler til mindre ASCII-filer. Metoden brukes ofte i kombinasjon med UNIX-kompresjon (eller en annen generell komprimeringsmetode). Etersom RINEX-filer er bygd opp av avstandsobservasjoner fra mottaker til satellittene inneholder disse mange store tall. Siden disse tallene har relativt små variasjoner i løpet av observasjonstiden vil det være mer plasseffektivt å lagre neste observasjon som variasjonen fra forrige. (Hatanaka, 2008) I kombinasjon kan observasjonsfilen bli redusert til 15% størrelse uten tap av informasjon. (Land Information New Zealand, 2019) Dette er hensiktsmessig for overføring og lagring av RINEX-filer.

Kapittel 2 – Teori

(Tom side)

Kapittel 3 – Metode

3.1 Innledning og teoridel

I innledningen av denne oppgaven har vi brukt et intervju som metode for innsamling av informasjon. Dette ble gjort for at vi skulle få den nyeste tilgjengelige informasjonen angående Norges rolle i Galileo-prosjektet. Dette prosjektet er i en rask utvikling, og Norge sitt bidrag endrer seg hvert år.

For teoridelen har vi brukt et litteratursøk for å forklare begrepene og metodene vi bruker videre i oppgaven. For informasjon om beregningsmetoder og «tidløs» teori har vi i hovedsak benyttet oss av lærebøker. Ettersom mye av informasjonen om oppskytning og nye satellittsystemer ikke er skrevet i de eldre lærebøkene, har vi her brukt artikler og troverdige nettsider.

3.2 Databehandling

Observasjonsfilene som ble mottatt fra Norsk Romsenter kom som tidligere nevnt som Hatanaka-RINEX (Compact RINEX) som igjen var komprimert ved hjelp av gzip. Vi benyttet oss av en batch-fil for å pakke opp og konvertere observasjonsfilene til RINEX-formatet.

For selve prosesseringen ønsket vi å bruke det kostnadsfrie programmet RTKLib, men dette var ikke mulig ettersom programmet mangler støtte for GPS L5. Valget falt da på TerraPos. Dette er en programvare for etterprosessering av GNSS-data levert av TerraTec. TerraPos har full multi-GNSS støtte, men mangler muligheten for å benytte seg av ionosfæremodellen NeQuick.

For å lage en fasit basert på en multi-frekvens multi-GNSS PPP-løsning (PPP er beskrevet i teorikapittelet) hentet vi presise bane-, klokke- og jordrotasjonsparametere for alle døgnene som datasettet dekket. Filene som vi lastet ned var MGEX-filer levert av analysesenteret CODE (Center for Orbit Determination in Europe). Disse filene er 5-systems løsninger. Det vil si at de inneholder data og parametere for GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou og QZSS.

For å automatisere prosessen for nedlasting av presise parametere for hver observasjonsfil, konstruerte vi en batch-fil. Det ble også brukt en egenskap i gnssdownload som lagret hvilke data som var tilhørende hver observasjonsfil i en tekstfil. Da ble det enkelt å konstruere oppsettfilene som senere skulle inn i en batch-prosessering i TerraPos. Disse tekstdokumentene inneholder hvilke bane-, klokke og jordrotasjonsparametere som hører til hver RINEX-observasjonsfil. Ettersom observasjonsfilene strekker seg over et døgn trengs det også data for dagene før og etter, i alt ni filer per døgn for PPP-prosesseringen (se figur 10). Filene for de nærliggende dagene trengs for å håndtere overgangen mellom døgnene.

```

--profile marine
--mode GNSS
--RINEX-obs-file obs/HURTOONOR_R_20172770000_01D_01S_MO.rnx
--SP3-ephemeris 04_efemerider\COM19692.EPH GRECJ
--SP3-ephemeris 04_efemerider\COM19693.EPH GRECJ
--SP3-ephemeris 04_efemerider\COM19694.EPH GRECJ
--RINEX-clock-file 04_efemerider\COM19692.CLK GRECJ
--RINEX-clock-file 04_efemerider\COM19693.CLK GRECJ
--RINEX-clock-file 04_efemerider\COM19694.CLK GRECJ
--erp-file 04_efemerider\COM19692.ERP
--erp-file 04_efemerider\COM19693.ERP
--erp-file 04_efemerider\COM19694.ERP
--project 2017doy277
--subproject PPP

```

Figur 10: Oppsettfil PPP-løsning DOY277

For å gjennomføre prosesseringen i TerraPos effektivt, brukte vi som nevnt batch-prosessering basert på oppsettfiler. Dette er tekstfiler som inneholder en liste med kommandoer som brukes av TerraPos i prosesseringen, samt filene som skal brukes for den aktuelle observasjonsfilen. Observasjonsfilene er døgnbaserte så én oppsettfil måtte konstrueres til hvert døgn.

Figur 10 viser en oppsettfil for PPP-prosessering av ett døgn. Her er alle «switchene» som vi ville bruke i TerraPos listet opp. Det som ikke er spesifisert i oppsettfilen ble satt til standardinnstillinger i TerraPos, med unntak av antenntype og navn på underprosjekt, som måtte spesifiseres. Standard for TerraPos er prosessering med PPP med alle tilgjengelige satellitter og frekvenser. Vi har også valgt å benytte oss av TerraPos sin standardinnstilling for elevasjonscuttoff, 10°. Dette er for å unngå satellitter som ligger lavt i horisonten. Ved observasjoner fra lavere elevasjonsvinkler vil signalet gå lengre gjennom atmosfæren, noe som gjør at det kan bli mer forstyrrelser på signalet.

Konstruksjonen av oppsettfilene ble gjort i Python ved å benytte tekstfilene som ble laget ved batch-nedlastingen av klokke-, bane- og jordrotasjonsparametere. Inputfilene var merket med day-of-year (DOY) slik at det ble lett å plukke ut riktige data tilhørende observasjonsfilene. Det gjorde det også slik at vi fikk navngitt prosjektene etter DOY. Prosjektene og underprosjektene ble automatisk organisert i mapper etter navn spesifisert i oppsettfilen.

04_efemerider	15.02.2019 19.55	Filmappe	
2018doy001.tp_proj	28.02.2019 12.22	Filmappe	
2018doy002.tp_proj	28.02.2019 12.33	Filmappe	
2018doy003.tp_proj	28.02.2019 12.43	Filmappe	
2018doy004.tp_proj	28.02.2019 12.53	Filmappe	
2018doy005.tp_proj	28.02.2019 13.58	Filmappe	
2018doy006.tp_proj	28.02.2019 14.10	Filmappe	
2018doy007.tp_proj	28.02.2019 13.16	Filmappe	
2018doy008.tp_proj	28.02.2019 13.26	Filmappe	
2018doy009.tp_proj	28.02.2019 13.36	Filmappe	
2018doy010.tp_proj	28.02.2019 13.47	Filmappe	
broadcast_FNAV	21.02.2019 13.28	Filmappe	
broadcast_GPS_FNAV	27.02.2019 13.38	Filmappe	
broadcast_MGEX	15.02.2019 19.38	Filmappe	
command_export_galileo	18.02.2019 09.46	Filmappe	
command_export_galileo_fnav	21.02.2019 13.37	Filmappe	
command_export_galileo_gps	28.02.2019 14.09	Filmappe	
command_export_gps	18.02.2019 09.46	Filmappe	
command_export_PPP	18.02.2019 09.35	Filmappe	
obs	15.02.2019 19.40	Filmappe	
output_terrasos	28.02.2019 14.07	Filmappe	
PPP_CODE_RUN	28.02.2019 14.09	Filmappe	
command_file_terrasos.bat	21.01.2019 11.47	Satsvis Windows-fil	1 kB
tpexport_command_file_galileo.bat	12.02.2019 13.03	Satsvis Windows-fil	1 kB
tpexport_command_file_galileo_fnav.bat	20.02.2019 13.02	Satsvis Windows-fil	1 kB
tpexport_command_file_galileo_gps.bat	26.02.2019 12.36	Satsvis Windows-fil	1 kB
tpexport_command_file_gps.bat	12.02.2019 13.03	Satsvis Windows-fil	1 kB
tpexport_command_file_PPP.bat	12.02.2019 13.03	Satsvis Windows-fil	1 kB

Figur 11: Mappedoppsett som viser struktureringen av filer tilhørende batch-prosesseringen.

Denne fremgangsmåten ble gjentatt ved prosessering av kodeløsninger for Galileo E1/E5a, GPS L1/L5 og GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a. I stedet for å benytte presise bane-, klokke- og jordrotasjonsparametere benyttet vi parametere fra navigasjonsmeldingen. Ved prosesseringen av GPS-løsningen trengte vi ikke å bearbeide den kringkastede navigasjonsmeldingen, men dette måtte gjøres for Galileo-løsningene.

TerraPos har ikke en egen løsning for å skille mellom Galileos navigasjonsmeldinger, F/NAV og I/NAV. Disse kommer derfor litt om hverandre i den kringkastede navigasjonsmeldingen. Vi ønsket kun å ha navigasjonsmeldingen som inneholder F/NAV ettersom denne samsvarer med E5a. Dette problemet ble løst ved å sorterte ut F/NAV- og I/NAV-meldingene fra navigasjonsmeldingen for Galileo. Det samme gjorde vi for en navigasjonsmelding som inneholder både GPS og Galileo.

For kodeløsningene har vi deaktivert prosessering av fasemålinger og doppler. Når dette gjøres vil kun kodeobservasjonene bli brukt i prosesseringen. Videre valgte vi hvilke systemer og frekvenser som skal brukes for den aktuelle prosesseringen. Under følger en tabell som viser de forskjellige oppsettene vi har brukt for prosessering (se tabell 2).

Resultatdataene fra prosesseringen i TerraPos ble eksportert som tekstfiler, igjen ved hjelp av batchkjøring. Vi konstruerte et eget format som inneholder de tallene vi ønsker å se på senere. Vi ønsket å ha flere muligheter for plotting av kart og differanser, noe som gjør at eksportfilene inneholder mye informasjon for hvert tidspunkt. Oppsettet for format i figur 12.

```
# Note: Quality codes set to 4 for all epochs having a valid solution
# Ellipsoid: GRS80 (a=6378137.0000, f=1/298.25722210)#
# -----
# Project:      Test Project# Output:
# (GPS)
# Grid Easting (m)
# Grid Northing (m)
# Ellipsoidal height (m)
# Latitude (Degrees)
# Longitude (Degrees)
# Sqrt of Position Covariance element (1,1) (g-frame)
# Sqrt of Position Covariance element (2,2) (g-frame)
# Sqrt of Position Covariance element (3,3) (g-frame)
# Number of satellites
# PDOP
# Speed over Ground (m/s)
#
-32307655.000000    615107.984    6675555.879    242.128    60.200542884    11.076501334    0.010    0.010    0.010    8    7.3    0.1797
```

Figur 12: Oppsettet av resultatfilene fra TerraPos

3.3 Prosessering

Dataene ble prosessert på følgende måter:

Tabell 2: Oversikt over etterprosesseringen

Prosesseringsmetode	Systemer	Frekvenser
Precise Point Positioning (PPP)	Multi-GNSS	Fler-frekvent
Kode	GPS	L1 / L5
Kode	Galileo	E1 / E5a
Kode	GPS + Galileo	L1 / L5 – E1 / E5a

For videre arbeid har vi ikke benyttet oss mye av kodemålingene fra kun Galileo E1/E5a ettersom det ikke er beregnet nok posisjoner per døgn.

3.4 Ytelsesmål

Vi har valgt å benytte oss av to forskjellige ytelsesmål, RMS og PDOP. Vi har også brukt sanne feil for å simulere og vise differansene mellom de forskjellige løsningene. For å vise løsninger over lengre tid, for eksempel en uke eller måned, er RMS brukt. Dette er fordi differansene for de forskjellige løsningene vil bli vanskelig å se over lengre tid enn et døgn.

3.4.1 RMS

For å beskrive kvaliteten på de beregnede posisjonene i oppgaven er RMS ytelsesmålet som er benyttet. Root Mean Square (RMS) er oversatt til norsk kvadratisk gjennomsnitt. Ved utregning av RMS summeres kvadratene av de sanne differansene, deles på antall og til slutt tas kvadratroten av dette. I vedlegg B.5 i Kartverkets standard for geodatakvalitet (Statens Kartverk, 2015) står det at: «Dersom noe som er kvadrert er sanne avvik, så gir RMS samme verdi som standardavviket» og «RMS gir altså forventingsrett estimat bare når vi har sanne feil». Det står også at hvis systematiske avvik er fjernet fra differansene så vil RMS gi en lavere verdi enn standardavviket. Under avsnittet «Statisk måling og sanne feil» i «Resultater» er det beskrevet hvorfor differansene mellom den kinematiske PPP-løsningen og kodeløsningene kan kalles sanne feil. RMS har gitt oss muligheten til å lage et kvalitetstall for kodeløsningene basert på hele datasettet.

Vi har valgt å bruke RMS istedenfor standardavvik ettersom vi har tilgang på en tilnærmet fasit, slik at vi kan lage sanne feil. Standardavviket gir den gjennomsnittlige avstanden fra gjennomsnittet, mens RMS gir oss en middelvei av differansene i resultatene. RMS er egnet for differanser i posisjoner som har både positive og negative verdier. Det vi ønsker å se er lave RMS-verdier, ettersom det viser at differansene er små.

Formelen for RMS er:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}}$$

Hvor ε er sanne avvik og n er antall differanser.

3.4.2 DOP – Dilution of precision

DOP (Dilution of precision) er et mål for geometrien mellom mottakeren og satellittene som det måles til. Nærmere bestemt geometrien ved et bestemt tidspunkt fordi de relative posisjonene mellom satellittene og mottaker endres med tiden. Denne størrelsen avhenger kun av satellittenes posisjoner i atmosfæren, og er derfor uavhengig av de målte pseudoavstandene.

DOP kan geometrisk vises som volumet av et tetrahedron mellom satellittene og mottakeren. Denne figuren blir laget av mottaker-satellitt vektorenes skjæring med en enhetskule med sentrum i mottakeren. PDOP-verdien er omvendt proporsjonal med volumet til tetrahedronet, slik at ved større volum vil PDOP-verdien bli lavere. Ved at satellittene har større avstand fra hverandre vil volumet til tetrahedronet bli større.

PDOP er et kvalitetsmål som vi ønsker å bruke for å visualisere bidraget som Galileo gir til satellitt-konstellasjonen. Ved vanskelige måleforhold, for eksempel trange fjorder eller med høye fjell i nærheten, vil flere satellitter kunne gi en bedre geometri, og dermed en lavere PDOP-verdi. Hvis det brukes flere enn 10 satellitter kan feilene redusere hverandre, noe som gjør at DOP-verdiene blir kunstige lave. (Førssel, 2019)

De ulike DOP-verdiene som brukes er:

- GDOP – Geometrisk DOP
- PDOP – Tredimensjonal DOP
- TDOP – Tid DOP
- HDOP – Horisontal DOP
- VDOP – Vertikal DOP

Matematisk blir DOP utregnet fra den inverse av normalligning matrisen:

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

Hvor Q_x er en 4x4 matrise hvor komponentene blir påvirket av X, Y og Z-verdiene til mottakeren, samt mottakerens klokkekomponent. A er designmatrise hvor de tre første radene er komponenter av enhetsvektoren mellom mottakeren og satellittene. Kofaktormatrisen Q_x blir:

$$Q_x = \begin{bmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} \end{bmatrix}$$

Hvor diagonalelementene i Q_x brukes for å regne ut følgende DOP-verdier:

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}}$$

$$PDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz}}$$

$$TDOP = \sqrt{q_{tt}}$$

Ligningene ovenfor viser at DOP kun er en geometrisk størrelse som er uavhengig av observasjoner. Hvis Q_x -matrisen blir transformert fra et ECEF-system til et lokalt toposentrisk system (ENU), så kan horisontal og vertikal DOP hentes fra diagonalen (tidsavhengige komponenter sees bort fra her).

$$Q_x = R Q_x R^T = \begin{bmatrix} q_{nn} & q_{ne} & q_{nu} \\ q_{ne} & q_{ee} & q_{eu} \\ q_{nu} & q_{eu} & q_{uu} \end{bmatrix}$$

Hvor R er rotasjonsmatrise med aksene til ENU-systemet. Formlene for HDOP og VDOP blir:

$$HDOP = \sqrt{qnn + qee}$$

$$VDOP = \sqrt{quu}$$

(Hofmann-Wellenhof et al., 2007)

3.5 Oppskytingsplan Galileo

En oversikt over når de ulike Galileo-satellittene ble skutt opp, eller når de skal skytes opp, finnes i vedlegg 2. Der er også satellittenes nåværende status nevnt.

3.6 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G

Som nevnt i innledningen, mottok vi beregnede TEC-verdier og differanser fra Yngvild Andalsvik i Kartverket. Disse var beregnet fra observasjoner ved hjelp av Klobuchar, NeQuick-G og ved bruk av to frekvenser. Dette ga oss muligheten til å se på forskjellene på disse modellene over et døgn.

```
# VERSION 1.0
# RECEIVER HONS
# RECEIVERID 111
# DATATYPE STEC
# DATASUBTYPE KLOB
%
% Format: GPSSec SVID IPPLongitude[degrees] IPPLatitude[degrees] elevation[degrees] STEC[TECU]
%GPS 1 = SVID 1
%GAL 1 = SVID 71
%
1225324800 71 24.800 71.012 22.463 19.10
1225324800 74 24.907 71.098 21.994 19.30
1225324800 79 25.979 71.264 22.742 19.02
1225324800 84 29.822 71.438 6.419 27.13
1225324800 91 25.756 70.818 64.992 9.94
1225324800 97 26.295 70.686 39.827 13.56
1225324800 2 26.465 70.713 37.812 14.06
1225324800 3 25.859 71.311 20.451 19.97
1225324800 6 26.510 70.913 42.460 13.01
1225324800 12 26.185 70.778 57.624 10.59
1225324800 14 25.042 70.905 29.092 16.64
1225324800 19 27.097 71.030 22.611 19.04
1225324800 22 24.825 71.735 9.750 25.24
```

Figur 13: STEC-verdier Klobuchar for 04.11.2019

Figur 13 viser oppsettet på filene vi fikk fra Kartverket. Hver rad inneholder hvilken satellitt målingene er til (SVID), IPP-kordinater (Ionospheric Pierce Point) og STEC-verdier. SVID mellom 1 og 70 er GPS-satellitter og mellom 71-101 er Galileo-satellitter. STEC-verdiene er oppgitt i TECU. Oppsettet er likt for filene med VTEC-verdier og differanser mellom Klobuchar, NeQuick-G og beregnede TEC-verdier fra tofrekvente målinger.

Kapittel 4 – Resultater

I resultatdelen vil plott med tilhørende nøkkeltall presenteres. Figurene vil bli kommentert og ulike valg som er tatt vil bli begrunnet.

Følgende forkortelser er brukt i plottene:

- NOS: Number Of Satellites
- PDOP: 3D - Dilution Of Precision

Temaene som vil bli presenterte her er:

- Statisk måling og sanne feil
- Tilgjengelige satellitter og antall observasjoner
- Kvalitetstall for hele datasettet
- Sammenlikning GPS og GPS + Galileo for starten og slutten av datasettet
- Bidrag fra Galileo i trange fjordarmer
- Bidrag fra Galileo ved rutas nordligste del
- Sammenlikning GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a
- Sammenlikning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G

I dette kapittelet vil kodeløsningen med GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a bli referert til som GPS + Galileo. Kodeløsningen som benytter seg av GPS L1/L5 refereres til som GPS.

4.1 Statisk måling og sanne feil

I denne oppgave har vi basert oss på at en fler-frekvent multi-GNSS PPP-løsning er fasit på skipets posisjon. Denne løsningen benytter seg av alle tilgjengelige satellitter og frekvenser fra RINEX-filen. Ved beregninger med PPP har lengden på observasjonstiden mye å si for kvaliteten på målingene. Ettersom vi har kontinuerlige målinger over 24 timer vil vi kunne oppnå svært høy kvalitet. Her kan vi forvente en nøyaktighet på centimeternivå både horisontalt og vertikalt. (Ovstedal et al., 2006)

Ved å bruke en av dagene fra vedlikeholdsperioden til MS Polarlys i oktober 2018 kan vi tydelig se forskjellen i nøyaktighet mellom PPP-løsningen og de tofrekvente kodemålingen med henholdsvis GPS L1/L5 og GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a.

Tabell 3: Statisk måling 24 t

	Øst (m)	Nord (m)	Ell.Høyde (m)	σ_N (m)	σ_Δ (m)	σ_H (m)
PPP	246731.9300	7058758.1436	67.2979	0.0003	0.0003	0.0009
GPS	246731.8477	7058758.7692	67.3501	0.0157	0.0127	0.0640
GPS + GALILEO	246731.8752	7058758.7277	67.2199	0.0127	0.0104	0.0513

Målingene i tabell 3 over viser etterprosessering av statisk måling over 24 timer når skipet ligger i tørrdokken til Fosen Yard AS utenfor Trondheim. Som vi kan se fra tallene er standardavviket til PPP-løsningen svært mye bedre enn løsningene fra tofrekvente-kodemålinger, men alle løsningene ser ut til å ha kunstig lave standardavvik. Sub-millimeter for PPP, og sub-desimeter for tofrekvent kodeløsning er kunstig lavt. Programvarer som TerraPos beregner ofte et standardavvik som er for lavt. Dette er blant annet grunnet korrelasjon mellom målingene som er tatt rett etter hverandre, slik som våre målinger på 1 Hz. Ved statisk måling brukes alle observasjoner, i dette tilfellet fra 24 timer, til å estimere en enkelt posisjon i 3 komponenter. Det er dette som er hovedgrunnen til at standardavvikene blir så lave. Dette blir altså ikke tatt høyde for i programmet, men det antas at både PPP og kodeløsningene sitt standardavvik har blitt påvirket omtrent i like stor grad.

Fordi PPP-løsningen har et standardavvik som er rundt 2 størrelsesordener mindre enn de tofrekvente kodeløsningene, så regnes PPP-løsningen å kunne kalles en fasit for posisjonen til skipet i denne sammenhengen. Dette er også begrunnelsen som blir brukt for å kunne kalle kodeløsningenes avvik i forhold til PPP-løsningen for sanne feil.

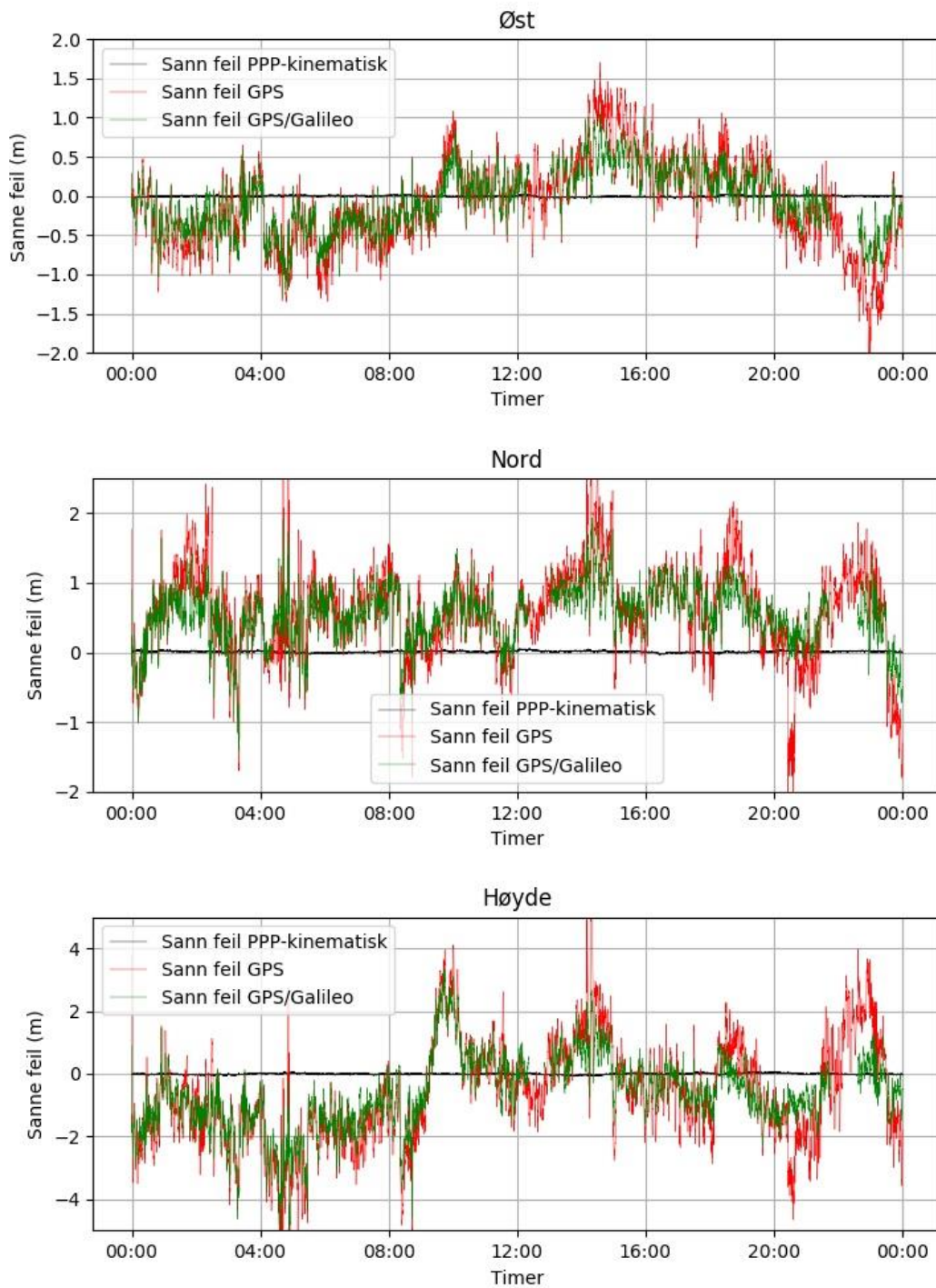
Denne statiske beregningen er et spesialtilfelle, ettersom skipet ligger stille til vedlikehold i en tørrdokk. Resten av datasettet er beregnet ved bruk av kinematiske PPP, noe som gjør at standardavviket vil være høyere enn oppgitt i tabellen. For kinematiske målinger vil standardavviket være høyere ettersom det også skal beregnes nye koordinater for hver måling.



Figur 14: Oversiktsbilde av Fosen Yard, Utklipp fra Norge i bilder (norgebilder.no).

Sanne feil er definert som den absolutte differansen mellom beregnede posisjoner med PPP-løsningen, som i denne oppgaven er definert som fasit, og beregningene er gjort ved hjelp av kun GPS eller GPS + Galileo. Ved å bruke posisjonen beregnet ved hjelp av statisk PPP-prosessering definerte vi et fasitpunkt for skipet i tørrdokken. Figur 15 viser differansene mellom dette punktet og kinematiske PPP- og kodeløsninger for dag 285 i 2018. Som vi kan se fra figuren har den kinematiske PPP-løsningen minimale differanser i forhold til kodeløsningene. Kartverket sin definisjon for sanne feil er «forskjellen fra sann verdi, fra det man antar er den sanne verdi» (Statens Kartverk, 2015) Videre står det om sann verdi: «Sann verdi vil ofte være ukjent, men den brukes i utjevningsregningen som en teoretisk størrelse. Ved kontroller blir den vanligvis erstattet med en verdi som er målt/beregnet med vesentlig høyere nøyaktighet enn den verdien som kontrolleres». (Statens Kartverk, 2015) Dette støtter opp om at vi har benyttet PPP-prosessering som fasit ved sammenligning med kodeløsningene.

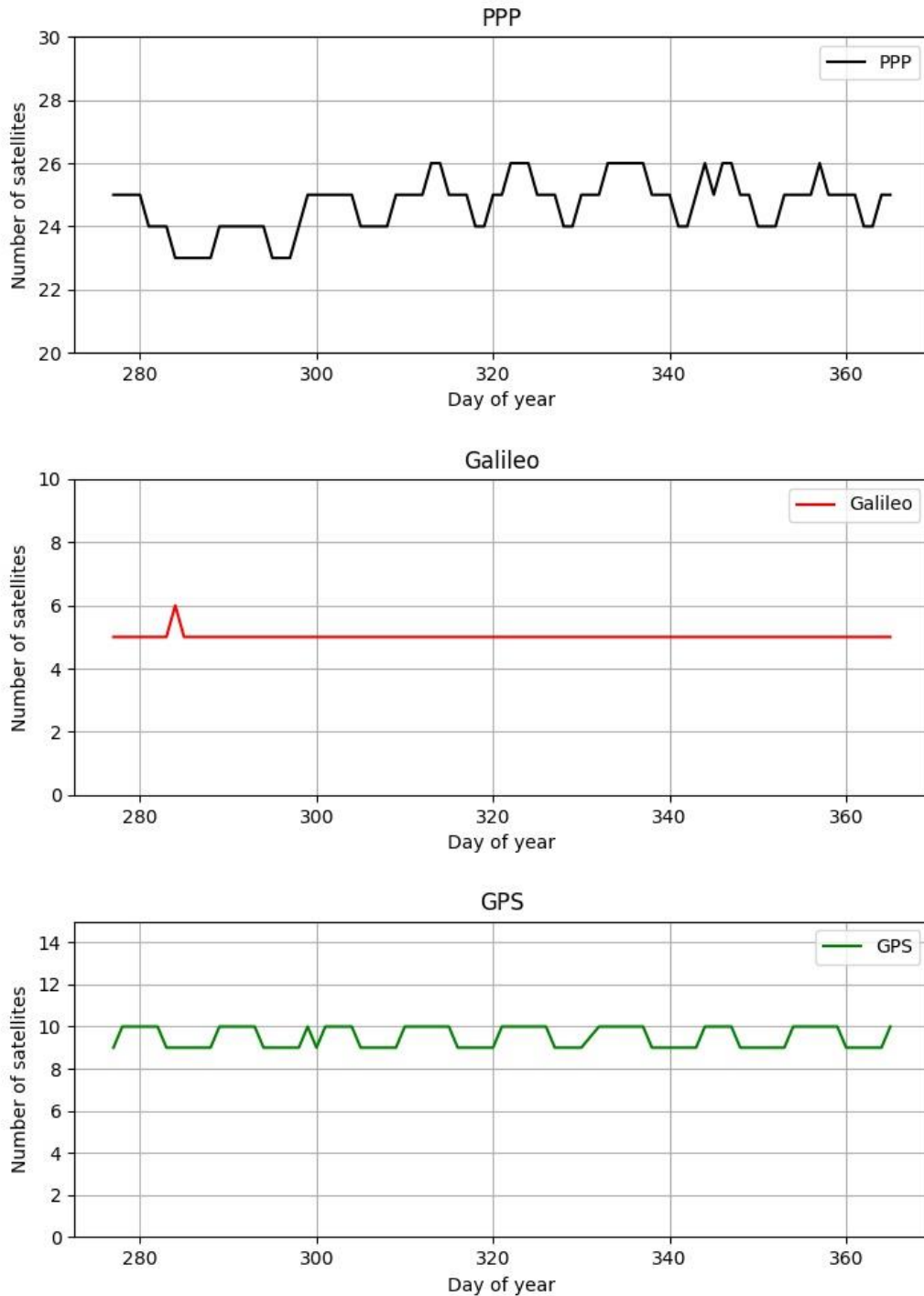
Differanser Statisk PPP-løsning og kinematisk PPP, GPS og GPS-Galileo 285



Figur 15: Differanser mellom løsning fra statisk PPP og kinematisk målinger med PPP, GPS og GPS + Galileo for DOY 285.

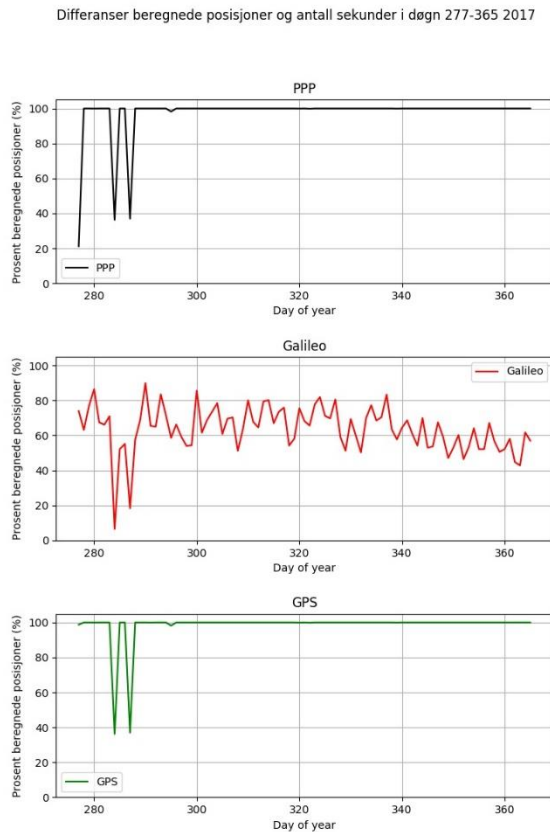
4.2 Tilgjengelige satellitter og antall observasjoner

Antall satellitter



Figur 16: Antall satellitter for PPP-løsningen, Galileo-satellitter og GPS-satellitter i 2017

Istedenfor å sammenligne en ren Galileo-løsning med en ren GPS-løsning, ble det bestemt at en GPS + Galileo-løsning skulle sammenliknes med GPS-løsningen. Dette er fordi antall tilgjengelige satellitter i Galileo-systemet ble regnet som for lavt for hele datasettet. Vi kan se fra figur 16 at det er observasjoner til dobbelt så mange satellitter fra kun GPS enn for kun Galileo. (ESA, 2019) Figur 16 viser gjennomsnittlig antall satellitter per dag for alle dagene i 2017 som datasettet dekker. Det viser et gjennomsnitt på 5 satellitter hos Galileo, mens GPS har mellom 9 og 10.



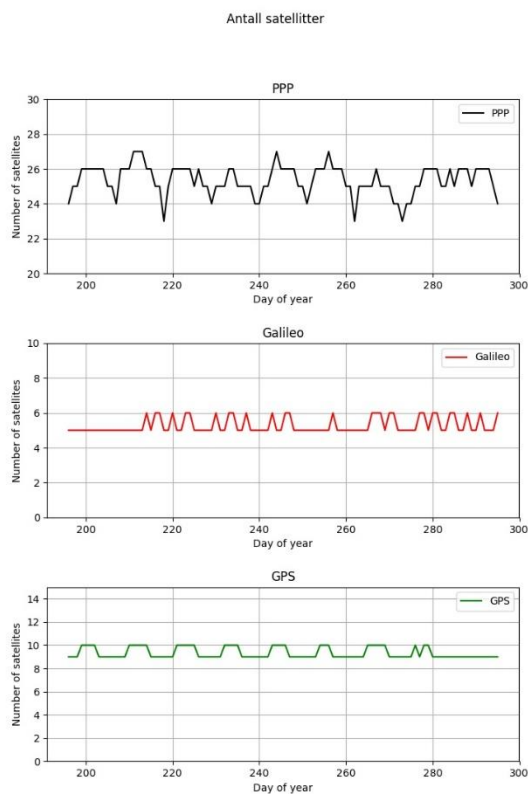
Figur 17 viser antall beregnede posisjoner hver dag som en andel av 100 %. Her ligger Galileo for det meste mellom 50 og 70 %, mens GPS har tilnærmet 100%. Minimum antall satellitter som trengs for å beregne en posisjon ved kodemåling 4 stykker, hvor de ukjente variablene er X, Y, Z og klokkefeil i mottaker. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) Når Galileo har et gjennomsnitt per dag på 5 tilgjengelige satellitter når posisjonene er blitt beregnet, så sier det seg selv at systemet er sårbart for fasebrudd og dårlig satellittdekning når måleforholdene er vanskelige.

På bakgrunn av dette ble det valgt å heller se på en Galileo-løsning etter 12.10.2018 da satellittdekningen i teorien skulle vært bedret med til sammen 4 nye satellitter. Senere i resultatkapittelet vil vi se på en dag hvor Galileo har nesten 100 % beregnede posisjoner.

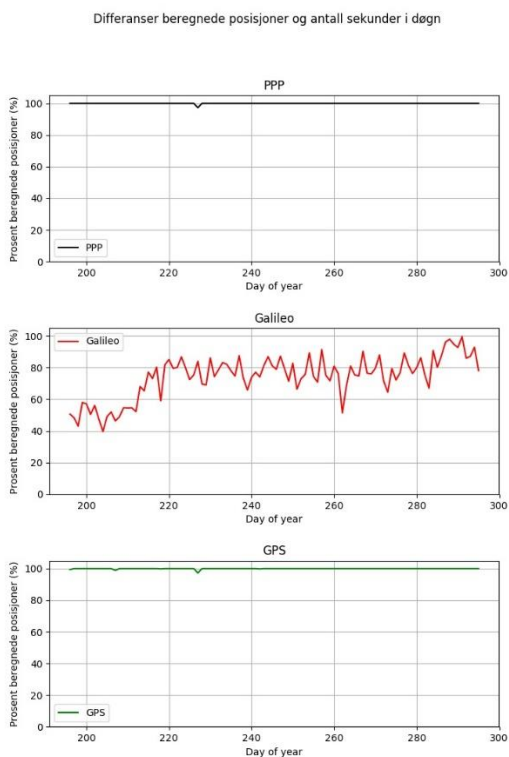
Figur 17: Antall beregnet posisjoner for de forskjellige løsningene i 2017.

Figur 18 og 19 viser henholdsvis gjennomsnittlig antall satellitter per døgn mellom DOY 195-295 for 2018, og andel beregnede posisjoner per døgn uttrykt i prosent.

Som tidligere nevnt så ble 3 nye Galileo-satellitter aktive den 02.08.2018. Dette tilsvarer DOY 214. Figur 19 viser at prosentandelen beregnede posisjoner for Galileo steg betraktelig rundt denne datoen. Fra å ligge rundt 50-70% i figur 17 til 70-90%. Figur 18 viser også at gjennomsnittlig antall satellitter per døgn også har økt litt noen dager. Dette mønsteret følger også antall satellitter for henholdsvis PPP-løsningen og GPS-satellitter. Det ble også 1 ny aktiv satellitt den 12.10.2018 (DOY 285). Grafen i figur 19 viser at det er en liten topp mot slutten. Dette kan tyde på at denne siste satellitten som forventet, også var med på å øke antall posisjoner som ble beregnet. Fra DOY 283 ligger skipet i tørrdokk, noe som gir mer homogene måleforhold med tanke på terrenget og forstyrrelser rundt skipet.



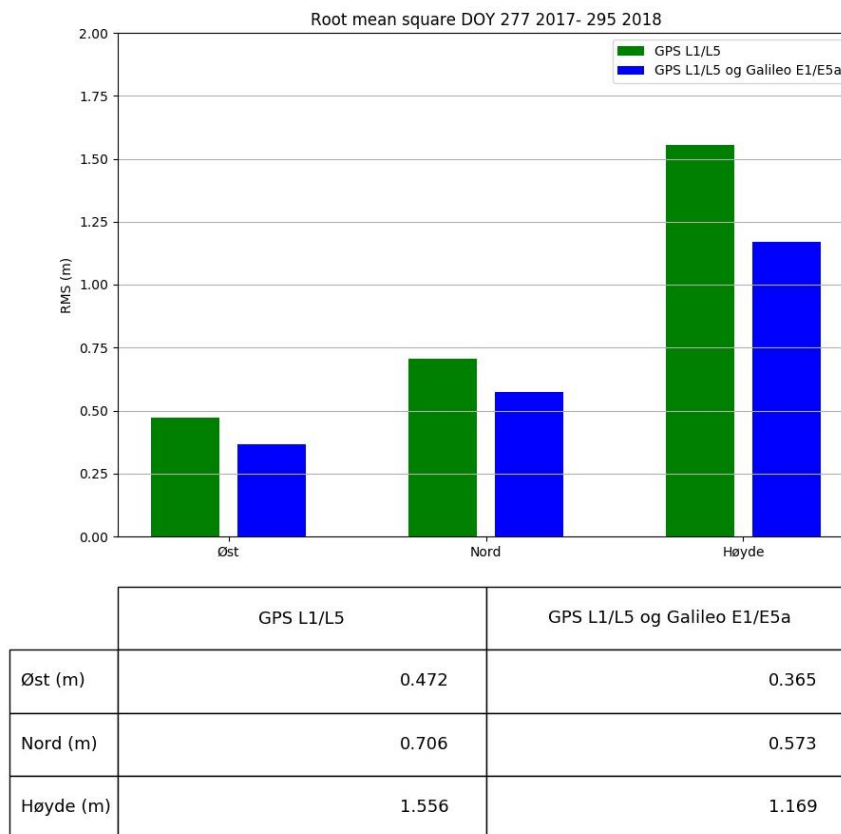
Figur 18: Antall satellitter DOY 195-295 2018



Figur 19: Prosent beregnede posisjoner DOY 195-295 2018

Det kan også nevnes at plottene som viser antall satellitter per døgn ser ut til å ha et gjentakende mønster for GPS og PPP (PPP gjenspeiler antall tilgjengelige satellitter for alle systemene). Dette ser ut til å sammenfalle med at en syklus i mønsteret tilsvarer en tur fra Bergen til Kirkenes, og tilbake. Det at mønsteret til grafene endres noen steder kan skyldes forskjellig satellittgeometri over skipet på samme sted i ruten. Ut i fra dette ser det ut som at GPS har litt bedre satellittdekning ved rutas nordligste deler da antall satellitter er 1 enhet større her. Dette kan komme av at mottakeren får kontakt med satellitter på andre siden av jorden. For Galileo sin del så er ikke det samme mønsteret tilstede før mot slutten av datasettet, hvor flere satellitter er blitt skutt opp.

4.3 Kvalitetstall for hele datasettet

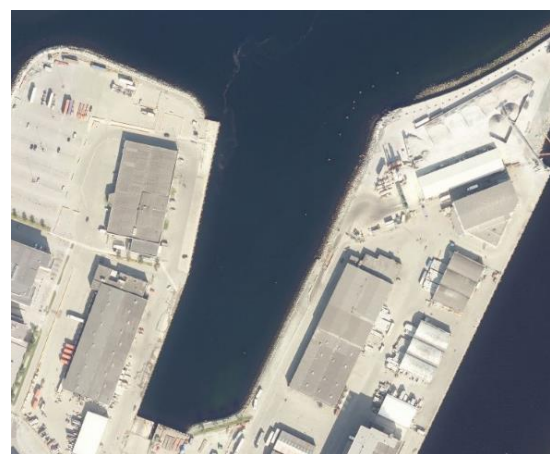


Figur 20: RMS Ø, N, H for hele datasettet. GPS + Galileo og GPS.

Figur 20 viser den samlede RMS-verdien for hele datasettet uttrykt gjennom en GPS + Galileo-kodeløsning, og en ren GPS-kodeløsning. Hensikten med dette er å få et inntrykk av begge løsningenes helhetlige ytelse delt inn i øst-, nord- og høydekomponenter. RMS-verdiene i figur 20 inneholder alle målinger i datasettet, og er derfor også beheftet med feilkilder som også inkluderer multipath fra bygninger (når skipet har vært i havn) og generelt dårlige måleforhold. Påvirkningen på ytelsen på grunn av de nye Galileo-satellittene som blir aktive i løpet av datasettets varighet, kommer da ikke fullstendig klart frem gjennom denne typen resultatvisualisering, da alt blir «smurt» sammen. Men det gir en god pekepinn hvordan inkludering av Galileo påvirker posisjonsnøyaktigheten.

Plottet ovenfor viser en samlet RMS-verdi på 0.47 meter i øst, 0.71 meter i nord og 1.6 meter i høydekomponent for den rene GPS-løsningen. GPS + Galileo-løsningen viser derimot 0.37 meter, 0.57 meter og 1.2 meter for det samme. Dette tyder på at de ekstra tilgjengelige satellittene fra Galileo bidrar til lavere RMS-verdier for posisjonene som er beregnet fra datasettet.

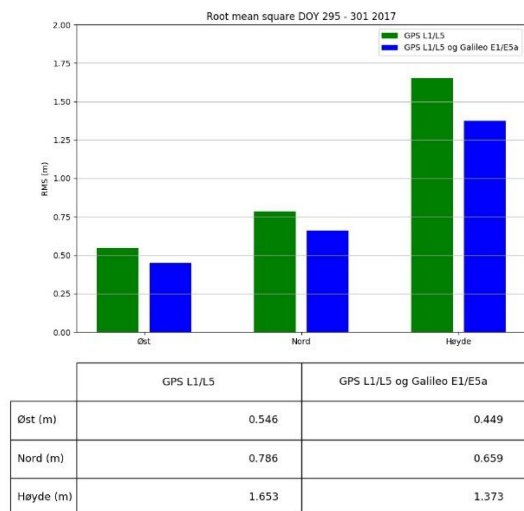
Figur 21 er et satellittbilde fra havneområdet i Trondheim hvor feilkilder knyttet til multipath kan påvirke RMS-verdiene. Flere av havnene har mye høye bygninger i nærheten, i tillegg til mye glassflater. Dette kan påvirke nøyaktigheten ettersom skipet legger til havn flere ganger per døgn.



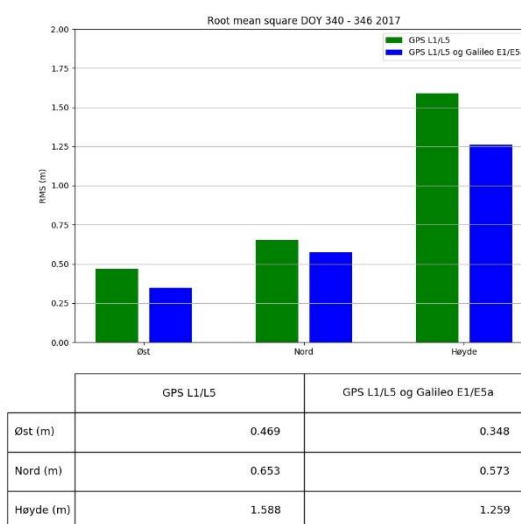
Figur 21: Hurtigrutens anløp i Trondheim havn. Fra norgebilder.no

4.4 Sammenlikning GPS og GPS + Galileo

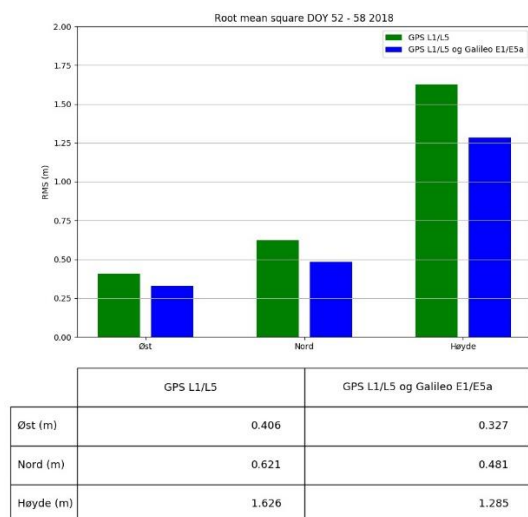
Figur 22 til 27 viser en sammenlikning av RMS for øst, nord og høyde for omtrent en uke fordelt mellom starten og slutten av datasettet. Formålet er å få et inntrykk av ytelsesforskjellene mellom GPS + Galileo-løsningen, og for GPS-løsningen fra starten til slutten av datasettet, og se på hvordan de nye satellittene i Galileo-konstellasjonen påvirker ytelsen.



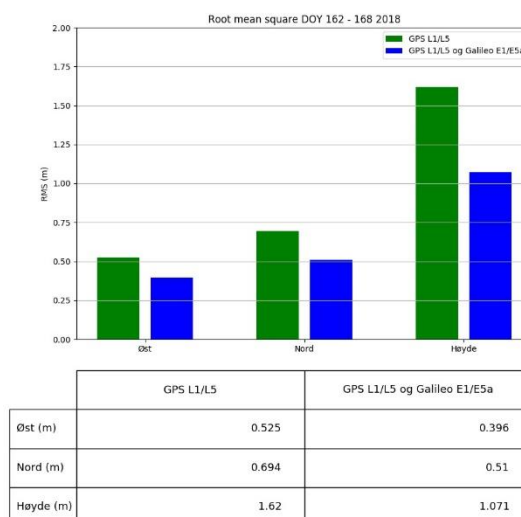
Figur 22: DOY 295-301 i 2017



Figur 23: DOY 340-346 i 2017

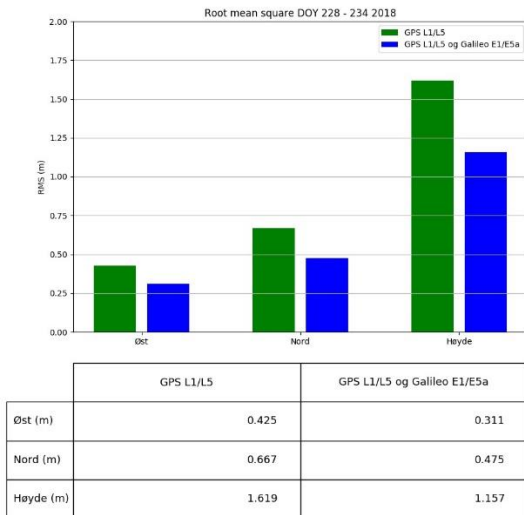


Figur 24: DOY 52-58 i 2018

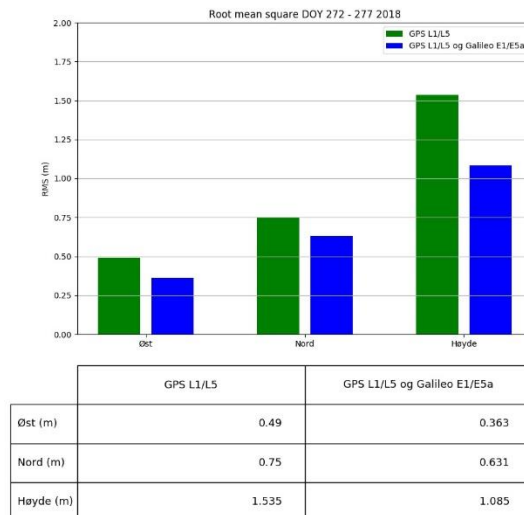


Figur 25: DOY 162-168 i 2018

Felles for disse figurene er at skipet har gått ruten nordover, fra Bergen til Kirkenes. Det er tydelig at kodeløsningen med kombinert GPS + Galileo har generelt lavere RMS-verdi for alle ukene. Det er variasjoner i RMS-verdiene for begge løsningene i løpet av alle figurene gjennom datasettet. Selv om det er variasjoner, er det uansett tydelig at løsningen med GPS + Galileo har en signifikant bedre RMS-verdi enn GPS-løsningen.



Figur 26: DOY 228-234 i 2018

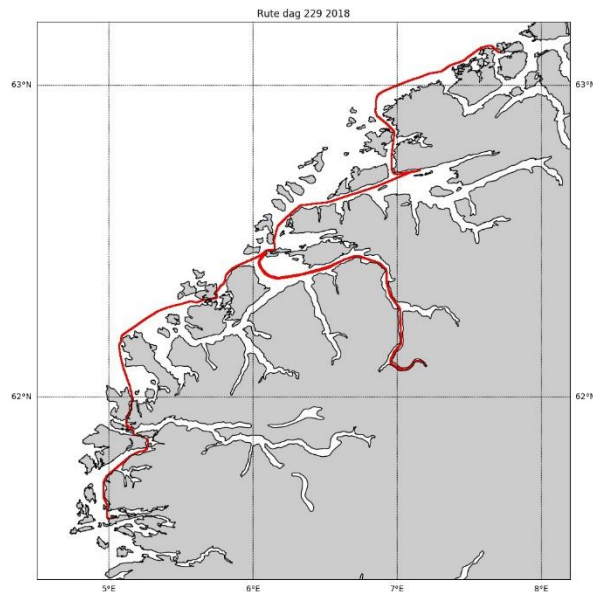


Figur 27: DOY 272-277 i 2018

Mellom figur 24 og 25 har en GPS-satellitt blitt tatt ut av konstellasjonen. Mellom figur 25 og 26 har det blitt aktivert 3 nye Galileo-satellitter. For østkomponenten har RMS-verdien blitt redusert fra 0.40 meter til 0.32 meter for GPS + Galileo-løsningen. Men dette har også skjedd for GPS-løsningen, hvor østkomponenten har blitt redusert fra 0.53 meter til 0.44 meter. For nordkomponenten har det vært en reduksjon fra 0.51 meter til 0.47 meter for GPS + Galileo. For GPS har RMS-verdien for det samme blitt redusert fra 0.69 meter til 0.65 meter. For høydekomponenten har begge økt noe. Dette kan tyde på at det har vært dårligere måleforhold for uken mellom DOY 228 og 233 i 2018. Mellom figur 22 og 27 kan vi se at løsningen med GPS + Galileo har blitt generelt bedre, noe som er tydelig på høydekomponenten.

4.5 Bidrag fra Galileo i trange fjordarmer

Norge er et land som langs kysten er preget av fjorder og høye fjell. Det er derfor interessant å se hvordan Galileo kan bidra til å styrke GNSS-ytelsen. I disse områdene blir ofte elevasjonsvinklene høye, noe som fører til begrenset satellittdekning. Ekstra tilgang til satellitter fra Galileo konstellasjonen forventes da å forbedre posisjonen. Ruten til skipet er vist i figur 28. Dette er et parti hvor det er høye fjell og smale fjordarmer. Figur 29 viser et av skipene til Hurtigruten på vei ut av Geirangerfjorden, noe som gir et innblikk i hvor dårlige måleforhold det er.



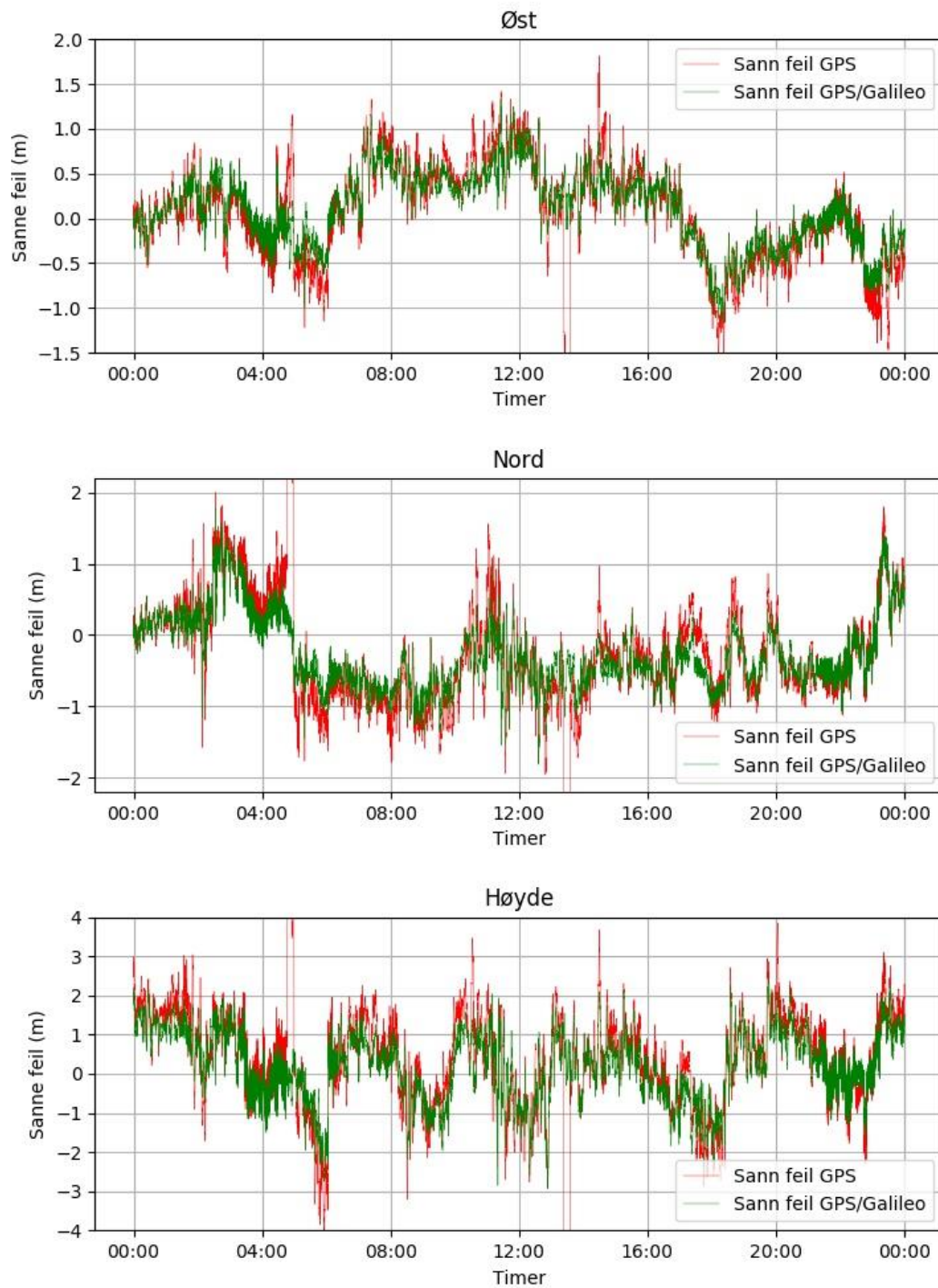
Figur 28: Ruten til skipet inn i Geirangerfjorden DOY229

Figur 30 og 31 viser differanser mellom GPS, GPS + Galileo og PPP ved DOY 163 og DOY 229 i 2018 hvor MS Polarlys har kjørt langs kysten ved Sunnmøre og inn i Storfjorden og Geirangerfjorden. Differansene er delt inn i øst-, nord- og høydekomponenter. Mellom DOY 163 og DOY 229 er det blitt aktivert 3 Galileo-satellitter, noe som i teorien skal gi bedre posisjonsnøyaktighet. Ettersom begge dagene er i sommersesongen kan det antas at måleforholdene er forholdsvis like.



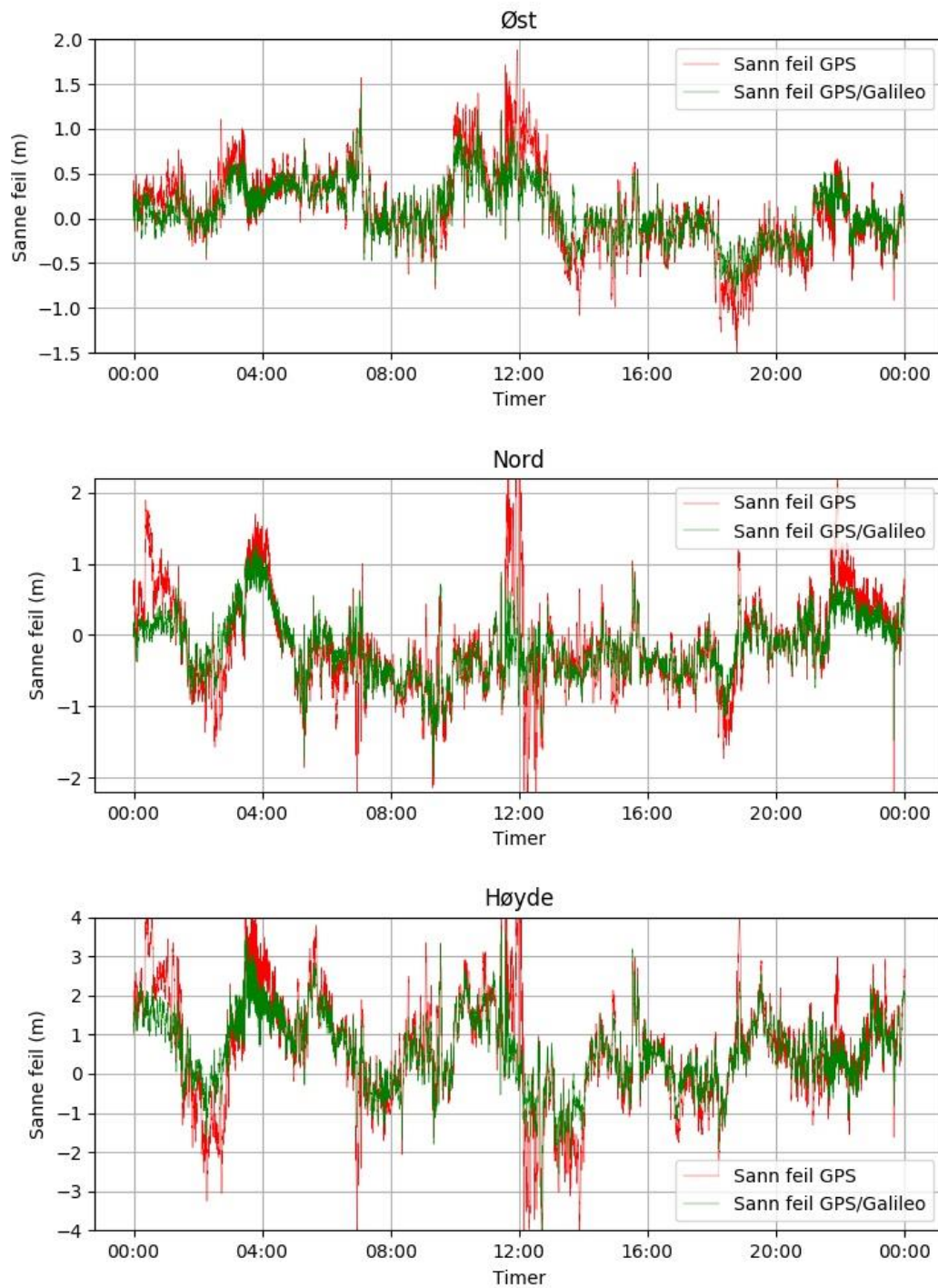
Figur 29: Geirangerfjorden. Hentet fra (Hurtigruten, 2019)

Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP-GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a 163



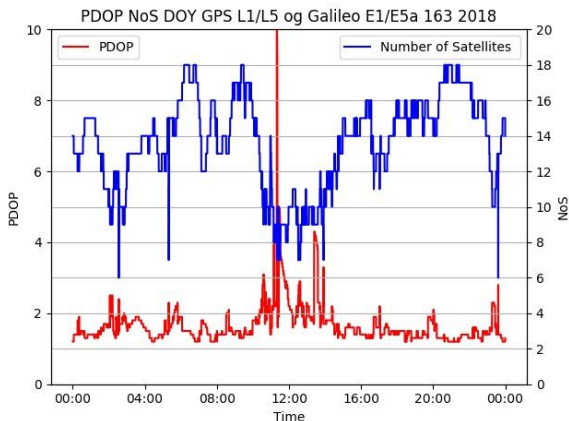
Figur 30: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 163 2018

Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP-GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a 229

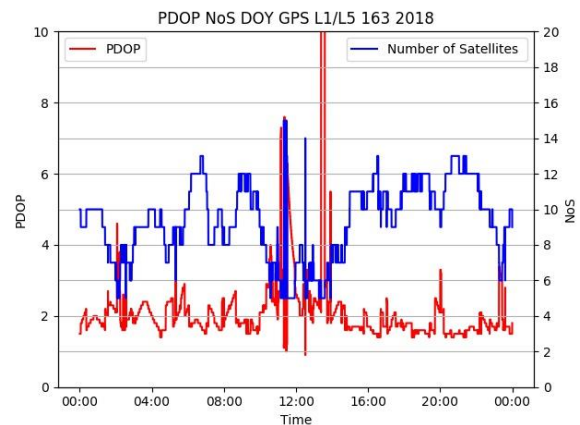


Figur 31: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 229 2018

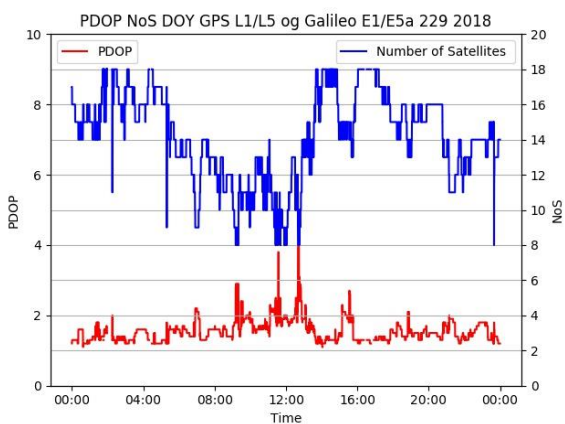
Som grafene i figurene 30 og 31 viser, er differansene for den kombinerte GPS + Galileo-løsningen jevnt over lavere enn for GPS. Dette er svært tydelig i grafen fra DOY 229, ettersom det her er 3 ekstra satellitter som kan bidra fra Galileo. Det kan observeres at enkelte steder langs grafen faller differansene utenfor plottets grenser for GPS-løsningen, mens den kombinerte løsningen ikke gjør det. Dette viser at satellittgeometrien er dårligere, som igjen gir dårligere posisjonsbestemmelse. Dette gjelder spesielt rundt klokken 12:00 for figur 30 og 31 hvor båten er på vei inn, og inne i Geirangerfjorden. Vi kan se at løsningen med GPS + Galileo generelt følger differansene til GPS-løsningen, men for DOY 229 kan vi se at differansene varierer mindre i forhold til GPS-løsningen.



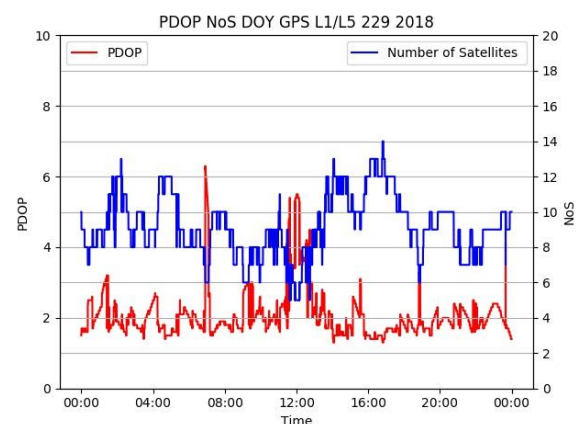
Figur 32: PDOP og NOS DOY 163 GPS + Galileo



Figur 33: PDOP og NOS DOY 163 GPS



Figur 34: PDOP og NOS DOY 229 GPS + Galileo



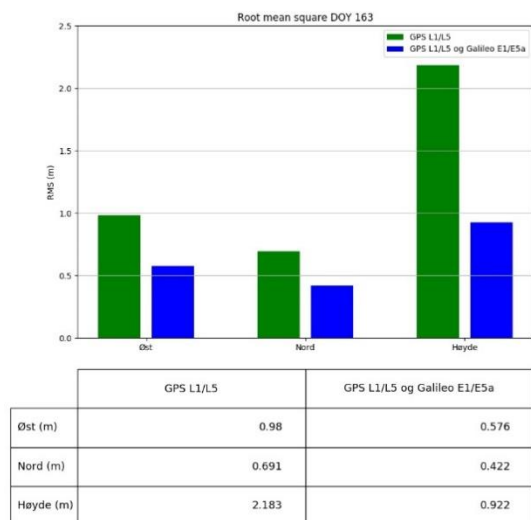
Figur 35: PDOP og NOS DOY 229 GPS

Figurene over viser tilhørende NOS- og PDOP-plott for DOY 163 og 229 for GPS-løsning og GPS + Galileo-løsningen. Ved sammenlikning observeres det at den kombinerte løsningen har tilgang på flere satellitter, og derfor også har lavere PDOP-verdi på grunn av mer gunstig satellittgeometri. Ved inkludering av Galileo har løsningen i dette tilfellet jevnt over tilgang på omtrent 2 flere satellitter for DOY 163, og 2-3 satellitter for DOY 229.

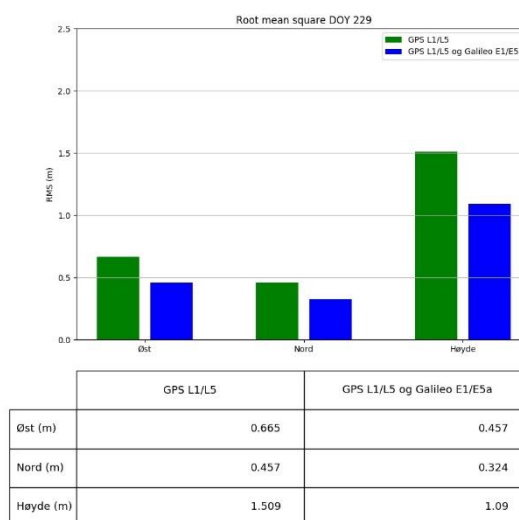
Når det totale antallet satellitter er såpass lavt som figurene 33 og 35 viser, så vil disse ekstra satellittene sannsynligvis bidra sterkt til at de sanne feilene i figurene 30 og 31 er lavere for den kombinerte løsningen. Siden DOY 163 er før de 3 nye Galileo-satellittene ble aktive, så kan det forventes at resultatene for løsningen med GPS + Galileo for DOY 229 er bedre. Ved at det har blitt aktivert flere satellitter kan vi se at PDOP-verdien ikke har de samme toppene som DOY163. Dette gjelder også for GPS-løsningen for DOY 229 i figur 35, men denne har fortsatt noen steder hvor PDOP-verdien er over 5.

Kapittel 4 – Resultater

Vi kan også se tydelig på figurene 32 til 35 hvor båten har kjørt inn i det smaleste fjordpartiet. Her går PDOP-verdiene for GPS-løsningen over 10, mens den kombinerte løsningen har lavere PDOP-verdier i dette området. Dette er mer tydelig for DOY 163, hvor satellittgeometrien faller ut for begge løsningene. Når PDOP-verdien blir såpass høy som for GPS-løsningen tyder dette på at det ikke er nok tilgjengelige satellitter til at posisjonen kan beregnes. GPS og Galileo er også systemer som har ganske lav inklinasjonsvinkel, og når elevasjonsvinklene er såpass store som i norske fjorder, så blir sikten til satellittene ekstra dårlig. Begge løsningene over gir bedre PDOP-verdier for DOY 229, særlig når skipet er på vei inn i fjorden.

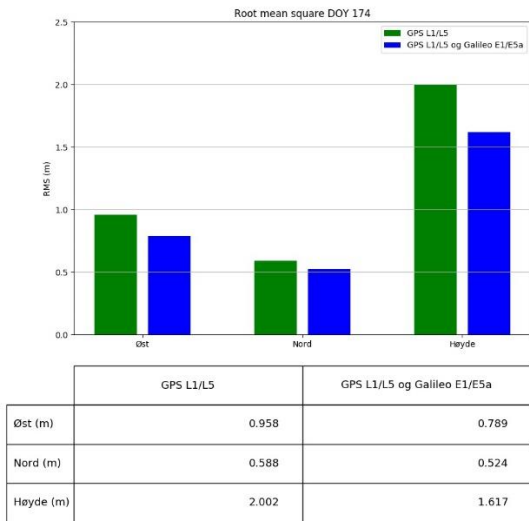


Figur 36: RMS-verdier DOY 163

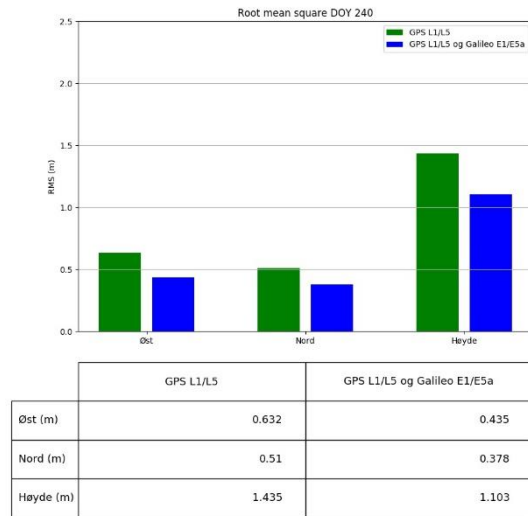


Figur 37: RMS-verdier DOY 229

Fra figur 36 og 37 kan vi se RMS-verdiene for de respektive dagene. Legg merke til at y-aksen har blitt endret fra tidligere RMS-plott, dette er grunnet RMS-verdien til høydekomponenten for DOY 163. Resultatene her viser at GPS + Galileo-løsningen har lavere RMS-verdi enn GPS-løsningen. En ting som er interessant å påpeke er forskjellen mellom stolpene for GPS hos DOY 163 og DOY 229. Nord og øst er rundt 0.30 meter lavere ved DOY 229, mens forskjellen i høydekomponenten er hele 0.70 meter. En forklaring på dette kan være at satellittgeometrien er forskjellig for dagene. I et åpent område ville det ikke hatt så mye å si, da sikten til satellitter er god hele tiden. I trange fjorder derimot så vil dette påvirke resultatene, selv for måling over et døgn.



Figur 38: RMS-verdier DOY 174



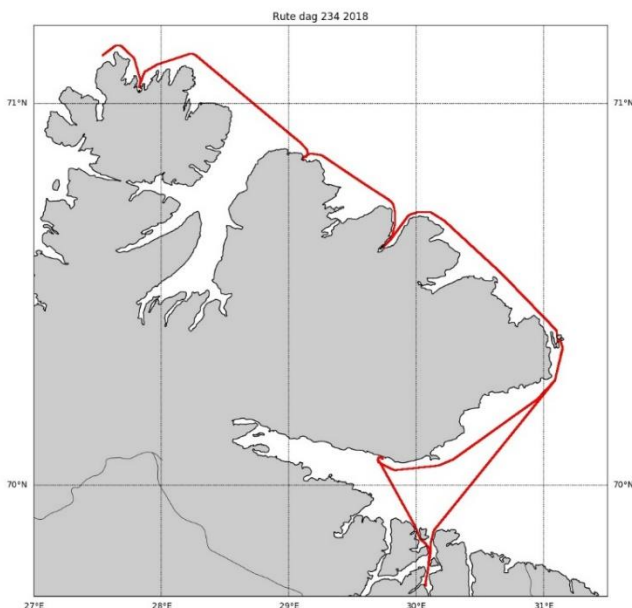
Figur 39: RMS-verdier DOY 240

For å bekrefte dette så tok vi med et døgn 11 dager etter DOY 163 og DOY 229. Dette er DOY 174 og DOY 240 i figur 38 og 39. Disse viser relativt like verdier, spesielt for DOY 229 og DOY 240. RMS-verdiene til GPS + Galileo-løsningen har ikke like store variasjoner, hvor øst- og nordkomponenten reduseres med omtrent 0.1 meter. Høydekomponenten blir derimot 0.17 meter høyere.

4.6 Bidrag fra Galileo ved rutens nordligste del

Figur 40 viser den nordligste delen av ruten til MS Polarlys, langs kysten mellom Mehamn og Kirkenes. Denne delen er et egnet eksempel på å vise hvordan Galileo påvirker GNSS- ytelsen ved de nordligste delene av fastlands-Norge. Her har vi igjen brukt en kombinert løsning med GPS og Galileo for å vise bidraget til Galileo. Måleforholdene for denne delen av ruten er gode, med få høye fjell i nærheten.

Figurene 41 og 42 viser differansene mellom PPP-løsningen og GPS- og GPS + Galileo-løsningene for DOY 168 og DOY 233 i 2018. Som vi tidligere har sett er det mindre variasjon i differansene til GPS + Galileo-løsningen. Fra disse figurene kan vi se at det er flere steder i løpet av døgnet hvor de sanne feilene til GPS-løsningen er signifikant større enn GPS + Galileo.



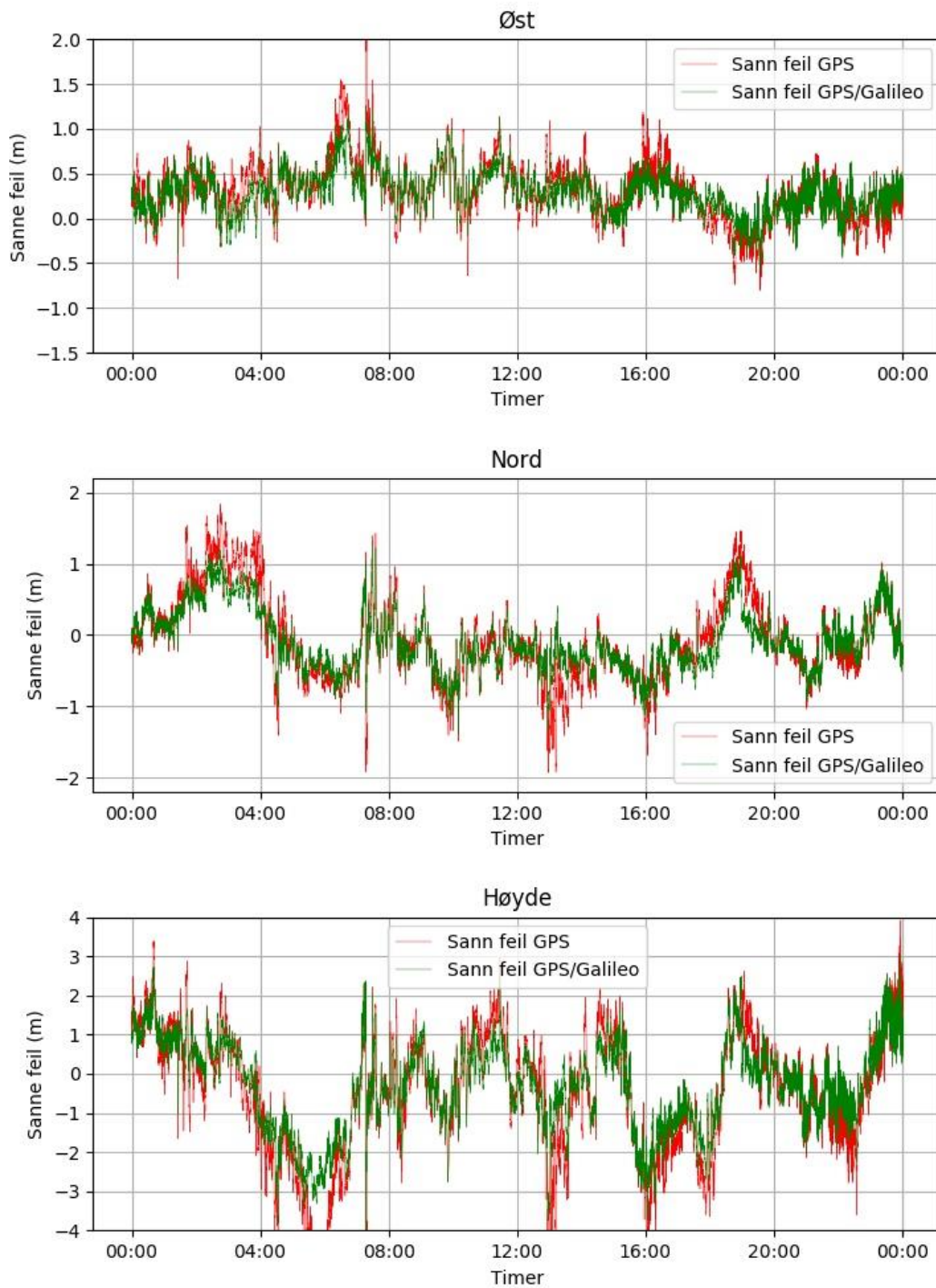
Figur 40: Ruten til skipet for DOY 234

Differansene for kodeløsningen basert på tofrekvent GPS + Galileo har avvik fra PPP-løsningen som i hovedsak ligger i området ± 1.0 meter i øst- og nord-komponent, mens høyde-komponentens feil ligger rundt ± 3.0 meter. For den rene GPS-løsningen er grunnriss-komponentene litt dårligere, dvs. rundt ± 1.5 meter, mens høyden ligger omtrent rundt ± 3.5 meter.

At høydens avvik er såpass stort i forhold til grunnriss hos begge løsningene skyldes sannsynligvis at GPS og Galileo har baneplan med inklinasjonsvinkel på henholdsvis 55° og 56° . Dette er ikke særlig gunstig for høydebestemmelse i nordområdene. Elevasjonsvinklene blir lave, noe som også fører til lengre reisevei for signalet gjennom atmosfæren, og derfor også større påvirkning fra ionosfære og troposfære. Geometrien til satellittene for høydebestemmelse blir også dårligere. PPP-løsningen inneholder også observasjoner fra GLONASS-satellitter, hvor inklinasjonsvinkelen til banene er 64.8° . Ved å kun se på inklinasjonsvinkelen vil GLONASS i teorien gi bedre ytelse i nordområdene.

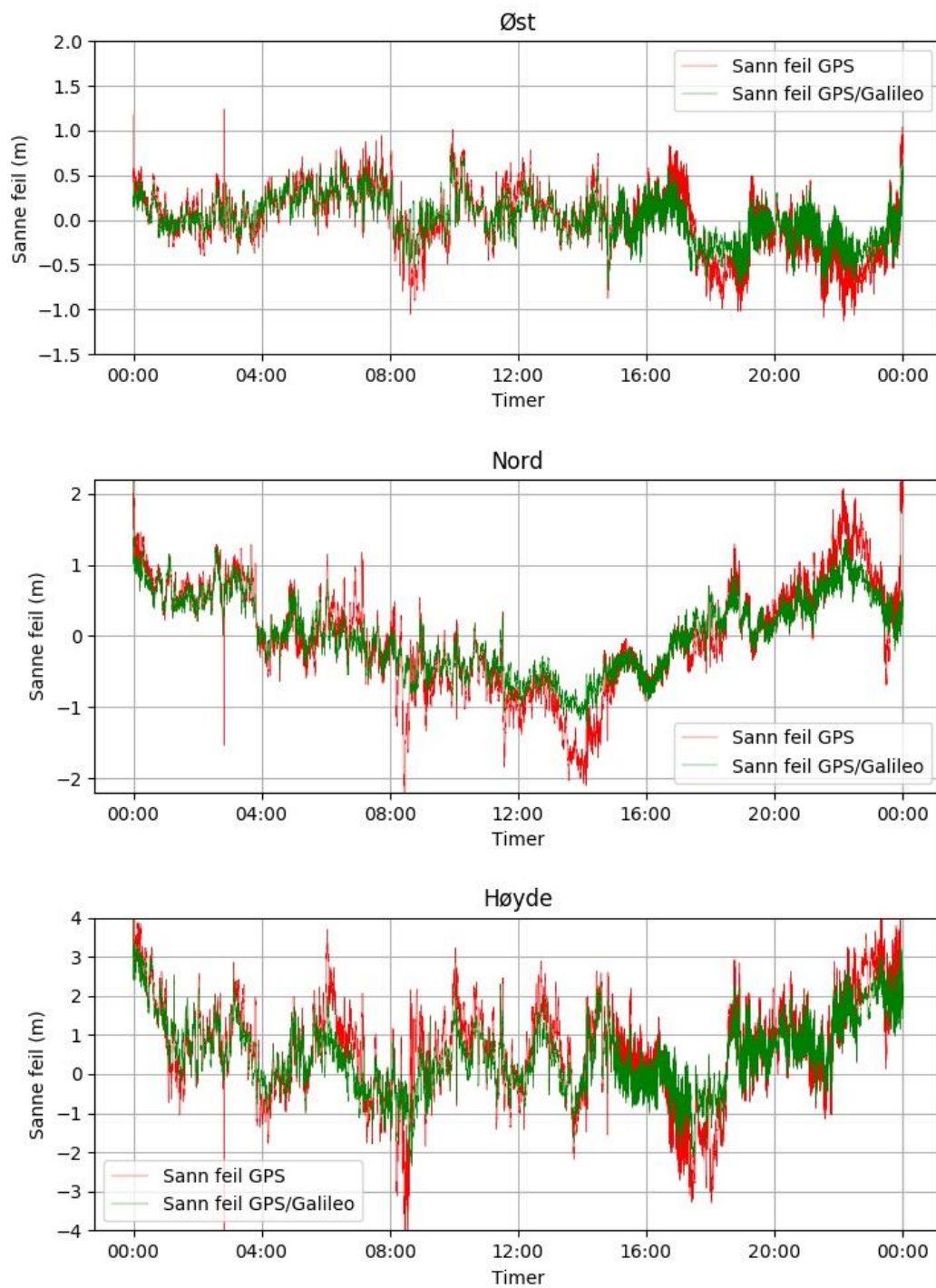
GPS + Galileo-løsningen gir uansett lavere differanser enn løsningen med kun GPS, så Galileo gir et positivt bidrag til posisjonsnøyaktigheten i nord i disse tilfellene.

Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP-GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a 168



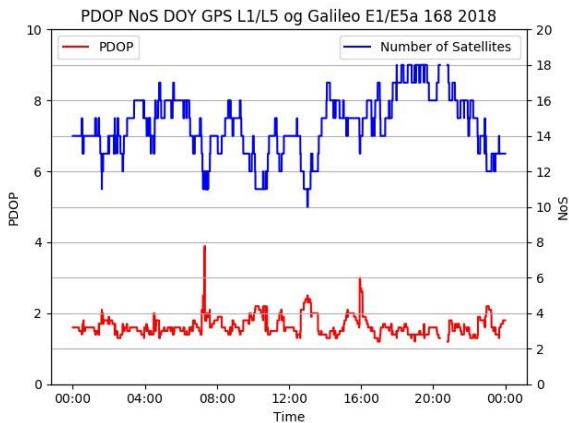
Figur 41: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 168 2018

Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP-GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a 234

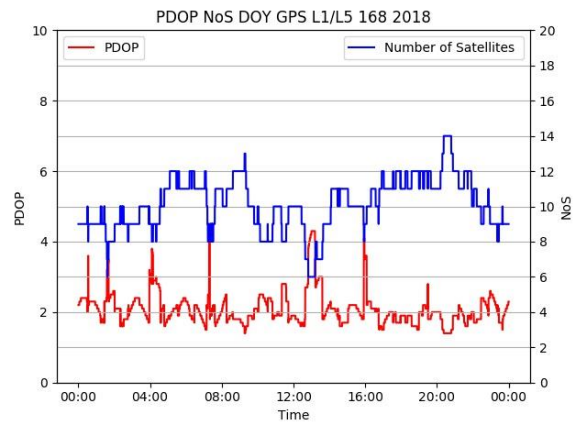


Figur 42: Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP – GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a DOY 229 2018

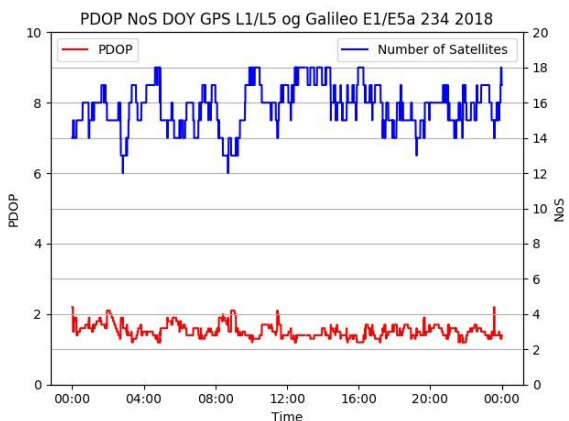
Figur 43 og 45 viser PDOP og NOS for GPS + Galileo-løsningene. Ved første øyekast er det tydelig at det er flere satellitter tilgjengelig for DOY 234, noe som samsvarer med at det har blitt aktivert 3 nye satellitter. Dette gjør også at PDOP-verdien blir bedre for denne dagen. For DOY 168 sin GPS + Galileo-løsning er det noen topper hvor PDOP-verdien stiger. Dette kan være grunnet mangel på satellitter eller dårligere satellittgeometri. Fra figur 43 og 45 kan det tyde på at antallet satellitter er jevnere i løpet av døgnet, men dette kan også være grunnet annen satellittgeometri over skipet for de forskjellige dagene.



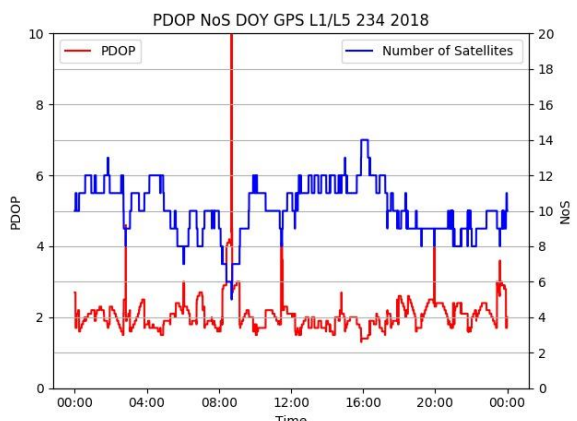
Figur 43: PDOP og NOS DOY 168 GPS + Galileo



Figur 44: PDOP og NOS DOY 168 GPS



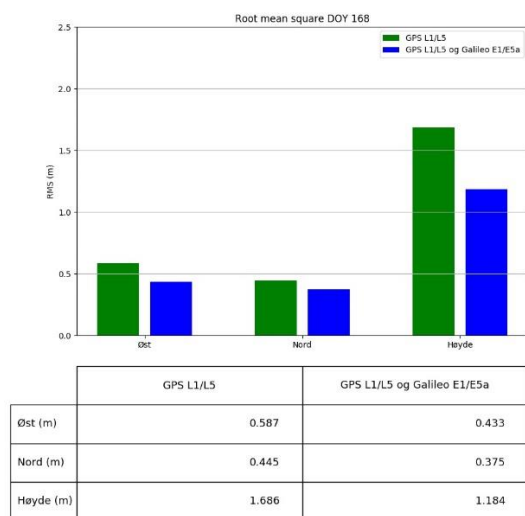
Figur 45: PDOP og NOS DOY 234 GPS + Galileo



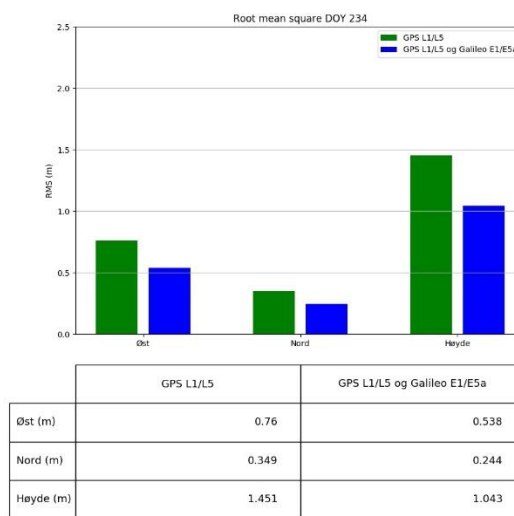
Figur 46: PDOP og NOS DOY 234 GPS

Figur 44 og 46 viser PDOP og NOS for GPS-løsningen. Ettersom det ikke er noe som er endret i satellittkonstellasjonen er det som forventet ikke noe stor forskjell her. PDOP-verdien er noe høyere enn GPS + Galileo-løsningen med noen steder hvor den får små topper. For DOY 234 passerer PDOP-verdien over 10 ved et tilfelle, noe som tyder på at posisjonsbestemmelsen har falt helt ut.

Når skipet er lengst nord på ruten vil også satellitter på andre siden av polområdene kunne bli plukket opp. Dette kan gjøre at variasjonene i antall satellitter varierer for de forskjellige dagene. Her vil de 3 Galileo-satellittene som er blitt aktivert mellom disse dagene også kunne bidra.



Figur 47: RMS-verdier DOY 168

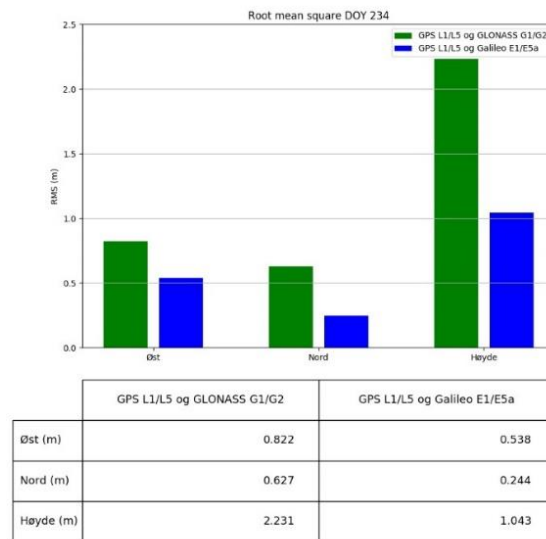


Figur 48: RMS-verdier DOY 234

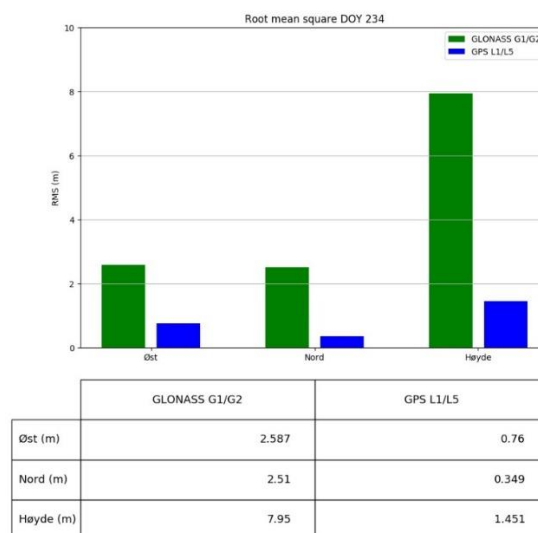
Figur 47 og 48 viser RMS-verdier for DOY 168 og DOY 234. For begge løsningene har nord- og høydekomponenten fått lavere RMS, men østkomponenten har økt for begge. For GPS + Galileo-løsningen har østkomponenten økt med 0.11 meter, mens for GPS-løsningen har denne økt med 0.17 meter. Nordkomponenten har blitt redusert med henholdsvis 0.13 meter og 0.10 meter. Høydekomponenten har blitt redusert mest for GPS-løsningen, 0.24 meter. GPS + Galileo-løsningen har blitt redusert med 0.14 meter.

Vi kan her se det samme som i avsnittet tidligere, at GPS-løsningen også har fått en lavere RMS-verdi. Dette kan være på grunn av at satellittgeometrien ikke er lik i løpet av de forskjellige døgnene.

Som tidligere nevnt har GLONASS en inklinasjonsvinkel som i teorien vil gi bedre satellittdekning lengre nord enn GPS og Galileo. Bedre satellittdekning vil da i teorien også gi en bedre posisjonsnøyaktighet i nordlige områder. Figur 49 og 50 viser RMS-verdier for løsninger med henholdsvis kun GLONASS og GPS, og kombinerte løsninger med GPS + GLONASS og GPS + Galileo.



Figur 49: RMS-verdier for kombinerte løsninger med GPS L1/L5 + GLONASS G1/G2 og GPS L1/L5 + Galileo E1/E5a



Figur 50: RMS-verdier for GLONASS G1/G2 og GPS L1/L5

Fra figur 49 og 50 kan vi se at GLONASS ikke gir bedre RMS-verdier for DOY 234. Legg spesielt merke til at y-aksen for figur 50 er økt betraktelig for å få med høydekomponenten til GLONASS. I figur 49 kan det tyde på at ved å innføre GLONASS-observasjoner sammen med GPS gir dårligere RMS-verdier. De høye RMS-verdiene for GLONASS-observasjonene skyldes sannsynligvis mindre nøyaktige klokkeprodukter og færre satellitter i bane.

For en bruker vil dette bety at en kombinert løsning med GPS + Galileo vil kunne gi bedre resultater enn GPS + GLONASS.

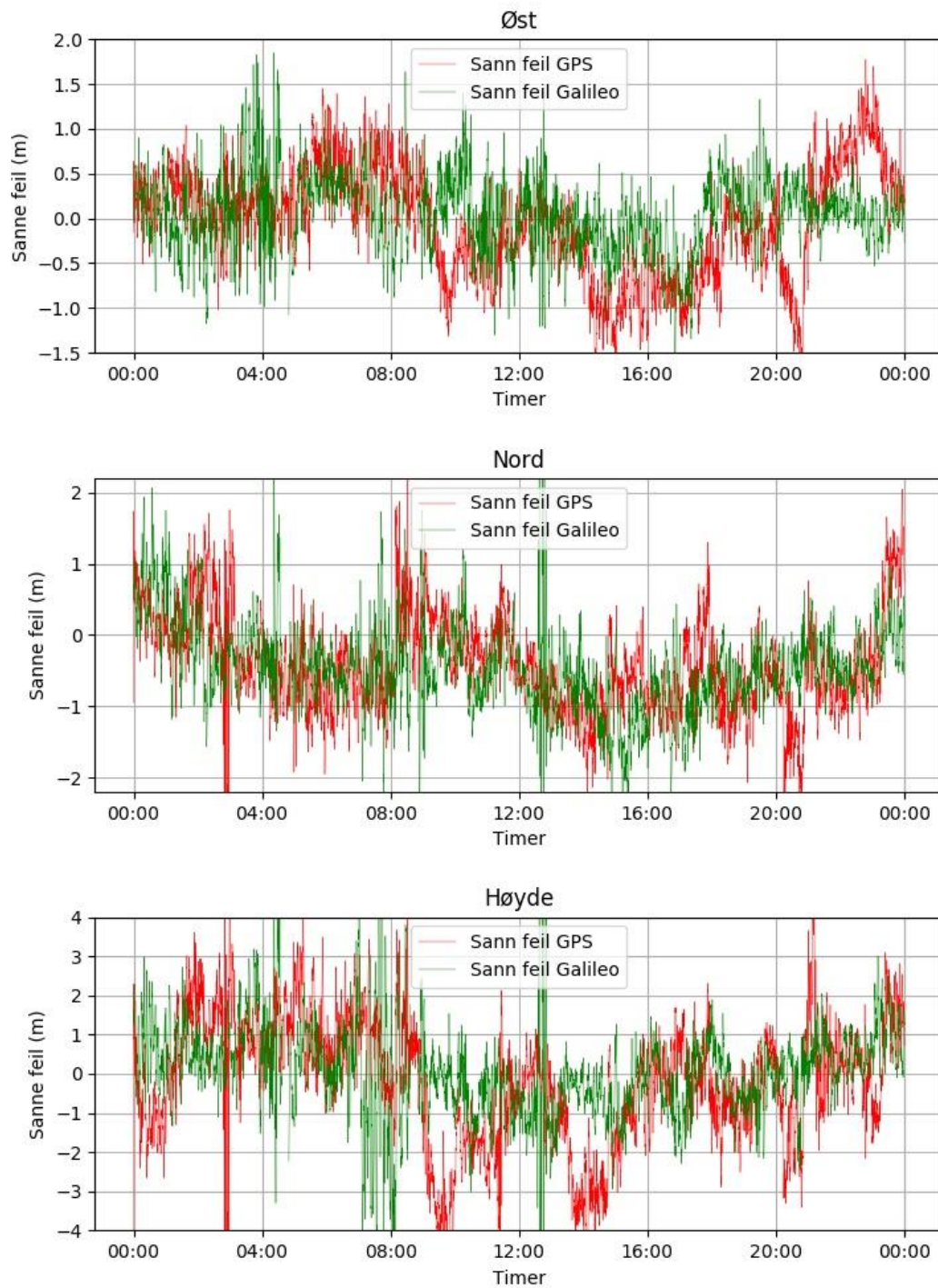
4.7 Sammenlikning GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a

Ettersom Galileo ikke har full konstellasjon med satellitter har det ikke bli lagt vekt på å analysere noen ren løsning med dette, men som et tillegg har det blitt analysert én dag i slutten av datasettet som Galileo-løsning.

DOY 288 fra 2018 er den dagen med flest beregnede posisjoner, der det kun mangler 33 minutter av døgnet. Det er denne dagen som er valgt analysert som Galileo E1/E5a. Ellers i datasettet kan så mye som opptil 12 timer av dagen mangle når det prosesseres ren Galileo-løsning. DOY 288 er en av dagene hvor skipet ligger i tørrdokk, noe som gjør at det i teorien ikke er noe bevegelse i skipet. Det at området rundt verftet er preget av relativt åpent landskap, og antennens høye plassering på skipet (som vist i innledningen i avsnittet 1.5) gjør at måleforholdene er svært gode. Ruten kjennetegnes som tidligere nevnt av heterogene måleforhold, og derfor vil feilkilder som henger sammen med omkringliggende topografi og landskap smøres inn i RMS-verdiene. Derfor gir dataene fra tørrdokken noe som er i nærheten av sammenhengende målinger gjort under gode måleforhold.

Figur 51 viser de sanne avvikene mellom PPP-løsningen og henholdsvis GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a. RMS-verdier i øst, nord og høyde for disse vises i figur 54. Figur 52 og 53 presenterer NOS og PDOP for løsningene, og sammenhengen mellom disse størrelsene.

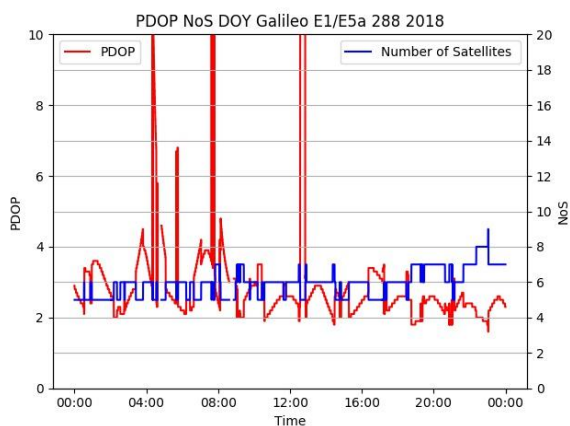
Differanser PPP-GPS L1/L5 og PPP-Galileo E1/E5a 288



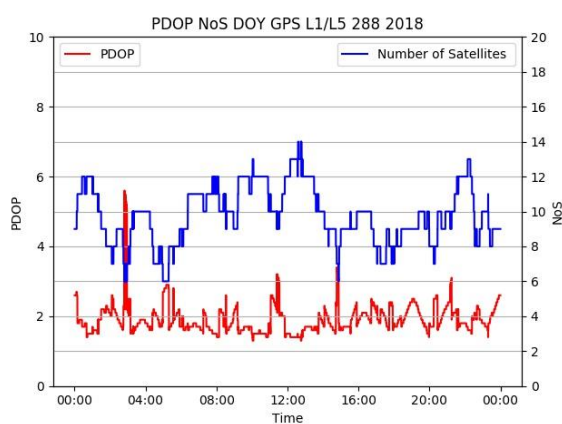
Figur 51: Differanser mellom GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a for DOY 288 i 2018.

Kapittel 4 – Resultater

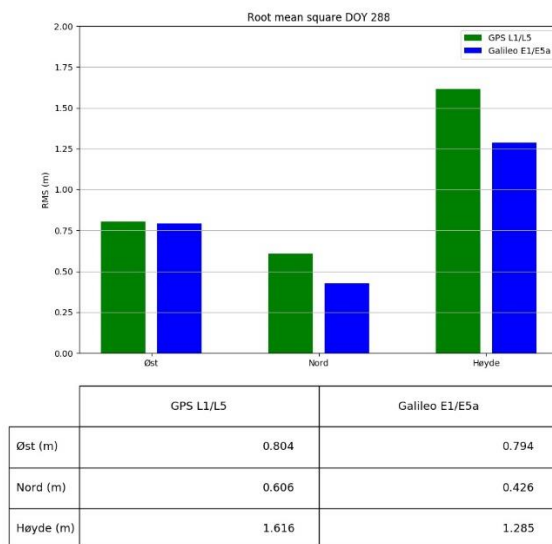
Fra figur 51, som viser differanser for løsningene sammenliknet med PPP, så kan det se ut som GPS har en litt jevnere graf, mens Galileo har flere større avvik. Dette kan raskt knyttes opp mot plottet som viser NOS og PDOP. Tidspunktene med store avvik korrelerer med tidspunktene hvor satellittgeometrien er spesielt ugunstig. Der hvor avvikene er veldig store har ikke TerraPos klart å beregne skipets posisjon. Eksempler på dette er tiden rundt 04:00, 08:00 og 13:00. Som tidligere nevnt er ikke satellittkonstellasjonen fullstendig under tiden datasettet dekker, så det er naturlig at tilgjengeligheten til satellitter varierer selv når båten ligger rolig. På den annen side så virker det som differansene ellers er minst like små som for kodeløsningen basert på GPS.



Figur 52: PDOP og NOS DOY 288 Galileo E1/E5a



Figur 53: PDOP og NOS DOY 288 GPS L1/L5



Figur 54: RMS-verdier for DOY 288 i 2018.

RMS-verdiene i tabellen i figur 54 viser lavere tall for Galileo for alle de tre komponentene. For øst har løsningene omtrent samme RMS-verdi, mens for nord har Galileo i underkant av 0.2 meter lavere RMS. Forskjellen i høydekomponent er i overkant av 0.3 meter, i favør Galileo. Antall satellitter ligger jevnt over mellom 5 og 8 for Galileo, mens tilfellet for GPS er stort sett mellom 8 og 12 satellitter.

4.8 Sammenlikning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G

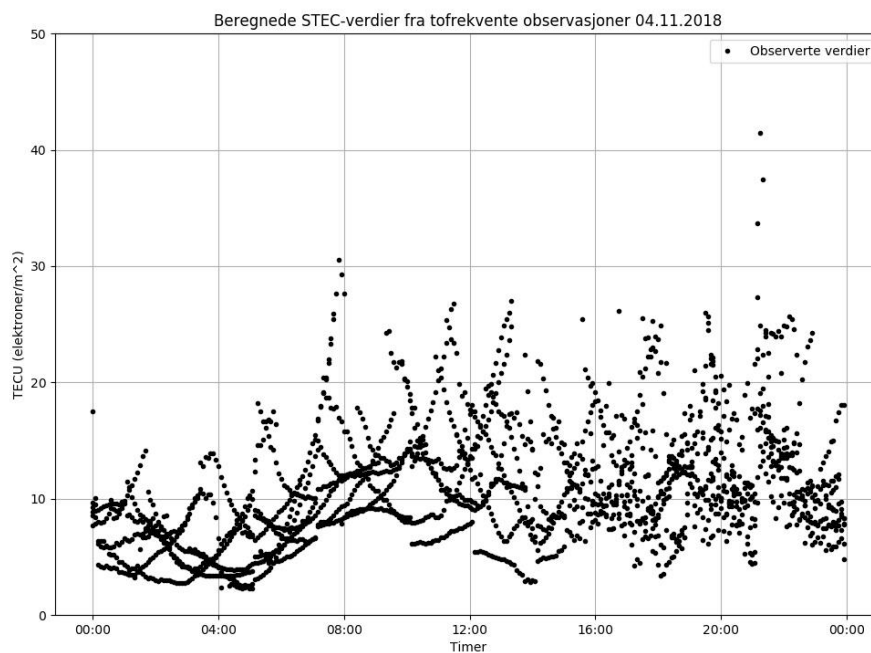
Denne delen av oppgaven har som hensikt å sammenligne ionosfæremodellene NeQuick-G og Klobuchar. Dataene var ferdig prosessert når vi fikk dem fra Kartverket. Jobben som er gjort i resultatdelen er plotting av figurer og beregning av kvalitetsparametere.

Figur 55, 56 og 57 viser beregnede TEC-verdier (STEC) med tofrekvente observasjoner, NeQuick-G og Klobuchar. De tofrekvente beregningene er som tidligere nevnt benyttet som fasit i dette tilfellet.

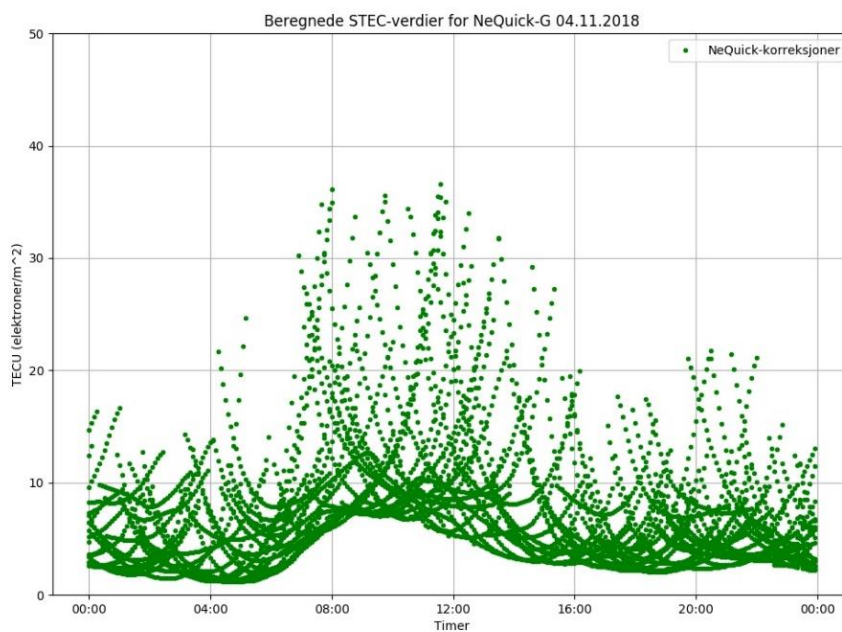
For de tofrekvente beregningene er det brukt observasjoner fra 20 Galileo-satellitter (18 aktive og 2 satellitter i testing), mens for NeQuick-G og Klobuchar er det benyttet data fra 51 satellitter totalt. Dette er da 20 Galileo- og 31 GPS-satellitter. Grunnen til at figurene består av flere grafer formet som konvekse kurver, er at de også på et vis illustrerer satellittenes bevegelse relativt til stasjonen i Honningsvåg. Der hvor kurven starter viser hvor satellittene først blir tilgjengelig for antennen. Bunnpunktet viser når satellitten er nærmest, derav også lavere TEC-verdi. TEC er på sitt laveste når satellitten er nærmest antennen fordi da får signalet også kortere reisevei gjennom ionosfæren. I perioden før og etter kurvens endepunkter har ikke antennen tilsikt til satellitten. Noen av kurvene viser verdier for de samme satellittene fordi omløpstiden til satellittene er 12 timer, mens figurene er døgnplott.

Grunnen til at fasitens figur inneholder mindre informasjon enn for NeQuick-G og Klobuchar, er som nevnt at den kun er basert på Galileo-satellitter.

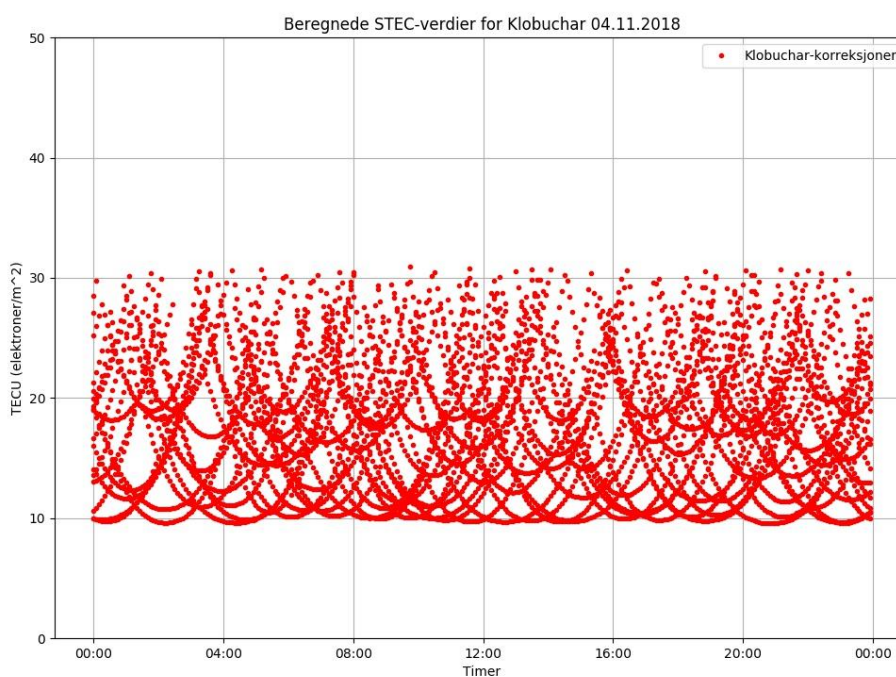
Vi kan se at NeQuick-G-modellen følger fasitens TEC-verdiene ganske mye bedre enn Klobuchar. Mens Klobucharmodellen har jevnere korreksjoner gjennom hele døgnet, så klarer NeQuick-G å få med seg det lille hoppet i ionosfæreaktivitet fra klokken 05:00 til 12:00. Klobuchar har også beregnet TECU mellom 10 og 30 for hele døgnet, og har dermed i mange tilfeller beregnet for høye verdier i forhold til fasiten. NeQuick-G gir lavere, og mer korrekte verdier.



Figur 55: Beregnede STEC-verdier fra tofrekvente observasjoner



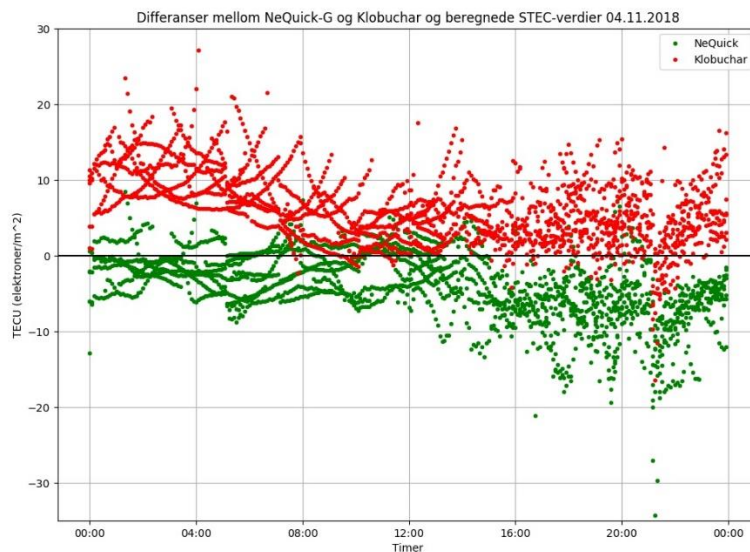
Figur 56: Beregnede STEC-verdier for NeQuick-G



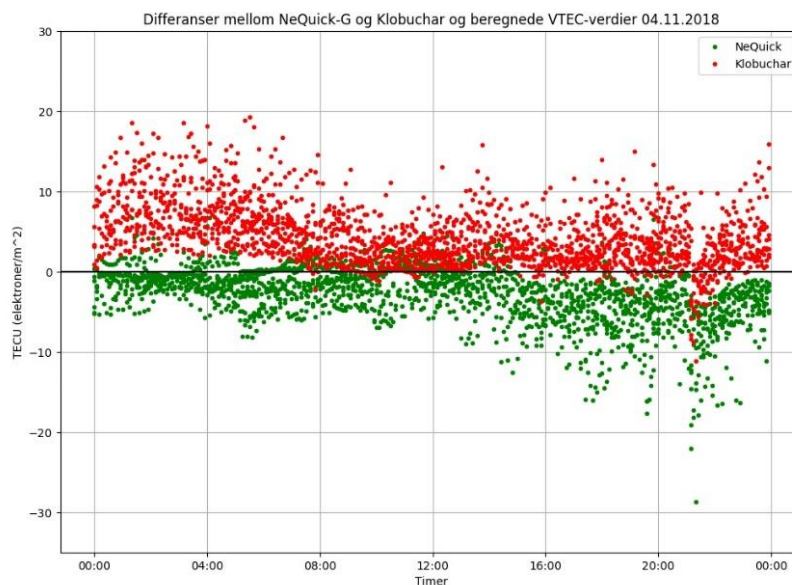
Figur 57: Beregnede STEC-verdier for Klobuchar

Figur 58 og 59 viser differansene mellom NeQuick-G og Klobuchar, i forhold til fasiten. Fasiten samsvarer med den uthevede aksene ved TECU = 0. Figur 58 viser STEC (Slant TEC), mens figur 59 viser VTEC (Vertical TEC).

Det er tydelige for begge differanseplottene at NeQuick-G har lavere verdier enn Klobuchar. Dette er forventet, ut fra de absolutte TEC-verdiene i figur 55. For den første halvdel av STEC-plottet kan vi tydelig følge satellittene langs de forskjellige kurvene og linjene, mens verdiene spres mer utover i siste halvdel av plottet for begge modellene. Her er differansene ganske like for begge modellene. Dette tyder på at det er ionosfæreaktivitet, som gjør at forsinkelsen på signalene har større variasjon, og blir vanskeligere å beregne for både NeQuick-G og Klobuchar.



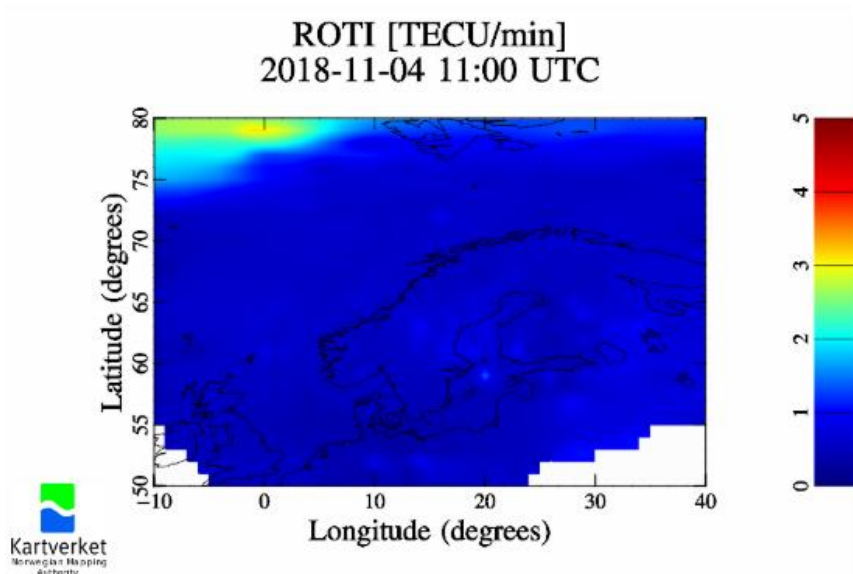
Figur 58: Differanser mellom NeQuick-G og Klobuchar og beregnede STEC-verdier for 04.11.18



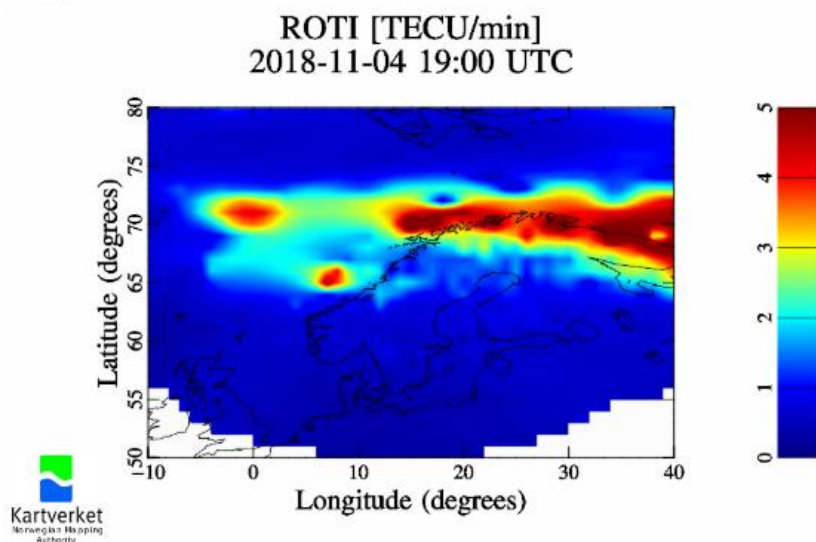
Figur 59: Differanser mellom NeQuick-G og Klobuchar og beregnede VTEC-verdier for 04.11.18

Figur 61 bekrefter ionosfæreaktiviteten. Den viser ROTI (Rate Of Change of TEC Index) kl. 19:00 (UTC), og er hentet fra Kartverket sin tjeneste *seSolstorm*. (Kartverket, 2019) ROTI er det samme som standardavviket til ROT (Rate Of Change of TEC) over et definert tidsintervall. Det er et veldig egnet mål for å se på variasjoner i elektroninnhold i siktelinjen mellom satellitt og mottaker. ROTI er gitt som TECU/min. (Kervalishvili et al., 2018) Figuren viser i hvert fall tydelig at det er ganske store variasjoner i elektroninnhold for de nordlige delene av Norge ved dette tidspunktet.

Klobuchar har som nevnt noen av de samme type kurvene i differanseplottet for STEC som i plottet for absolutte TEC-verdier. Dette kan tolkes som at differansene til fasiten minker med avstanden til satellitten i starten av plottet. Som forventet kan vi se at differansene er mindre rundt midten av figur 58 og 59. Dette er grunnet mindre ionosfæreaktivitet på dagen, noe som gjør beregningene enklere for modellene. Figur 60 fra *seSolstorm* bekrefter dette. Den viser at det er lite endring i elektroninnholdet rundt kl. 11:00.

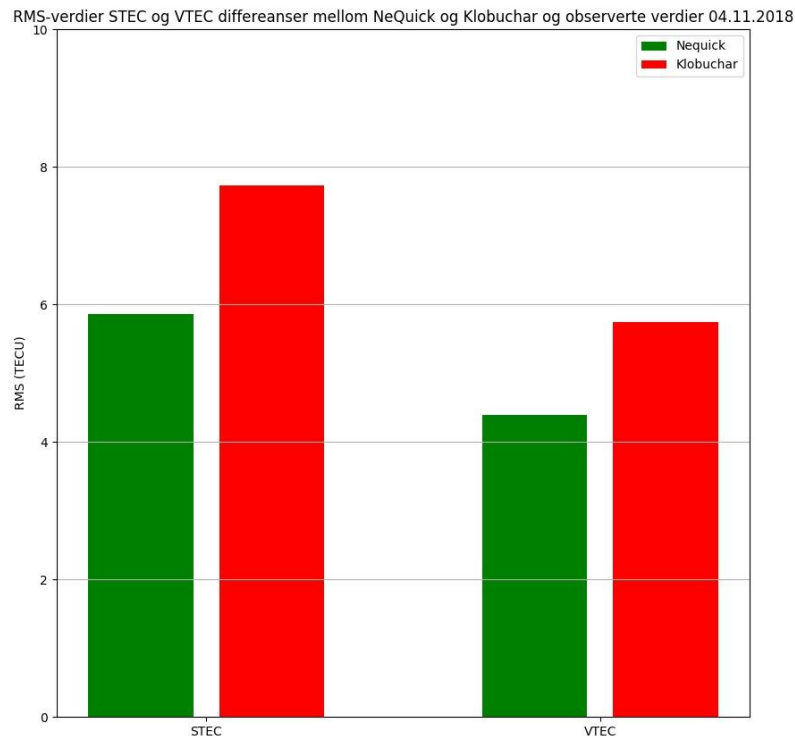


Figur 60: ROTI-verdier for 04.11.18 klokken 11:00



Figur 61: ROTI-verdier for 04.11.18 kl 19:00

Figur 62 og tabell 4 viser RMS-verdier for de beregnede TEC-differansene for 04.11.2018. RMS-verdiene er regnet ut fra differansene mellom ionosfæreverdiene basert på tofrekvente observasjoner og henholdsvis NeQuick-G- og Klobucharionosfæremodellen. Vi kan se at verdiene er lavere for differansene til NeQuick-modellen. Dette bekrefter det plottene i avsnittet over viser.



Figur 62: RMS-verdier beregnet fra differansene mellom NeQuick-G, Klobuchar og observerte verdier.

Tabell 4: RMS, maks- og minimums-differanse for STEC og VTEC-verdier

04.11.2018	RMS (TECU)	Max-differanse (TECU)	Min-differanse (TECU)
STEC NeQuick	5.86	11.35	-34.24
STEC Klobuchar	7.73	27.20	-16.43
VTEC NeQuick	4.39	6.71	-28.67
VTEC Klobuchar	5.74	19.26	-11.07

(Tom side)

Kapittel 5 – Diskusjon

Diskusjonen bygger på teorien tidligere lagt frem i oppgaven og resultatene vi selv har kommet frem til. Denne delen har som mål å vurdere om resultatene fra de ulike prosesseringsmetodene kan si noe om Galileo bidrar til å gi en mer pålitelig posisjonsbestemmelse langs norskekysten.

5.1 Statisk måling

Fra resultatene til de statiske målingene kan vi se at TerraPos har beregnet et standardavvik som er mye lavere for den fler-frekvente multi-GNSS PPP-løsningen i forhold til kodeløsningene. Dette er som forventet, men både PPP og kodeløsningene har et standardavvik som kan kalles kunstig lavt. Ved tette målinger, som våre på 1 Hz, vil det bli korrelasjon mellom målingene. Som nevnt i resultatene, vil statisk måling over et helt døgn gi veldig mange overbestemmelser fordi det kun skal estimeres ett sett med koordinater. Dette gjør igjen at programvarer som TerraPos beregner svært lave standardavvik, som ellers ikke er representativt for nøyaktigheten til prosesseringsmetodene. Selv om standardavvikene som kommer ut av programvaren er svært lave for både kodeløsningene og PPP-løsningen, kan vi se at de er i helt forskjellig størrelsesorden. For eksempel er standardavviket i nord 0.003 meter for PPP-løsningen, mens den er henholdsvis 0.0157 meter og 0.0127 meter for GPS- og GPS + Galileo-kodeløsningene.

Hensikten med å prosessere denne dagen med hjelp av statisk PPP var for å vise den ytelsen vi kan forvente av PPP. PPP-løsningen som er produsert for resten av datasettet er for kinematiske observasjoner, noe som vil gjøre at resultatene blir noe mindre nøyaktig. Men uten bruk av flere mottakere eller treghetsnavigasjon vil en kinematisk fler-frekvent multi-GNSS PPP-løsning være det beste som er tilgjengelig. Dette gjør at vi velger å bruke PPP-løsningen som fasit i forhold til kodeløsningene med GPS og GPS + Galileo.

5.2 Tilgjengelige satellitter og antall observasjoner

I starten av datasettet var det 14 aktive Galileo-satellitter i konstellasjonen, mens antallet hadde økt til 18 ved datasettets slutt. Det vil si at Galileo, som tidligere nevnt, var ganske langt unna fullstendig konstellasjon på totalt 24 (+6 i reserve) satellitter. For kodeløsningen vi beregnet med Galileo, betyr dette at det er mange epoker som ikke er mulig å beregne på grunn av for få tilgjengelige satellitter. Med tanke på oppgaven gjorde dette at vi ikke hadde muligheten til å sammenligne en ren Galileo-løsning med en ren GPS-løsning. Som vi kan se fra figur 17 og 19 i resultatene, blir det ikke riktig å sammenligne Galileo-resultatene med de basert på GPS. Dette ble som forventet delvis forbedret etter at det ble aktivert 3 nye Galileo-satellitter i august 2018. Mot slutten av datasettet var det 18 tilgjengelige satellitter fra Galileo. Den siste ble aktivert i oktober 2018. Dette var dessverre etter at skipet ble lagt i tørrdøkk, noe som gjorde at vi ikke fikk muligheten til å se på ytelsen denne satellitten bidrar med til de kinematiske observasjonene. Selv etter at denne satellitten ble aktivert, er det ikke mulig å beregne en full dag basert på Galileo. For GPS har det ikke blitt aktivert noen nye satellitter i tidsrommet som datasettet dekker. Det har derimot blitt fjernet en eldre IIR-satellitt fra konstellasjonen 5. mars 2018 (DOY 64).

Som vi kan se i resultatkapittelet er det ikke nok beregnede posisjoner for kodeløsningen med kun Galileo-observasjoner. Ettersom Galileo ikke har full konstellasjon er dette som forventet. For posisjonene som er beregnet er det i gjennomsnitt kun kontakt med 5 satellitter. Dette gjør at systemet er svært sårbart hvis man mister kontakt med en eller flere satellitter. Ruten til skipet er preget av heterogene forhold, noe som gjør at muligheten for at man mister kontakt med en eller flere satellitter er stor. For GPS-løsningen er gjennomsnittlig antall satellitter mellom 9 og 10, noe som gjør at mottakeren kan miste kontakt med en del satellitter, og fortsatt ha mulighet til å beregne en posisjon.

Selv om TerraPos ikke alltid har mulighet til å beregne posisjoner med kun Galileo grunnet mangel på satellitter, vil bidraget til den kombinerte løsningen med GPS + Galileo fortsatt være der. Når Galileo-satellittene brukes i tillegg til GPS-satellitter vil vi få enda flere overbestemmelser, noe som vil øke nøyaktigheten til posisjonen.

I Februar 2019 ble det aktivert fire nye satellitter i Galileo-systemet, noe som totalt gir 22 aktive satellitter. Dette gjør at det vil være mulig å beregne flere posisjoner i løpet av et døgn med kun Galileo-satellitter. Likevel er ikke 22 aktive satellitter en fulltallig konstellasjon. Det vil si at det fortsatt kan være noen epoker hvor posisjonen ikke er mulig å beregne.

5.3 Kvalitetstall for hele datasettet

I resultatkapittelet har vi beregnet RMS-verdier for hele datasettet for GPS- og GPS + Galileo-kodeløsningene. Fra figur 20 kan vi se at RMS-verdiene for GPS + Galileo-løsningen er lavere enn for GPS-løsningen. Dette er som forventet ettersom det er tilgang til flere satellitter i observasjonene. For både øst- og nord-komponentene er forbedringen fra GPS til GPS + Galileo på over en desimeter. Det er enda tydeligere for høydekomponenten, hvor forbedringen er på rundt 4 desimeter. RMS-verdiene er regnet ut som et gjennomsnitt av hver individuelle dag, som igjen er regnet ut fra differanser fra PPP-løsningen som brukes som fasit i denne oppgaven. For en bruker vil disse tallene kunne gi en pekepinn på hvilken posisjonsnøyaktighet vi kan anta som et gjennomsnitt når feilkilder knyttet til omgivelsene er inkludert i målingene.

Her ser vi tydelig at Galileo bidrar til å styrke posisjonsnøyaktigheten. Hovedgrunnen til dette er nok så enkelt at flere satellitter gir en bedre løsning med flere tilgjengelige observasjoner til satellitter og dermed flere overbestemmelser. Det er viktig å forstå at disse tallene kun gir et innblikk i hva vi kan forvente oss fra andre resultater fra datasettet.

5.4 Sammenlikning GPS og GPS + Galileo

Som forklart tidligere har vi valgt å bruke en kodeløsning med både GPS og Galileo for å analysere bidraget Galileo gir kvaliteten på posisjonsbestemmelsen. Ved å sammenlikne med en ren GPS-løsning her også har vi kunnet visualisere dette bidraget. Figurene i resultatdelen hadde til felles at de viser tiden hvor båten hadde beveget seg fra Bergen til Kirkenes. Figurene viste tydelig at RMS-verdiene hadde blitt lavere for den kombinerte løsningen i løpet av datasettet. Forskjellen var størst mellom DOY 295-301 i 2017 og DOY 228-233 i 2018, hvor grunnrisskomponentene uttrykt i RMS hadde blitt 0.1 til 0.2 meter lavere, og høydekomponenten hadde sunket med omtrent 0.2 meter. DOY 272-277 i 2018 hadde lavere høydekomponent med en reduksjon på 0.3 meter fra den første uken. Deler av disse forskjellene kan komme fra forskjellige påvirkninger på signalet. Vi har ikke sett nærmere på dette, ettersom resultatet var i samsvar med våre forventninger.

Etttersom den kombinerte løsningen har fått tilgang til 3 nye Galileo-satellitter bør denne endringen kunne ses i tallene fra de siste ukene. Det går et tydelig skille mellom figur «» og figur «», og dette er med på å vise at flere Galileo-satellitter gir bedre posisjonskvalitet for vårt datasett. Perioden etter den siste satellitten ble aktivert 12.10.2018 (DOY 285) er skipet inne til vedlikehold, så effekten denne satellitten ville gitt er ikke sammenlignbar med de andre figurene. Dette er grunnen til at det ikke ble tatt med en figur fra helt mot slutten av datasettet.

Det vi ikke forventet fra disse figurene var at den rene GPS løsningen også har bedret seg med ca. 0.03 til 0.1 meter i alle komponenter fra DOY 295-301 i 2017 til DOY 272-277 i 2018. Det er ikke aktivert noen nye satellitter i løpet av datasettet. Den eneste forandringen i GPS-konstellasjonen er at blokk IIR-satellitten USA-156 (GPS NAVSTAR 50) ble deaktivert den 05.03.2018. (Celestrak.com, 2018) På den annen side varierer RMS-verdiene for GPS-løsningen mye mellom de 6 figurene. For eksempel er DOY 162-168 i 2018 omtrent på samme nivå som DOY 295-301 i 2017. Stolpene for RMS-verdien til GPS + Galileo-komponentene varierer omtrent i samme takt i forhold til hverandre som for GPS. Dette kan kanskje tyde på at det er GPS som bidrar med den noe uventede variasjonen mellom figurene. En annen sannsynlig forklaring er, som tidligere nevnt, at satellittgeometrien er forskjellig over mottakeren over tid. Mye av denne effekten burde kanskje uansett ha blitt jevnet ut når det er snakk om tidsperioder på en uke, men for områdene som er spesielt utsatt for dårlig satellittgeometri kan dette gi utslag på RMS-verdiene

5.5 Bidrag fra Galileo i trange fjordarmer

Ettersom Norge har mange høye fjell og trange fjordarmer er det spennende å se på hvor mye Galileo bidrar i områder med den type landskap. I resultatkapittelet kan vi se på differansene gjennom døgnet hvor skipet er i området inn mot, og inne i Geirangerfjorden. Vi kan se at det er større differanser for GPS-løsningen enn for GPS + Galileo, noe som er forventet med tanke på at det er flere tilgjengelige satellitter for den kombinerte løsningen. Figurene som viser PDOP og antall satellitter bekrefter dette. Her kan vi også se at PDOP-verdien er svært høy ved noen tidspunkter, noe som forteller at posisjonsbestemmelsen har falt ut eller nærmer seg ubrukelig. Dette er rundt tiden hvor skipet er innerst i fjorden eller går svært nær fjellsidene, og er derfor det mest utfordrende området å beregne posisjon. For DOY 163 kan vi se at PDOP-verdien blir svært høy for både GPS- og GPS + Galileo-løsningen, mens dette har kun skjedd for GPS-løsningen for DOY 229. Dette kan bety at de ekstra Galileo-satellittene bidrar positivt til posisjonsbestemmelsen.

Geirangerfjorden og innseilingen hit er preget av spesielt dårlige måleforhold med høye fjell og trange fjorder. Dette er et godt eksempel på hvor Galileo kan bidra til posisjonsbestemmelsen, i tillegg til GPS. For brukere i Norge vil en fullverdig Galileo-konstellasjon, i tillegg til Galileo-kompatible enheter, kunne føre til en mer pålitelig posisjonsbestemmelse i områder preget av fjorder og høye fjell. Det skal også nevnes at dette er områder hvor det uansett vil være utfordrende å beregne posisjoner for GNSS-systemer. Ved å bruke flere systemer, for eksempel GPS og Galileo, vil antallet satellitter økes. Dette vil igjen gi mer stabil tilgang til posisjon.

5.6 Bidrag fra Galileo ved rutens nordligste del

Den nordligste delen av ruta, mellom Mehamn og Kirkenes, kan vise oss bidraget til Galileo i de nordligste områdene i Norge og Europa. Fra figurene i resultatkapittelet kan vi se at PDOP-verdiene for løsningen med GPS + Galileo er lavere enn for GPS-løsningen. Dette gjelder for både DOY 168 og 234. Vi kan også se at antall satellitter for DOY 234 virker og være jevnere gjennom hele døgnet, noe som kan vise at de 3 nylig aktiverte Galileo-satellittene gir et bidrag til den kombinerte løsningen. For løsningen med GPS kan vi se at antallet satellitter er omtrent det samme, men at mønsteret har forskjøvet seg noe.

Som vi har sett tidligere har GPS-løsningen tilgang til flere satellitter i nordområdene, noe som da bidrar til begge løsningene. Det samme gjelder også for PPP-løsningen som har opptil 3 ekstra satellitter ved den nordlige delen av ruta, sammenlignet med lengre sør. Grunnen til dette tror vi kan være at satellitter på den andre siden av polområdet er synlige i dette området, selv med elevasjons-cutoff på 10 grader. En annen grunn tror vi kan være at det er mindre fjordarmer og høye fjell ved rutas nordligste del. Dette fører til bedre måleforhold og tilsikt til satellitter.

Den kombinerte løsningen med GPS + Galileo har en lavere RMS-verdi enn den rene GPS-løsningen. Dette er som ved de andre tilfellene, forventet fordi det totale antallet tilgjengelige satellitter øker.

Med tanke på at det russiske systemet, GLONASS, har en høyere inklinasjonsvinkel vil dette i teorien kunne gi en bedre posisjonsnøyaktighet i nordområdene. Men som vi kan se i fra figur 49 og 50 i resultatkapittelet er dette ikke tilfelle. RMS-verdiene for både løsningen med kun GLONASS-observasjoner og løsningen med GPS + GLONASS er høyere enn henholdsvis kun GPS og GPS +

Galileo. Dette kan tyde på at den større inklinajonsvinkelen ikke har den tenkte innvirkningen på posisjonsnøyaktigheten når GLONASS-systemet ellers har dårligere spesifikasjoner enn GPS og Galileo. For den kombinerte løsningen har GLONASS kun negativ innvirkning på GPS-observasjonene.

5.7 Sammenlikning GPS L1/L5 og Galileo E1/E5a

I datasettet vi mottok fra NRS var det kun én dag som var svært nær å la seg prosessere i sin helhet med kun Galileo-observasjoner. Det vil si å klare å beregne en posisjon for skipet hvert sekund av døgnet. Denne dagen lå skipet i tørrdøkk, noe som gjorde at topografien var uendret i løpet av døgnet. Landskapet rundt tørrdøkken er forholdsvis flatt, og det er ingen høye bygninger i nærheten. Variasjonene i måleforhold var da knyttet til endringer i aktivitet hos ionosfæren og troposfæren. For denne dagen valgte vi å sammenligne en ren GPS- og en ren Galileo-løsning mot hverandre.

Fra figur 54 kan vi at RMS-verdiene for Galileo-løsningen er lavere enn verdiene for GPS-løsningen. Dette er interessant ettersom Galileo har færre tilgjengelige satellitter. Dette kan tyde på at signalet fra Galileo-satellittene kan være mer nøyaktig, men noe dypere analyse av dette er ikke gjort i denne oppgaven.

Vi kan se fra figur 51 i resultatkapittelet at de sanne feilene for denne dagen fordeler seg forskjellig for GPS og Galileo. Dette er nok grunnet at satellittgeometrien er forskjellig for systemene i løpet av døgnet. Det kan se ut som differansene er i omtrent samme størrelsesorden, men RMS-verdiene viser at Galileo-løsningen gir et bedre resultat. Dette er tydelig i både nord- og høydekomponentene, hvor forbedringen er rundt 2 desimeter for begge. For øst-komponenten er forskjellen neglisjerbar, ettersom denne er på 1 cm. Dette kan tyde på at Galileo likevel jevnt over har litt lavere differanser, og at RMS-verdiene derfor blir litt lavere.

Figur 52 og 53 viser forskjellen i antall satellitter og PDOP-verdiene for henholdsvis Galileo-løsningen og GPS-løsningen. For Galileo-løsningen er PDOP-verdien høyere for hele døgnet, noe som er forventet med tanke på antall tilgjengelige satellitter. Posisjonsbestemmelsen faller ut ved tre tilfeller, dette kan sees ved at PDOP-verdien stiger forbi 10. Dette skjer ikke for GPS-løsningen sin PDOP-verdi, men det er også tilfeller her hvor PDOP-verdien gjenspeiler dårlig satellittgeometri.

Fra plottet som viser antall satellitter i løpet av døgnet for GPS, kan det observeres at antall tilgjengelige satellitter varierer fra 14 til 6. Selv om Galileo naturlig nok har et lavere antall tilgjengelige satellitter, så varierer de mindre og ligger stort sett mellom 5 og 7. Som et tilskudd til den kombinerte løsningen, bidrar Galileo helt klart positivt. Som et eget system, så er ikke Galileo helt sammenlignbart med GPS i perioden dette døgnet er hentet fra, selv om RMS-verdiene er lave. Som fullstendig konstellasjon derimot, tyder resultatene på at Galileo kan gi en mer pålitelig posisjonsbestemmelse enn GPS.

5.8 Sammenligning av ionosfæremodellene Klobuchar og NeQuick-G

Figurene i resultatdelen viste tydelig at NeQuick-G modellen ga resultater som samsvarte best med fasiten. Der hvor NeQuick-G tydelig fulgte fasiten, gav Klobuchar heller resultater som var jevne gjennom hele døgnet. TEC-verdiene til Klobuchar var også jevnt over for høye. Mot slutten av døgnet derimot, har begge modellene problemer med å beregne presise verdier.

Det at NeQuick-G skulle gi mer presise verdier enn Klobuchar, var i henhold til forventning. Grunnen til dette er at NeQuick-G i teorien er en mer avansert modell. Hovedforskjellen mellom modellene ligger i hovedsak i modelleringen av ionosfæren. Mens Klobuchar forenkler ionosfæren til å være et tynt lag ved IPP (Ionospheric Pierce Point) 350 km over jordoverflaten, er NeQuick en tredimensjonal modell. TEC-verdien beregnes ved å integrere numerisk langs siktelinjen mellom mottaker og satellitt ved å benytte en modell for elektrontettheten. (Hofmann-Wellenhof et al., 2007) Alt i alt så var forventningen at begge modellene skulle kunne korrigere for rundt 50 % av ionosfæreforsinkelsen, men at NeQuick-G skulle gi noe bedre ytelse.

Som nevnt i resultatene er TEC-verdiene lavere, jo nærmere satellittene er mottakeren. At mønsteret til kurvene i figur 57 viser dette tydelige, er som forventet. Mot slutten av dagen derimot, viste figur 58 og 59 at TEC-verdiene fikk større variasjon ved at verdiene var mer spredt. Utsnittene fra Kartverkets tjeneste, *seSolstorm*, viste større ionosfære-aktivitet mot slutten av døgnet.

Figur 58 og 59 viser også at NeQuick-G har lave differanser i forhold til fasiten i den første halvdel av døgnet. Her er differansene ganske mye lavere enn for Klobuchar. Mot midten av dagen, hvor ionosfæreaktiviteten var veldig lav, er differansene til modellene ganske like. Mot slutten av dagen har som nevnt begge modellene problemer med å beregne gode estimater. Etter klokken 16:00, er differansene for begge modellene omtrent på samme nivå. Dette betyr at de fleste differanseverdier ligger mellom 10 og -10 TECU, men også en del utenfor dette intervallet. Dette kan tolkes som at når ionosfæreaktiviteten er høy og variabel som i figur 55, sliter begge modeller med estimering av ionosfæreforsinkelse. Dette er som forventet da modellene kun er gode nok til å beregne forutsigbare variasjoner i ionosfæren, basert på empiriske data. Størrelsene som inngår i beregningene i modellene er heller ikke slik at de kan fange opp lokale endringer. Ved lav og moderat aktivitet, viser «stikkprøven» i denne oppgaven at NeQuick-G er mer presis.

De statiske tallene som er beregnet i tabell 5 bekrefter også at NeQuick-G har verdier nærmest fasiten i denne sammenhengen. Beregnet RMS basert på differansene er lavere for NeQuick-G enn for Klobuchar.

Ettersom dette kun er data fra et døgn, og fra en målestasjon, så kan denne delen kun sees på som en pekepinn på forskjellene i ytelse mellom NeQuick-G og Klobuchar. Hadde vi hatt tilgang på programvare som inkluderte NeQuick-modellen kunne vi gjort beregninger basert på hele datasettet, og dermed ha fått resultater som kunne gi et enda bedre svar på problemstillingen.

5.9 Valg av metode

Gjennom prosesseringen av datasettet har det blitt brukt mye batchkjøring av TerraPos via kommandolinje. For oss har dette fungert nesten smertefritt, men det har tatt lang tid ettersom det er mye data. Før selve prosesseringen var det mye klargjøring av filer, samt nedlasting av presise klokke- og banedata. Hvis vi skulle gjort dette igjen ville vi ønsket å bruke en datamaskin med mer prosessorkraft til prosesseringen. Ved å bruke våre egne bærbare PCer har dette tatt lang tid.

For plotting av resultatene vi fikk ut av TerraPos, har PyCharm vært svært nyttig. Resultatfilene fra TerraPos inneholder mye informasjon som tid, posisjoner og statistiske parametere. Dette gjør at plott som går over mange dager kan ta forholdsvis lang tid å produsere. Plottingen ble gjort på en måte hvor kun DOY, som alle filene er merket med, ble brukt til identifisering av filer. Dette var noe som fungerte bra, og som gjorde at dataflyten fungerte godt.

I ionosfæredelen skulle vi som nevnt gjerne hatt muligheten til å benytte datasettet fra NRS. Dette ville gitt oss tilgang til et bredere spekter av måleforhold og ionosfæreaktivitet. For å kunne konkludere om den ene modellen er bedre enn den andre, ville det vært hensiktsmessig å kunne analysert en lengre tidsperiode, med kinematiske målinger.

Kapittel 5 – Diskusjon

(Tom side)

Kapittel 6 – Konklusjon

Denne oppgaven tok sikte på å gjennomføre en ytelsesanalyse av Galileo langs norskekysten ved å svare på to spørsmål:

1. Vil inkludering av Galileo i mottaker benyttet på nordlige breddegrader bidra til mer pålitelig posisjonsbestemmelse?
2. Kan påvirkningen av ionosfæriske forstyrrelser reduseres ved bruk av Galileos ionosfæremodell?

For å gi et så godt svar som mulig på disse spørsmålene prosesserte vi en tilnærmet fasit på skipets posisjon basert på kinematisk PPP. Vi sammenlignet denne med forskjellige kodeløsninger og laget kvalitetstall på bakgrunn av dette.

Vedrørende det første spørsmålet så har alle resultatene våre vist at en kombinert løsning med GPS + Galileo gir bedre kvalitetstall enn en ren GPS-løsning. Dette var som forventet med tanke på at tilsikt til flere satellitter vil gi flere observasjoner, og da en sterkere løsning. Forskjellen i RMS for øst-, nord og høydekomponentene var i dm-området for hele året sett under ett. Da må det også nevnes at dette er før Galileo har en fullverdig konstellasjon. Det som kanskje overrasket mest var sammenlikningen mellom de tofrekvent GPS- og Galileo-løsningene for én dag med statisk måling. På denne dagen (12.10.2018 DOY 288), hadde Galileo akkurat lagt til satellitt nummer 22 i konstellasjonen. Selv om dette ikke er nok til å beregne koordinater for skipet hvert sekund av døgnet, så hadde Galileo de laveste RMS-tallene. Dette kan være en tendens på at Galileo gir mer nøyaktig posisjon for skipet, men kun én dag med ikke-fulltallig konstellasjon er ikke nok til å konkludere.

Det som kan være en foreløpig slutning på det første spørsmålet er at Galileo gir et positivt bidrag til posisjonsnøyaktigheten i en kombinert løsning med GPS. Under norske forhold viser også resultatene at med Galileo er tilgangen til posisjonen enda mer stabil enn ved bruk av kun GPS-observasjoner. Dette gjelder spesielt i fjordarmer hvor elevasjonsvinklene er svært høye.

Det skal sies at et så stort datasett inneholder mange feilkilder som multipath, strømbrydd på mottakeren, blokkering av tilsikt til satellittene osv. RMS-verdiene inneholder derfor også disse feilene. Kvalitetstallene i denne oppgaven er derfor ikke et fasitsvar på nøyaktigheten til de ulike signalkombinasjonene som er brukt, men heller en indikasjon på hvor nøyaktig systemene og signalkombinasjonene er i forhold til hverandre.

Når det gjelder det andre spørsmålet, så virker det som NeQuick-G gir en mer riktig korreksjon sett i sammenheng med de beregnede verdiene fra de tofrekvente observasjonene. NeQuick-G følger også mindre variasjon i TEC-verdier hos fasiten bedre, mens Klobuchar gir en mer lik korreksjon for hele døgnet gjennom. Begge modellene sliter som forventet med å gi gode estimater for TEC når elektroninnholdet i atmosfæren varierer. Ved stor ionosfæreaktivitet gav modellene omtrent likt resultat.

For brukere kan denne sammenlikningen gi en pekepinn på at NeQuick-G muligens kan gi bedre korreksjoner for ionosfæreforsinkelse enn Klobuchar ved lav og middels ionosfæreaktivitet. Observasjonene i denne oppgaven er som nevnt kun gjort for ett døgn. Dette gjør at det ikke er mulig å gi en bastant konklusjon på hvilken modell som reduserer ionosfæriske forstyrrelser mest. For å kunne gjøre det måtte vi brukt et større datagrunnlag.

Kapittel 7 – Veien videre

Hvis man har muligheten, vil det være hensiktsmessig å gjenta denne analysen på et datasett etter at Galileo har fått full konstellasjon i starten av 2020. Her kan en oppgave konsentrere seg mer rundt sammenligning av en ren GPS L1/L5-løsning og en ren Galileo E1/E5a-løsning. Med det eksisterende datasettet vil det også være en mulighet for å gjøre en dypere analyse av satellittsignalene. Her vil man ha muligheten til å fokusere på en satellitt fra Galileo og en fra GPS for å få et større innblikk i forskjellen på diverse ytelsesparametere mellom satellittene fra de to systemene. Det var noe som ble påtenkt underveis i vår oppgave, men grunnet tidsmangel valgte vi å droppe det. Vi tror noe av grunnen til at for eksempel den rene Galileo-løsningen vår er litt bedre enn den rene GPS-løsningen for den ene dagen vi plukket ut kan være knyttet opp mot forskjeller i signalet. Dette er noe vi tror kunne vært interessant å se nærmere på i en fremtidig masteroppgave.

Hvis NeQuick-ionosfæremodellen blir implementert i TerraPos eller en annen tilgjengelig programvare vil det være hensiktsmessig å se på forskjellen mellom denne og Klobuchar-ionosfæremodellen for en lengre tidsperiode. Ionosfæremodellene kan også ha forskjellig effektivitet ved forskjellige måleforhold. Ved å benytte seg av datasettet vi har brukt vil det være mulig for å se på både forskjellige måleforhold og forskjellig ionosfæreaktivitet.

Kilder

- Arianespace. (2014). *Galileo satellites experience orbital injection anomaly on Soyuz launch: Initial report*.
- BBC News. (2003, 19. september). China joins EU's satellite network. *BBC News* Tilgjengelig fra: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/3121682.stm> (lest 23.02.2019).
- Celestrak.com. (2018). *Notice advisory to NAVSTAR users (NANU) 2018009*. Tilgjengelig fra: <https://celestrak.com/GPS/NANU/2018/nanu.2018009.txt> (lest 27. 04.).
- ESA. (2013). *Fact sheet: What is Galileo?* Tilgjengelig fra: http://download.esa.int/docs/Galileo_IOV_Launch/Galileo_factsheet_2012.pdf (lest 23.02.2019).
- ESA. (2019). *Constellation Information*. Tilgjengelig fra: <https://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information> (lest 28.02.2019).
- EU. (2018). *Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing the space programme of the Union and the European Union Agency for the Space Programme and repealing Regulations (EU) No 912/2010, (EU) No 1285/2013, (EU) No 377/2014 and Decision 541/2014/EU*. Tilgjengelig fra: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2018:447:FIN> (lest 18.04.2019).
- Forsell, B. (2019). DOP - Satellittgeometri I: *Store Norske leksikon*. Tilgjengelig fra: https://snl.no/DOP_-_satellittgeometri (lest 28.03.2019).
- GSA, G. N. S. S. A. (2018). *Is Galileo inside your phone?* Tilgjengelig fra: <https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/galileo-inside-your-phone> (lest 28.02.2019).
- Hatanaka, Y. (2008). A compression format and tools for GNSS observation data.
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. & Wasle, E. (2007). *GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*: Springer Science & Business Media.
- Holtet, J. A. (2014). Ionosfære. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/ionosf%C3%A6re>.
- Hurtigruten. (2017). *Ruteplan 2017* Tilgjengelig fra: <http://viewer.zmags.com/publication/a9e39e6b> (lest 11.03.2019).
- Hurtigruten. (2018). *Ruteplan 2018*. Tilgjengelig fra: <https://secure.viewer.zmags.com/publication/cc558338#/cc558338/1> (lest 11.03.2019).
- Hurtigruten. (2019). *Geirangerfjorden*. Tilgjengelig fra: <https://www.hurtigruten.no/havner/geiranger> (lest 02.04).
- IGS, I. G. S. (2015). *RINEX - The Receiver Independent Exchange Format - Version 3.03*. Tilgjengelig fra: <ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf> (lest 20.02.2019).
- Kaplan, E. D. & Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS: Principles and applications*: Artech House.
- Kartverket. (2019). *seSolstorm*. Tilgjengelig fra: <http://sesolstorm.kartverket.no> (lest 01.05).
- Keating, D. (2010). *Prague To Host EU Satellite Navigation Agency*. Tilgjengelig fra: https://www.rferl.org/a/prague_galileo_agency/2245066.html (lest 24.02.2019).
- Kervalishvili, G., Rauberg, J. & Stolle, C. (2018). *The rate of TEC (ROT) and the Rate of TEC index (ROTI) derived from the Swarm constellation mission observations*. EGU General Assembly Conference Abstracts.
- Klobuchar, J. A. (1987). Ionospheric time-delay algorithm for single-frequency GPS users. *IEEE Transactions on aerospace and electronic systems* (3): 325-331.
- Land Information New Zealand. (2019). *RINEX Data Archive*. Tilgjengelig fra: <https://www.linz.govt.nz/data/geodetic-services/positionz/rinex-data-archive> (lest 04.03.2019).
- Lejeune, R. (2008, April 14-16). *Ionospheric Corrections for GNSS*, Santiago, Chile.
- Levin, D. (2011). Chinese square off with Europe in space. *The New York Times*, 23.
- Los Angeles Air Force Base. (2012). *GPS IIF*. Tilgjengelig fra: <https://www.losangeles.af.mil/About-Us/Fact-Sheets/Article/343724/gps-iif/> (lest 05.04.2019).
- Moldeklev, K. (2019). *Intervju angående Galileoprosjektet* (11.04.2019).

- Navipedia, E. (2011). *Galileo Navigation Message*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Navigation_Message (lest 04.03.2019).
- Navipedia, E. (2017). *NeQuick Ionospheric Model*. Tilgjengelig fra: https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/NeQuick_Ionospheric_Model (lest 04.03.2019).
- Ovstedal, O., Kjorsvik, N. S. & Gjevestad, J. G. O. (2006). *Surveying using GPS precise point positioning*. XXII International FIG Congress, Munich, Germany.
- Price, J. (2019, 10. mars). Dual-Frequency GNSS – An important location feature your phone is probably missing. *Xda-developers*. Tilgjengelig fra: <https://www.xda-developers.com/dual-frequency-gnss-important-location-feature-your-phone-probably-missing/> (lest 02.04.2019).
- Riley, S., Landau, H., Gomez, V., Mishukova, N., Lentz, W. & Clare, A. (2018). Positioning with Android: GNSS Observables. *GPS World*, 29 (1): 18-34.
- Seeber, G. (2008). *Satellite geodesy: foundations, methods, and applications*: Walter de gruyter.
- Solberg, A. (2016, November 16-17.). *EGNOS - Oppdrag Hurtigruten*. Geodesi- og hydrografidagene 2016, Sola, Norge.
- Statens Kartverk. (2015). *Standarder Geografisk Informasjon - Geodatakvalitet, Versjon 1.0*. Tilgjengelig fra: <https://www.kartverket.no/globalassets/standard/bransjestandarder-utover-sosi/geodatakvalitet.pdf> (lest 14.04.2019).
- Subirana, J. S., Zornoza, J. J. & Hernández-Pajares, M. (2013). GNSS Data processing. Volume 1: Fundamentals and Algorithms. *ESA Communications ESTEC, PO Box*, 299: 2200.

Appendiks

A.1: Oversikt over programvare som er benyttet i oppgaven

Tabell 5: Appendiks A.1: Programvare benyttet i oppgaven

Navn:	Om:	Tilgjengelighet:	Kapabilitet:	Bruk:
TerraPos	Programvare for prosessering av data fra GNSS-mottakere og treghetssensorer levert av TerraTec.	Kommersiell	Etterprosessering av GNSS-data. Muligheten til å bruke alle GNSS-systemer.	TerraPos har blitt brukt for prosessering av all posisjonsdata, samt eksport av resultater. TerraPos har muligheten til å prosessere data fra alle tilgjengelige satellittnavigasjonssystemer.
PyCharm	Python IDE levert av JetBrains	Både kommersiell og kostnadsfri versjon	Brukergransesnitt for kodespråket Python.	PyCharm har blitt brukt for prosessering av resultatene fra TerraPos. Alt av grafer har blitt laget ved hjelp av dette programmet.
7-Zip	Programvare for utpakking av komprimerte filer.	Open-Source	Program for komprimering og dekomprimering av filer.	7-Zip ble brukt for å pakke opp filene fra Norsk Romsenter.

A.2: Moduler brukt i Python

Videre bearbeiding og plotting av de eksporterte dataene ble gjort i Pycharm. Pycharm er et brukergrensesnitt for bruk av kodespråket Python. Ved bruk av datastrukturen Pandas DataFrames ble filene lest inn og videre ble modulene Numpy, Mathplotlib og Basemap benyttet. Numpy er en modul som brukes til bearbeiding av tall, Mathplotlib er en modul for plotting av data, mens Basemap er en modul for bruk av bakgrunnskart i forbindelse med plotting.

Vedlegg

Vedlegg 1: Ruteplan MS Polarlys

Tabell 6: Vedlegg 1: Ruteplan for MS Polarlys 2017 og 2018

Avgang Bergen	DOY	Avgang Kirkenes	DOY	Mangler dag	Kommentar
2017			2017		
		07.10	280		
12.10	285	18.10	291		
23.10	295	29.10	302		
03.11	307	09.11	313		
14.11	318	20.11	324		
25.11	329	01.12	335	311	
06.12	340	12.12	346		
17.12	351	23.12	357		
28.12	362				
2018			2018		
		03.01	3		
08.01	8	14.01	14		
19.01	19	25.01	25		
30.01	30	05.02	36		
10.02	41	16.02	47		
21.02	52	27.02	58		
04.03	63	10.03	69		
15.03	74	21.03	80		
26.03	85	01.04	91		
06.04	96	12.04	102		
17.04	107	23.04	113	109	
28.04	118	04.05	124	----	Data mangler
09.05	129	15.05	135	138	
20.05	140	26.05	146		
31.05	151	06.06	157		
11.06	162	17.06	168		
22.06	173	28.06	179		
03.07	184	09.07	190		
14.07	195	31.07	201		
25.07	206	11.08	212		
05.08	217	22.08	223		
16.08	228	02.09	234		
27.08	239	13.09	245		
07.09	250	24.09	256		
18.09	261	05.10	268		
29.09	272	16.10	278		Vedlikehold
10.10	283	27.10	289		
21.10	294				

Siste dag i datasettet 22.10, DOY 295

(Hurtigruten, 2017), (Hurtigruten, 2018)

Vedlegg 2: Oversikt over Galileo-satellitter, og deres status.

Tabell 7: Vedlegg 2: Oversikt over Galileo-satellitter

#	Navn	Oppskyting (UTC)	Status	Aktiv fra
–	GSAT0001	28.12.2005, 05:19	Ikke aktiv siden 30. juni 2012	-
–	GSAT0002	26.04.2008, 22:16	Ikke aktiv siden 23. juli 2012	-
1	GSAT0101	21.10.2011, 10:30	Aktiv	02.10.2018. (Brukes til signalvalidering)
2	GSAT0102	21.10.2011, 10:30	Aktiv	08.11.2018. (Brukes til signalvalidering)
3	GSAT0103	12.10.2012, 18:15	Aktiv	18.07.2018 (Brukes til signalvalidering)
4	GSAT0104	12.10.2012, 18:15	Utlgjengelig	-
5	GSAT0201	22.08.2014, 12:27	Tester	-
6	GSAT0202	22.08.2014, 12:27	Tester	-
7	GSAT0203	27.03.2015, 21:46	Aktiv	27.06.2017
8	GSAT0204	27.03.2015, 21:46	Ikke i bruk	-
10	GSAT0206	11.09.2015, 02:08	Aktiv	16.06.2017
9	GSAT0205	11.09.2015, 02:08	Aktiv	11.10.2017
11	GSAT0208	17.12.2015, 11:51	Aktiv	14.03.2017
12	GSAT0209	17.12.2015, 11:51	Aktiv	18.03.2017
13	GSAT0210	24.05.2016, 08:48	Aktiv	15.12.2016
14	GSAT0211	24.05.2016, 08:48	Aktiv	15.12.2016
15	GSAT0207	17.11.2016, 13:06	Aktiv	31.08.2017
16	GSAT0212	17.11.2016, 13:06	Aktiv	01.08.2017
17	GSAT0213	17.11.2016, 13:06	Aktiv	25.01.2018
18	GSAT0214	17.11.2016, 13:06	Aktiv	22.08.2017
19	GSAT0215	12.12.2017, 18:36	Aktiv	12.10.2018
20	GSAT0216	12.12.2017, 18:36	Aktiv	02.08.2018
21	GSAT0217	12.12.2017, 18:36	Aktiv	02.08.2018

Vedlegg

22	GSAT0218	12.12.2017, 18:36	Aktiv	02.08.2018
23	GSAT0219	25.07.2018, 11:25	Aktiv	11.02.2019
24	GSAT0220	25.07.2018, 11:25	Aktiv	11.02.2019
25	GSAT0221	25.07.2018, 11:25	Aktiv	11.02.2019
26	GSAT0222	25.07.2018, 11:25	Aktiv	11.02.2019
27	GSAT0223	2020		
28	GSAT0224	2020		
29	GSAT0225	2021		
30	GSAT0226	2021		
31	GSAT0227	2022+		
32	GSAT0228	2022+		
33	GSAT0229	2022+		
34	GSAT0230	2022+		
35	GSAT0231	2022+		
36	GSAT0232	2022+		
37	GSAT0233	2022+		
38	GSAT0234	2022+		

(ESA, 2019)

(Tom side)



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway