

# Inledande försök till mätning med Europas navigeringssystem Galileo



Examensarbete av  
Anna Berggren

Gävle 2016

LANTMÄTERIET



## LANTMÄTERIET



Copyright ©

2017-01-30

Författare Anna Berggren

Typografi och layout Rainer Hertel

Omslagsbild ESA – P Carril

Totalt antal sidor 72

Lantmäterirapport 2016:5 ISSN 0280-5731

# Inledande försök till mätning med Europas navigeringssystem Galileo



Examensarbete av  
Anna Berggren

Gävle 2016

LANTMÄTERIET





# Förord

Denna uppsats utgör Anna Berggrens examensarbete i Naturgeografi och kvartärgeologi på avancerad nivå vid Institutionen för naturgeografi, Stockholms universitet. Examensarbetet omfattar 45 högskolepoäng (ca 30 veckors heltidsstudier).

Handledare har varit Göran Alm, Institutionen för naturgeografi, Stockholms universitet och Dan Norin, Lantmäteriet Gävle. Examinator för examensarbetet har varit Ian Brown, Institutionen för naturgeografi, Stockholms universitet.

Författaren är ensam ansvarig för uppsatsens innehåll.

Stockholm, den 24 januari 2017

Steffen Holzkämper  
Chefstudierektor, Institutionen för naturgeografi, Stockholms universitet

---

Denna uppsats finns både utgiven av Institutionen för naturgeografi vid Stockholms universitet (NKA172) och av Lantmäteriet (Lantmäterirapport 2016:5) med identiskt innehåll.

Gävle, den 30 januari 2017

Dan Norin  
Geodet, Lantmäteriet



## Författarens förord

Mitt examensarbete utfördes för Lantmäteriet i Gävle på Institutionen för naturgeografi vid Stockholms universitet.

Jag vill rikta tack till båda mina handledare.

Tack Göran Alm, vid Stockholms universitet, för uppmuntran och entusiasm i ämnet och värdefulla synpunkter på texten.

Tack Dan Norin, från Lantmäteriet i Gävle, för att du tog dig tid att komma till Stockholm med mätutrustning och hjälpa mig hitta lämplig mätpunkt och mätstrategi. Tack också för litteraturtips och värdefulla synpunkter på texten samt för att du såg till att jag kunde få delta i flera Galileoinriktade seminarier.

Tack även till Geodesienheten på Lantmäteriet i Gävle varifrån jag fick låna mätutrustning och SWEPOS-enheten som tillhandahöll skräddarsydd uppkoppling och inställning för mina mätningar och för att jag fick presentera mina resultat på ert årliga seminarium hösten 2016.

Stockholm, januari 2017

Anna Berggren





## Sammanfattning

Europa håller på att bygga upp ett eget satellitnavigeringssystem, Galileo. Till skillnad från det amerikanska systemet GPS är Galileo ett civilt system som kommer att vara oberoende av men kompatibelt med GPS och den ryska motsvarigheten Glonass. Efter stora förseningar har nu tillräckligt många satelliter placerats i omloppsbana så att det kan vara möjligt att starta upp Galileos tidiga tjänster (initial services) under december 2016. Detta arbete belyser Galileos uppbyggnad och utveckling.

Under våren 2016 gjordes testmätningar med Galileo kombinerat med GPS där korrigeringsdata erhöles från Lantmäteriets stödsystem SWEPOS. Mätningarna gjordes med enkelstations-RTK mot SWEPOS referensstation Mosebacke på Södermalm i Stockholm över en punkt belägen ca 1,2 km från Mosebacke. Syftet var att se om det under våren 2016 gick att göra mätningar mot Galileo och undersöka vad Galileo skulle tillföra RTK-mätning tillsammans med GPS i SWEPOS. Det var inte möjligt under våren 2016 att utföra mätningar mot enbart Galileo då det vid tidpunkten för mätningarna inte fanns tillräckligt många satelliter i omloppsbana. Resultaten från mätningarna i denna studie tyder på att Galileo tillför bättre satellittäckning vid RTK-mätning tillsammans med GPS, andelen fixlösningar ökar, tiden till att fixlösning erhålles blir kortare och satellitgeometrin blir bättre. Det är däremot för tidigt att med säkerhet uttala sig om Galileos påverkan på positionsosäkerheten, både i plan och höjd.

## Abstract

Europe is presently building up a satellite navigation system of their own, Galileo. Unlike the American system, GPS, and the Russian system, GLONASS, Galileo will be a civilian system. It will be independent from, but interoperable with both GPS and GLONASS. After many delays have enough satellites been launched and placed in orbit to make it possible to start up Galileo's initial services during December 2016. This study gives an account of the construction and development of the Galileo system.

During two weeks in the spring 2016 experimental RTK measurements were made with Galileo combined with GPS where the satellite corrections were distributed from Lantmäteriet's (the Swedish mapping, cadastral and land registration authority's) support system for satellite positioning, SWEPOS. The measurements were carried out with single-station RTK towards a SWEPOS reference station at Mosebacke on Södermalm in Stockholm. The rover was placed over a fixed point about 1.2 km from the reference station. The purpose of the study was to determine if it was possible in the spring 2016 to make any measurements with Galileo and to see what Galileo can add to RTK measurements combined with GPS in SWEPOS. During the spring 2016 it was not possible to make any measurements with only Galileo satellites due to the fact that there were too few satellites in orbit. The results from the measurements indicate that combining Galileo and GPS could be positive for network RTK in SWEPOS. The part of achieved fixed solutions increases, the average time until fixed solution is achieved shortens and the space vehicle geometry (PDOP) gets a better value when combining GPS and Galileo. It is however too soon to say anything certain about the influence of Galileo on the position uncertainty.

# Inledande försök till mätning med Europas navigeringssystem Galileo

	<b>Förord</b>	<b>5</b>
	<b>Författarens förord</b>	<b>7</b>
	<b>Sammanfattning</b>	<b>9</b>
	<b>Abstract</b>	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>13</b>
1.1	Syfte och frågeställningar	13
<b>2</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>14</b>
2.1	Geodesi	14
2.2	Geodetiska referenssystem	14
2.2.1	ITRS	14
2.2.2	ITRF	15
2.2.3	GTRF	16
2.2.4	WGS 84	16
2.3	GNSS	17
2.3.1	SBAS – Satellite Based Augmentation System	18
2.3.2	SWEPOS	18
2.4	<b>Satellitnavigering</b>	<b>20</b>
2.4.1	Tidens betydelse	21
2.5	<b>Felkällor vid satellitmätning</b>	<b>21</b>
2.5.1	Atmosfärsfel och flervägsfel	21
2.5.2	Mottagarrelaterade fel	23
2.5.3	Satellitrelaterade fel	23
2.6	<b>Positionsbestämning</b>	<b>23</b>
2.6.1	Kodmätning	23
2.6.2	Bärvågsmätning/fasmätning	24
2.6.3	RTK – Real Time Kinematic	24
2.6.4	Nätverks-RTK	25

2.7	Galileo	25
2.8	Navstar GPS	25
2.9	Kombination av Galileo och Navstar GPS	25
<b>3</b>	<b>Galileo</b>	<b>27</b>
3.1	GSTB-V1 (Galileo System Test Bed - Version 1)	27
3.2	GSTB-V2/GIOVE (Galileo In Orbit Validation Element)	28
3.3	Galileo IOV (In-Orbit Validation) -fasen	30
3.4	Full Operational Capability	31
3.5	Frekvensområden och signaler	36
3.6	Galileos tjänster	36
<b>4</b>	<b>Fältmätningar</b>	<b>39</b>
4.1	Mätpunkt	39
4.2	Instrument	40
<b>5</b>	<b>Metod</b>	<b>42</b>
5.1	Enkelstations-RTK mot Mosebacke	42
5.2	Utförande	42
5.3	Intressanta värden	44
5.4	Grundläggande statistik	44
5.5	Statistiska uträkningar	45
<b>6</b>	<b>Resultat</b>	<b>46</b>
<b>7</b>	<b>Diskussion och slutsats</b>	<b>49</b>
7.1	Diskussion	49
7.1.1	Vad kunde göras annorlunda?	51
7.1.2	Galileo	51
7.2	Slutsatser	51
7.3	Rekommendationer inför framtida studier	52
	<b>Referenser</b>	<b>53</b>
	<b>Appendix 1</b>	<b>61</b>
	<b>Appendix 2</b>	<b>62</b>
	<b>Appendix 3</b>	<b>63</b>
	<b>Appendix 4</b>	<b>65</b>
	<b>Appendix 5</b>	<b>70</b>

# Inledande försök till mätning med Europas navigeringssystem Galileo

## 1 Inledning

Europa är på väg att få ett eget satellitnavigeringssystem, Galileo. Det är för närvarande (hösten 2016) under uppbyggnad och i maj 2016 sköts den 13:e och 14:e operativa satelliten upp och i november 2016 sköts satellit 15 till 18 upp på en ny typ av raket som tar fyra satelliter. Efter uppskjutningarna lades de i sina omloppsbanor och genomgår den inledande utvärderingen innan de tas i bruk senare under vintern. I december 2016 finns det nu tillräckligt många satelliter på plats så att det går att starta inledande tjänster i det nya systemet. Hela systemet beräknas bli fullt utbyggt, med 30 satelliter, under 2020. Redan innan Galileo blir tillgängligt för allmänheten är det intressant att se hur påverkar osäkerheten vid mätning tillsammans med andra satellitnavigeringssystem så som GPS. I detta arbete belyses Galileo. Testmätningar gjordes mot Galileo kombinerat med det amerikanska systemet Navstar GPS där korrigeringsdata tillhandahölls från Lantmäteriets stödsystem SWEPOS. Mätningarna utfördes under våren 2016 med en kombination av GPS- och Galileosatelliter då det vid mättillfället fanns för få Galileosatelliter i omloppsbanan för att kunna göra mätning mot enbart Galileo. Det krävs också att mottagarna kan ta emot och bearbeta de nya Galileosignalerna. Mätningarna gjordes med enkelstations-RTK och en specialinställning från SWEPOS för mätning mot enbart en av deras referensstationer.

### 1.1 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna studie är att undersöka om det våren 2016 är möjligt att göra mätningar mot det europeiska navigationssystemet Galileo och att se vad Galileo kan tillföra mätningar med det svenska stödsystemet SWEPOS samt att belysa Galileo i sig. Studien ska svara på följande frågeställningar:

- Är det i dagsläget möjligt att använda enbart Galileo för positionsmätning?
- Vad tillför Galileo vid RTK-mätning tillsammans med det amerikanska Navstar GPS i SWEPOS?
- Blir osäkerheten mindre vid mätning tillsammans med Galileo än med bara GPS?

## 2 Bakgrund

### 2.1 Geodesi

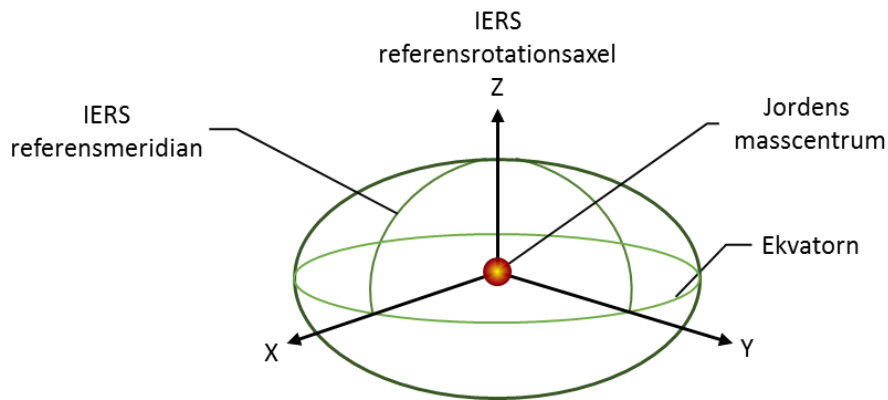
Geoiden är en teoretisk yta där tyngdkraftspotentialen är lika över hela ytan. För nästan 200 år sedan beskrev den tyska matematikern Carl Friedrich Gauss denna yta som "jordens matematiska form" och benämningen geoid introducerades nästan 50 år senare av hans doktorand Johann Benedict Listing (Dragomir m.fl., 1982). Det är denna yta man syftar på då man pratar om "höjd över havet". På grund av den ojämnt fördelade massan över jordklotet får geoiden en ojämn form. För att kunna avbilda jorden används en ellipsoid, det vill säga, ett avplattat klot. Då geoiden är knölig är inte ellipsoiden en perfekt form att använda men tillräckligt bra för att kunna användas till att göra beräkningar för avbildningen på.

### 2.2 Geodetiska referenssystem

Tidigare var det vanligt med en ellipsoid som anpassats lokalt till den del av världen som skulle avbildas. Då hade olika länder egna ellipsoider med olika placering inom geoiden och olika storlek. I Sverige användes till exempel Bessels ellipsoid som blev definierad 1841. Måtten på axlarna, deras orientering och placeringen av ellipsoiden (oftast som bestämning av lodavvikelse och geoidhöjd i någon punkt) eller ellipsoidens mittpunkt i förhållande till med geoidens tyngdkraftscentrum, kallas för ett geodetiskt datum (Alm, 2003).

#### 2.2.1 ITRS

Sedan satelliterna kommit i bruk har ett globalt tredimensionellt referenssystem (Fig. 1), ITRS (International Terrestrial Reference System) matematiskt tagits fram med origo i jordens masscentrum och som roterar med jorden så att inga tidsskillnader uppstår jämfört med jordytan. Dess definition bestämdes ursprungligen av Bureau International de L'Heure (BIH) för BIH Terrestrial System epok 1984.0 (BTS 84, definitioner i Appendix 1) och har sedan dess antagits av International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) till ITRS-systemet (Malys, 2015). IERS referensrotationsaxel och nollmeridian sammanfaller med BIH:s referensaxel och nollmeridian till inom 0,005" på båda axlar (motsvarar ungefär 0,15 m vid ekvatorn). För att låsa fast ITRS till jordens yta används olika rymdgeodetiska tekniker på ett antal fasta referensstationer till att skapa en realisering av ITRS, bland andra ITRF och WGS 84.



*Figur 1 ITRS är ett globalt tredimensionellt högerhänt referenssystem med origo i jordens masscentrum och som roterar med jorden så att det inte blir någon tidsskillnad mot jordskorpan.*

## 2.2.2 ITRF

International Terrestrial Reference Frame (ITRF) är den internationella realiseringen av ITRS. Eftersom Jorden är dynamisk och plattetektoniken gör att bland annat den eurasiska kontinentalplattan rör sig bort från den amerikanska plattan med cirka två centimeter om året behöver ITRF uppdateras kontinuerligt. IERS håller reda på de tektoniska rörelserna genom att kombinera observationer gjorda med fyra olika rymdgeodetiska tekniker (Altamimi m.fl., 2016):

- Very Long Baseline Interferometry (VLBI) där flera radioteleskop, placerade utspritt över hela jorden, studerar samma astronomiska radiokällor samtidigt (Schilizzi, 1986).
- Satellite Laser Ranging (SLR) där spårningsteleskop mäter tiden det tar för laserpulserna att återvända efter att de blivit ivägskickade av en kortpulslaser till en konstellation av sfäriska prismor placerade på jordobservations- och navigationssatelliter, både jordnära och högt liggande geostationära, samt till månen där särskilda laserreflektorer är monterade (Appleby m.fl., 2016).
- Global Navigation Satellite Systems (GNSS) där de olika navigationssatellitssystemen har kontroll över dagliga jordorienteringsparametrar och markstationernas position (Altamimi m.fl., 2007).
- Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellites (DORIS) där ett nätverk av markbundna stationer skickar iväg en signal som tas emot av ett antal satelliter med DORIS-antenn och med hjälp av dopplereffekten går det att räkna ut avståndet mellan sändande station och mottagande antenn (Aviso, 2016).

De olika versionerna av ITRF är namngivna med senaste året varifrån observationerna för beräkningen av referensramarna

hämtas. Den senaste versionen heter ITRF2014. Den är framtagen med data från 1499 referensstationer för GNSS placerade på 975 platser spridda över hela jorden. ITRF2014 är den första versionen som även tar hänsyn till de ickelinjära förändringarna i jordskorpan (Altamimi m.fl., 2016).

### **2.2.3 GTRF**

Galileo Geodetic Service Provider (GGSP) utvecklade redan under Galileosystemets utveckling (under den så kallade Giove-fasen av Galileoprojektet, se nedan) en egen realisering av ITRS, Galileo Terrestrial Reference Frame (GTRF), genom att använda det experimentella marksegment som då byggdes tillsammans med signaler från GPS och Giovesatelliterna och ett antal referensstationer från ITRF. En del av stationerna är gemensamma för ITRF och GTRF så att systemen ska vara kompatibla med varandra (Gendt m.fl., 2011). GTRF ska vara en oberoende realisering av ITRS (Navipedia, 2014; Norin, 2015) och är definierat så att det ska vara kompatibelt med den senaste versionen av ITRF med en osäkerhetsnivå på tre centimeter vid en konfidensnivå på 95 % (Gendt m.fl., 2011). När Galileo är fullt utbyggt och aktiverat kommer GTRF att kunna underhållas genom att använda signaler från Galileosatelliterna. GGSP tillhandahåller även jordrotationsparametrar, satelliternas banparametrar och klockkorrektioner för både satelliter och markstationer (Gendt m.fl., 2011).

### **2.2.4 WGS 84**

Det amerikanska systemet GPS använder referenssystemet World Geodetic System WGS 84 sedan 1987. Det realiserades från början med ett antal kontrollstationer på marken med hjälp av Dopplerobservationer från den amerikanska flottans satellitnavigationssystem (Navy Navigation Satellite System). Systemet uppdateras vartefter jorden förändras och från 1994 introducerades en realisering baserad helt på GPS-observationer som knöts till jordytan med ett antal kontrollstationer på marken. Sedan dess får de nya realiseringarna namn efter vilken GPS-vecka (antal veckor sedan GPS-systemet startade) då det nya systemet implementerades i banparametrarna, exempelvis WGS 84 (G730) som startade midnatt, UT (Universell Time), den 2 januari 1994 (NIMA, 2000). Både ITRF och WGS 84 är realiseringar av ITRS och koordinater från samma epok (Tabell 1) i det ena systemet överensstämmer med det andra ner till tiocentimeternivå (QPS, 2016).



**Tabell 1** ITRF- och motsvarande WGS 84-realiering av ITRS (WGS 84 (G1674) och (G1762) är båda baserade på ITRF2008 och släpptes med ett och ett halvt års mellanrum).

ITRF	WGS 84	epok
ITRF91	WGS 84 (G730)	1994.0
ITRF94	WGS 84 (G873)	1997.0
ITRF2000	WGS 84 (G1150)	2001.0
ITRF2008	WGS 84 (G1674)	2005.0
ITRF2008	WGS 84 (G1762)	2005.0

## 2.3 GNSS

GNSS – Global Navigation Satellite System, är samlingsnamnet på de olika satellitnavigeringssystemen som finns. Det amerikanska Navstar GPS (NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System) är det äldsta systemet och det har använts sedan början av 1980-talet. Ryssland skapade snabbt ett eget system Glonass – GLObalnaya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema, eller "GLObal NAvigation Satellite System". Båda dessa system är uppbyggda och underhålls av militära organisationer, även om systemen främst används i civilt bruk. Många GNSS-mottagare kan kombinera GPS- och Glonass-signaler och därmed få bättre satellittäckning. Europa håller för närvarande på att utveckla ett eget satellitsystem, Galileo, som kommer att vara inriktat på civilt bruk och som kommer att vara fullt kompatibelt med GPS och Glonass. Galileo ägs och underhålls av Europeiska Unionen (EU) och den europeiska rymdstyrelsen (European Space Agency, ESA), vilka är civila organisationer, Kina håller på att utveckla ett eget system, BeiDou (kallas i äldre litteratur även Compass). Indien har ett eget system IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) som även fått namnet Navic. Både BeiDou och IRNSS är när närvarande inriktade för lokal användning men BeiDou håller på att byggas ut till ett globalt system kompatibelt med GPS, Glonass och Galileo (Norin, 2015).

Ett GNSS består av tre delar:

- **Rymdsegmentet** med satelliter i omloppsbanan runt jorden.
- Markbundna **kontrollstationer** som övervakar den exakta tiden, tillhandahåller navigationssignal och övervakar satelliternas banor, hälsa och integritet.
- **Användaren** som med hjälp av en GNSS-mottagare bestämmer var på jorden den befinner sig (ESA, 2005; gps.gov, 2016a).

### 2.3.1 SBAS – Satellite Based Augmentation System

Utöver navigerings satelliterna finns stödsystem med geostationära satelliter som hjälper till att minska osäkerheten och förstärka tillförlitligheten i positionsbestämningen vid användning av signaler från GPS (WAAS, 2015, ESA 2013a). Dessa kan förbättra osäkerheten till mellan en och två meter horisontellt och mellan två och tre meter vertikalt (ESA, 2009). Olika världsdelar har olika stödsystem men de fungerar på samma sätt. Europa har Egnos – European Geostationary Navigation Overlay Service, USA har WAAS – Wide Area Augmentation System. Japan har MSAS – Multi-Functional Transport Satellite Satellite Augmentation System (ESA, 2009).

### 2.3.2 SWEPOS

SWEPOS är Sveriges nät av fasta referensstationer för GNSS-mätning och positionsbestämning med nätverks-RTK och Differentiell GNSS (där skillnaden mellan två mottagare, varav den ena har kända koordinater, hjälper till att korrigera för bland annat atmosfärens påverkan) inom Sverige. Den består idag av ett rikstäckande nätverk av cirka 380 fasta referensstationer (Fig. 2) (SWEPOS, 2016a) med ca 35 km mellanrum i större delen av Sverige (Ohlsson, 2014).

Referensstationerna tar emot GNSS-signaler från alla fyra GNSS (Galileo och BeiDou är dock inte helt införda ännu) och skickar dem vidare till en driftledningscentral på Lantmäteriet i Gävle som bland annat bearbetar och räknar ut korrigeringar som sänds ut till användaren främst via mobilt internet. Systemet ger stöd för positionsbestämning i realtid med en osäkerhet på ned till centimeternivå (i SWEREF 99) genom nätverks-RTK-tjänsten (SWEPOS, 2016b) som använder data från totalt cirka 440 fasta referensstationer (SWEPOS, 2016a) där cirka 40 stycken ligger i grannländerna och runt 20 tillhör externa leverantörer (Norin, personlig kontakt, 2016). De tillhandahåller också en jonosfärsmonitortjänst, satellitprediktions-tjänst till hjälp för planering vid GNSS-mätning och en realtidmonitor där man får följa några referensstationer i realtid för att kunna utvärdera rådande mätförhållanden (SWEPOS,



*Figur 2 SWEPOS består idag av cirka 380 fasta referensstationer utspridda över hela Sverige. I SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst ingår dessutom cirka 40 referensstationer som ligger i grannländerna och runt 20 från externa leverantörer. Källa: SWEPOS Lantmäteriet.*

2016c). SWEPOS har även en beräkningstjänst dit det går att skicka in tvåfrekvensobservationer från statisk mätning och få tillbaka uträknade koordinater i referenssystemet SWEREF 99. Den kan exempelvis utnyttjas i de fall det är dålig täckning för mobilt bredband (SWEPOS, 2016d).

Referensstationerna är uppdelade i två klasser:

- Klass A är de stabilaste stationerna där GNSS-mottagaren är monterad på en betongpelare placerad på en stabil sprickfri berggrund och tillhörande utrustning placerad i en fristående bod med backupsystem i både kommunikation och strömförsörjning (Fig. 3). Dessa stationer används för att övervaka stabiliteten för klass B-stationerna (SWEPOS, 2016e).



*Figur 3* En klass A-station i Leksand med pelarmonterad antenn och tillhörande utrustning i en friggebod. Källa: SWEPOS Klassificering

- Klass B där mottagarna är placerade på taket på befintliga byggnader. Dessa är inte i sig lika stabila men övervakas kontinuerligt med hjälp av klass A-stationerna. De har inte heller samma backupströmförsörjning. Mätningarna i denna studie gjordes mot en klass B-station placerad på Södra teatern på Södermalm (Fig. 4).

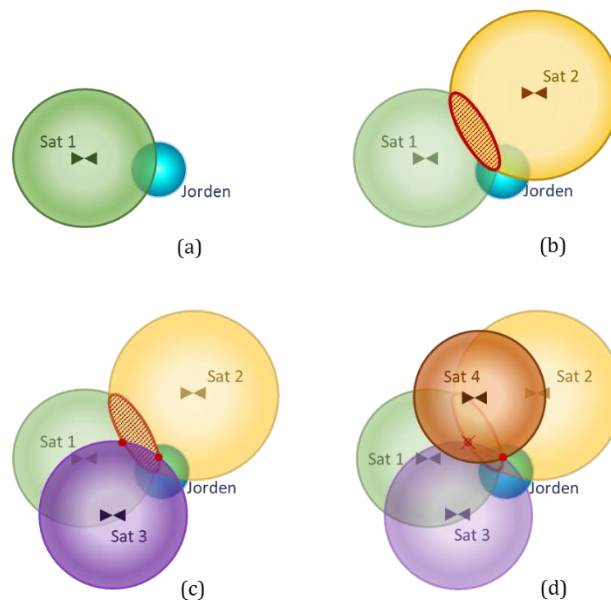


*Figur 4* SWEPOS-stationen Mosebacke, en klass B-stationen vid Södra teatern på Södermalm i Stockholm. Till vänster antennen monterad på taket och till höger dataskåpet med tillhörande utrustning. Foto: SWEPOS Lantmäteriet.

SWEPOS tillhandahåller data från 21 klass A-stationer som grund för det svenska referenssystemet SWEREF 99 (SWEPOS, 2016e). SWEPOS bidrar även med data till ett internationellt nätverk som upprätthåller ett europeiskt referens- och stödsystem som bland annat används till klimatforskning, övervakning av landhöjningen och andra rörelser i jordskorpan (SWEPOS, 2016f).

## 2.4 Satellitnavigering

För att kunna navigera med hjälp av satelliter behöver man ha tillgång till signaler från minst fyra satelliter samtidigt för att kunna bestämma de fyra okända faktorerna i en positionsbestämning; longitud, latitud, höjd och tidsfelet. Alla navigations satelliter har mycket exakta klockor som dagligen blir synkroniserade mot en referenstidsstation på marken. Navigeringssignalen och signalfrekvensen skapas med hjälp av dessa klockor och blir tidsmärkt. Alla GNSS-mottagare innehåller också klockor, dock inte lika exakta men de kalibreras med hjälp av satellitsignalen. Mottagaren producerar samma navigationskod och frekvens som signalen från satelliten. När mottagaren tagit emot signal från en satellit jämför den med den egenproducerade koden och kan då räkna ut en tidsskillnad. Då signalens hastighet är känd (ljusets hastighet i vakuum) är det möjligt att med tidsskillnadens hjälp räkna ut hur långt bort satelliten befinner sig (ESA, 2011). GNSS-mottagarens position fås genom trilateration (Fig. 5). Vid mätning mot en satellit erhålls sträckan till satelliten. Mottagaren befinner sig då någonstans på ytan av en teoretisk sfär runt satelliten (Fig. 5a). Vid avläsning mot två satelliter begränsas mottagarens position till den cirkel som skapas i skärningen mellan de båda satelliternas sfärer (Fig. 5b). Med tre satelliter avgränsas mottagarens placering till två skärningspunkter mellan de tre sfärerna, ofta hamnar då också ena punkten ute i rymden och det går att peka ut en position på jordytan (Fig. 5c). Med en fjärde satellit går det att hålla reda på tidsfelet och den hjälper till att utesluta den ena punkten från förhållandet med tre satelliter (Fig. 5d). Mätning mot fler satelliter ger bättre osäkerhet vid en positionsbestämning (ESA, satellitnavigering, 2016). I princip gäller att ju fler satelliter som finns tillgängliga över horisonten desto bättre möjlighet till låg osäkerhet i mätningen. Särskilt då det finns sikthinder till satelliterna är det bra att mäta mot satelliter från olika system då det är större chans till fri sikt till tillräckligt många satelliter (Norin m.fl., 2010). Däremot ställer det högre krav på GNSS-mottagaren då denna måste kunna ta emot och bearbeta signaler från olika satellitsystem.



**Figur 5** Trilateration, inbindning av en position med hjälp av tid. (a) En satellit placerar mottagaren på ytan av en sfär runt satelliten. (b) Två satelliter placerar mottagaren på cirkeln som bildas där två sfärer skär varandra. (c) Tre satelliter placerar mottagaren på två punkter där den tredje sfären skär föregående cirkel. (d) Den fjärde satelliten hjälper till att hålla reda på tidsfelet och eliminerar ena punkten från situationen i (c).

### 2.4.1 Tidens betydelse

Korrekt tid är viktig vid positionsbestämning då avståndet till satelliterna beräknas med hjälp av tiden det tar för signalen att nå mottagaren från satelliten. En nanosekunds fel hos en klocka ger ett positionsfel på ca 0,3 m, med en hel sekunds fel hamnar mottagaren 300 000 km fel (ESA, 2014a). Det kan jämföras med avståndet till månen på ungefär 384 400 km. Därför är det viktigt att alla inblandade klockor är synkroniserade. Satelliterna har dagligen kontakt med markstationer på jordytan som i sin tur är uppkopplade mot en mycket exakt tidscentral (ESA, 2014a; USNO, 2016). Navigationsmeddelandet från satelliterna innehåller en korrektion till satellitklockorna så att de satelliter som är inblandade och mottagaren är bättre synkroniserade (ESA, 2014a). Galileo kommer att ha koordinat- och tidsreferenssystem som är oberoende av GPS-systemet och då minska gemensamma felkällor (Norin, 2015).

## 2.5 Felkällor vid satellitmätning

De största felkällorna, förutom användarrelaterade fel, kan delas in i tre grupper; atmosfärs- och flervägsfel, mottagarrelaterade och satellitrelaterade fel (Lantmäteriet m.fl., 2013).

### 2.5.1 Atmosfärsfel och flervägsfel

Satellitensignalen fördröjs av atmosfären. Atmosfären kan delas in i två delar som påverkar signalen olika. Den övre delen är den elektriskt

aktiva jonosfären som ligger mellan cirka 50 till 1 000 km över jordens yta och den nedre delen är den elektriskt neutrala troposfären som ligger mellan cirka 0 och 15 km över jordytan (Lantmäteriet m.fl., 2013). Jonosfären är den del som har klart störst påverkan på satellitsignalen (Emardson m.fl., 2009).

Jonosfären påverkas av solens UV-strålar så att fria elektroner inverkar på satellitsignalerna, fasmätningar accelereras och kodmätningar bromsas upp. Antalet fria elektroner har betydelse för jonosfärens inverkan på satellitsignalen (Lantmäteriet m.fl., 2013) och varierar över tid, bland annat på grund av solens aktivitet och dygnsvariationen (Ohlsson, 2014). Olika frekvenser påverkas olika mycket av jonosfären. Utan korrektion kan påverkan av jonosfären vara så stor som 20 till 30 m (Lantmäteriet m.fl., 2013). Det går att reducera jonosfärens påverkan genom att kombinera olika frekvenser vid mätning (Ohlsson, 2014) och genom relativ mätning (Lantmäteriet m.fl., 2013). Det finns också jonosfärskorrektionsmodeller, till exempel har det inom Galileoprojektet lagts ned mycket arbete för att få fram förbättrade jonosfärskorrekationer (EC, 2015b).

Troposfärens fördröjning av satellitsignalen kan delas in i två delar, en torr och en våt del. Inom troposfären påverkas alla frekvenser lika. Det går inte att eliminera dess påverkan genom att kombinera olika frekvenser vid mätningar. Den torra delen kan orsaka mellan cirka 2 och 12 meters fördröjning beroende på vilken elevation satelliten har om den inte korrigeras för, men med bra korrektionsmodeller går felet ned till centimeternivå. Den våta delen, med moln och vattenånga, är svårare att förutse vilket gör den svårare att modellera. Däremot är påverkan mycket mindre, bara ca 10 % (vilket motsvarar cirka 0,2 till 0,5 m) av totala troposfärfelet (Lantmäteriet m.fl., 2013).

Flervägsfel orsakas av den omgivande miljön, så som husfasader, vattenytor och blöt mark, som kan reflektera satellitsignalerna så att signalen gått längre sträcka innan den träffar GNSS-antennen. Det ger ett för långt avstånd till satelliten och kallas flervägsfel. I teorin kan felet bli upp till 70 m vid C/A-kodmätning, 7 m vid P-kodmätning och 5 cm vid fasmätning. För att minimera felet kan man bland annat mäta över samma punkt under längre tid (Lantmäteriet m.fl., 2013). Mätning mot fler satelliter eller göra fler mätningar mot olika satellitkonstellationer minskar också flervägsfelets inverkan. Valet av antenn kan också påverka, nyare antenner kan hantera flervägsfelet bättre än äldre modeller (Odolinski, 2010). I praktiken kan storleken på felet vara några meter vid navigering och på centimeternivå vid relativ mätning (Lantmäteriet m.fl., 2013).

## 2.5.2 Mottagarrelaterade fel

Det behöver vara relativt fri sikt mellan mottagare och de satelliter den mäter emot. Sikthinder, så som hus, berg och träd stänger antingen ute satelliter eller förvränger satellitsignalen så att positionsbestämningen försvåras. Lövträdens utslagna kronor kan stänga ute satellitsignalen helt men barrträdens kronor delvis släpper genom signalen. Mätning i eller i närheten av en lövskog kan bli bra under förutsättning att tillräckligt många satelliter är tillgängliga. Mätning påverkas negativt då inte hela signalen når mottagaren eller går längre sträcka genom att reflekteras mellan grenarna (Lilje m.fl., 2007).

Den position mottagaren beräknar från satellitsignalerna är i praktiken positionen för GNSS-antennens elektriska centrum. Det är en virtuell punkt som kan variera lite beroende på signalens elevationsvinkel. Variationerna ligger på centimeternivå och för enklare antenner kan de ligga ännu högre. Variationerna elimineras till stor del med hjälp av antennmodeller från antenntillverkarna som modellerar detta (Lantmäteriet m.fl., 2013).

## 2.5.3 Satellitrelaterade fel

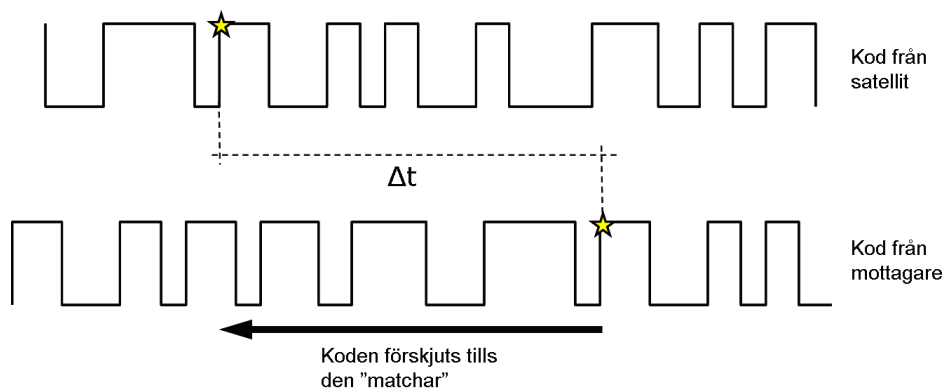
Ban- och klockkorrektionsparametrar är beräknade på observationer som har viss osäkerhet. Det medför att de beräknade satellitkoordinaterna och klockkorrelationerna får en viss osäkerhet. För de utsända banparametrarna ligger osäkerheten på 1 till 3 m och på centimeternivå för precisa banddata. Dessa elimineras vid relativ mätning (Lantmäteriet m.fl., 2013).

## 2.6 Positionsbestämning

### 2.6.1 Kodmätning

Alla navigeringssatelliter är modulerade med en kod som också samtidigt skapas i mottagaren. Koden är tidsmärkt och när mottagaren tar emot signaler från satelliterna och jämför den koden med koden som skapas i mottagaren blir tiden det tagit för signalen att nå mottagaren känd (Fig. 6). Då hastigheten på signalen är känd är det möjligt att räkna ut avståndet mellan mottagare och satellit. Detta avstånd brukar kallas pseudoavstånd eftersom det innehåller fel som orsakas av att klockan i mottagaren inte är helt synkron med satellitens klocka (Lilje m.fl., 2007). Denna metod ger en osäkerhet på ca tre meter (Lantmäteriet, 2016a).

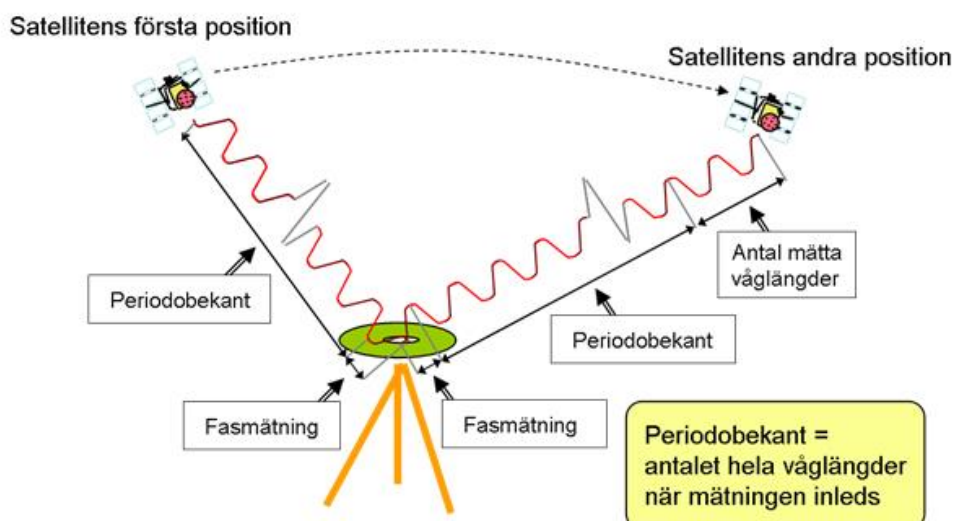




**Figur 6** Illustration av principen för kodmätning. Koden från satelliten jämförs med koden som skapas i mottagaren. Tidsskillnaden multipliceras med ljusets hastighet för att få fram avståndet mellan satellit och mottagare. Källa: Lantmäteriet, 2016a.

## 2.6.2 Bärvägsmätning/fasmätning

Vid fasmätning bestäms först antalet hela våglängder från satellit och mottagare på kodens bärväg, därefter del av den sista våglängden fram till mottagaren. Den metoden har en upplösning på några millimeter (Lilje m.fl., 2007). Bestämningen av hela våglängder kallas att nå en fixlösning där de periodobekanta är bestämda till korrekt heltal (Fig. 7). Denna metod kan ske direkt i mottagaren eller med efterbearbetning av insamlade data som laddas över till en dator och bearbetas med ett beräkningsprogram (Lilje m.fl., 2007).



**Figur 7** Avståndsmätning med bärväg. Först bestäms antalet hela våglängder, periodobekanta, och sedan del av sista våglängden, fasmätning. Källa: Lantmäteriet, 2016b.

## 2.6.3 RTK - Real Time Kinematic

RTK är positionsbestämning i realtid med centimeterosäkerhet. Till det behövs två GNSS-mottagare. Den ena etableras som en basstation (referensstation) över en punkt med känd position med fri sikt mot satelliterna. Den andra, en flyttbar rover, observerar samma satelliter som basstationen och mäter in olika punkter. Positionsbestämningen



sker genom bärvågsmätning både på basstationen och rovern och en länk via radio eller över ett mobilt telefoninät skapas mellan dessa för att kunna beräkna roverns position med en osäkerhet på under tre centimeter (Lilje m.fl., 2007).

#### **2.6.4 Nätverks-RTK**

Istället för att sätta upp en mottagare över en känd punkt används fler fasta referensstationer med kända positioner i ett nätverk. Dessa är sammankopplade med en central där uträkning av RTK-data för nätverks-RTK sker. Vid mätning av en punkt kontaktar rovern denna central och mätningen sker vanligtvis mot en virtuell basstation alldeles nära punkten som mäts in vilket ger en mätosäkerhet på en till två centimeter i plan och två till tre centimeter i höjdled (Emardson m.fl., 2009). När framtida GNSS-system (främst Galileo och BeiDou) är helt utbyggda förväntas osäkerheten halveras (Lantmäteriet, 2016c). Tiden det tar för mottagaren att nå fixlösning är av intresse. Tar det för lång tid kan man behöva starta om mätningen för att den ska bli relevant. Även åldern på data från centralen är relevant för resultatet (Norin m.fl., 2010).

### **2.7 Galileo**

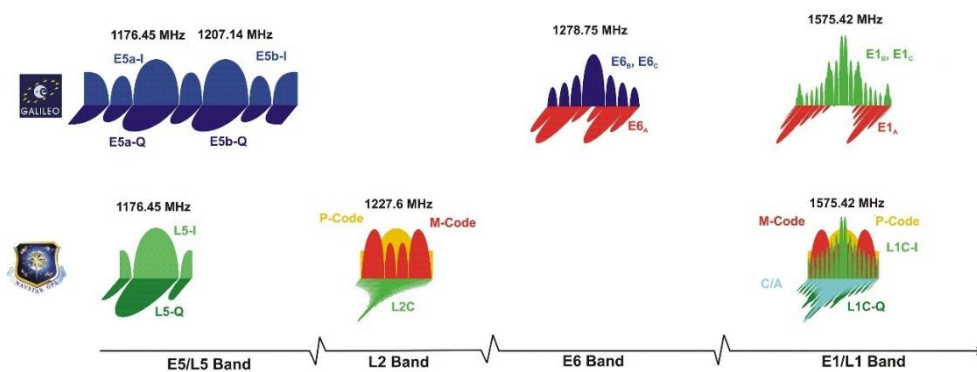
Galileo är Europas civila satellitnavigeringssystem som är under uppbyggnad. Uppbyggnad och utveckling av systemet finns beskrivet i kapitel 3.

### **2.8 Navstar GPS**

NAVSTAR GPS – NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System – ägs av USA:s regering och byggdes upp och drivs av det amerikanska flygvapnet – United States Air Force (en beskrivning av systemet finns i Appendix 4).

### **2.9 Kombination av Galileo och Navstar GPS**

Ett avtal ingicks 2004 mellan EU och USA om kompatibilitet mellan Galileos och Navstar GPS navigerings- och tidssignaler (Fig. 8) och tjänster (gov.uk, 2004). Designen av de nya civila signalerna GPS L1C och Galileos E1-signaler togs fram genom ett samarbete mellan EU och USA (EC, 2007). Detta gör att det kommer att vara möjligt att kombinera satelliter från de båda systemen, vilket medför att antalet tillgängliga satelliter kommer att öka och då göra det lättare för användarna att få mer exakta positionsbestämningar. Avtalet trädde i kraft 11 december 2011 (gov.uk, 2004).



*Figur 8 Galileos (överst) och GPS (undre raden) signaler. Gröna och blåa signaler är inte krypterade medan rött och gult är krypterade signaler. Källa: Navipedia, 2016a.*

## 3 Galileo

Galileoprogrammet är ett samarbete mellan EU-kommissionen och ESA. EU äger infrastrukturen och EU-kommissionen förvaltar och ansvarar för utveckling och säkerhet inom Galileo. Kommissionen rapporterar till EU angående fortskridande av satellitnavigeringsprogrammet (EC, 2011). Det ska vara fri tillgång till teknisk information angående signalerna som används inom Galileos öppna tjänster (Open Services) så att öppna marknaden ska kunna producera GNSS-mottagare och applikationer till allmänheten (EC, 2015a).

I början av 2000-talet inledde EU arbetet med att skapa ett civilt globalt satellitnavigeringssystem som skulle göra Europa oberoende av, men kompatibelt med, USA:s och Rysslands system (EC, 2016a).

Från början var planen att starta projektet med stödsystemet Egnos år 2004 och sedan fortsätta med Galileo som skulle vara fullt utvecklat och klart för användning 2008. Utveckling, skötsel och finansiering av systemet skulle vara kombinerat offentligt och privat (EC, 2002). År 2007 beslutade det europeiska rådet och Europaparlamentet, efter stora förseningar och avbrutna förhandlingar med privat sektor, att hela projektet skulle byggas upp och underhållas med offentlig finansiering och riskhanteringen skulle vara öppen och offentlig (EC, 2011). Det ledde till att EU blev ägare till Galileos infrastruktur. I samband med detta tillsattes EU-kommissionen som EU:s representant vid förvaltningen. När kommissionen tog över förvaltningen led hela projektet av stora förseningar, budgeten hade överskridits rejält och det fanns allvarliga problem med styrningen (EC, 2011). Vid omorganisationen överlät EU ansvaret för installation och vidareutveckling av Galileo och Egnos till ESA (EC, 2011).

### 3.1 GSTB-V1 (Galileo System Test Bed - Version 1)

Tidigt i projektet ville man se om det var möjligt att tillhandahålla den låga osäkerhet och höga standard som planerats. Under 2002 utvecklade ESA ett experimentellt marksystem som bestod av ett världsomspännande nätverk av sensorstationer som samlade in högkvalitativa observationer från det amerikanska systemet GPS, en experimentell tidsprecisionsstation, Istituto Elettronico Nazionale (IEN) tidslaboratorium i Italien, som tillhandahåller referenstidsskala synkroniserad med internationell atomtid UTC/TAI (Coordinated Universal Time/ International Atomic Time) och en processcentral belägen i ESA:s kontrollstation i Nederländerna. Processcentralen genererade navigations- och integritetsdata baserade på Galileoliknande algoritmer. Dessa experiment visade att det var

möjligt att tillhandahålla omloppsbaneberäkningar och tidssynkronisering med låg osäkerhet, bättre än 0,5 m med en uppdateringsfrekvens på två timmar, vilket var förhoppningarna för Galileosystemet (ESA, 2007a; ESA, 2010a).

Under den första experimentella testdelen, GSTB-V1, var huvudsyftet att utvärdera och dämpa de problem och risker som dyker upp när man skapar ett nytt system från grunden. Det gjordes genom att utforma och testa algoritmer för beräkning av banparametrar och tidssynkronisering samt utveckla de parametrar som håller reda på systemets hälsa och tillförlitlighet (ESA, 2004a). Dessutom utarbetades ett experimentellt Galileotidsnätverk med mycket stabila klockor (tre cesium- och en passiv vätemaserklocka för att försäkra både korttids- och långtidsstabilitet i tidmätningen) i ett klimatkontrollerat rum hos IEN i Italien sammankopplat med två tidslaboratorier i Tyskland och England (ESA, 2004b).

- En tidcentral som levererade en mycket exakt tid för synkronisering av hela systemet. Anläggningen var belägen i IEN i Italien (ESA, 2004b).
- En dataserveranläggning som tog emot alla insamlade GPS-observationer, från det världsomspännande nätverket av sensorer, sammanställde och lagrade dem. Denna anläggning övervakade och kontrollerade också de delar som rapporterar problem och larmar kontrollcentret. Anläggningen var belägen i ESA ESTEC i Nederländerna (ESA, 2016a).
- En anläggning som analyserade osäkerheten i hela systemet, bland annat i sensornätverket och klocksynkroniseringen, gav en uppskattning på signalfelet samt finjusterade algoritmer och parametrar. Anläggningen var belägen i ESA ESTEC i Nederländerna (ESA, 2004d).
- En anläggning som analyserade osäkerheten i hela systemet, bland annat i sensornätverket och klocksynkroniseringen, gav en uppskattning på signalfelet samt finjusterade algoritmer och parametrar. Anläggningen var belägen i ESA ESTEC i Nederländerna (ESA, 2004d).

### **3.2 GSTB-V2/GIOVE (Galileo In Orbit Validation Element)**

Nästa steg var att skicka upp två experimentella satelliter (Fig. 9 och 10) för att säkerställa anspråken på Galileos frekvensband som tilldelats från International Telecommunications Union och undersöka hur satelliterna och signalerna påverkas av omgivningen i de omloppsbanor som planerats för Galileos satelliter samt testa den nya tekniken och de mycket avancerade atomklockorna som tagits fram för Galileoprojektet. De två satelliterna togs fram och

tillverkades parallellt av två olika tillverkare i Europa för att kunna hålla den snäva tidsram som var satt (ESA, 2007a; ESA, 2010a).

GIOVE-A skickades upp i omloppsbana 28 december 2005 och innehöll bland annat en fasindelad L-bandsantenn, två uppsättningar av signalskapande enheter varav den ena skapade en enkel Galileosignal och den andra som skapade en mer realistisk Galileosignal och två småskaliga rubidiumklockor med en osäkerhet på tio nanosekunder per dag (ESA, 2010b).



*Figur 9 GIOVE-A (illustration). Källa: ESA - P Carril.*



*Figur 10 GIOVE-B (illustration). Källa: ESA - P Carril.*

GIOVE-B skickades upp i omloppsbana 27 april 2008 och innehöll bland annat en fasindelad L-bandsantenn, en signalskapande enhet med större flexibilitet att skapa olika typer av signaler, en rubidiumklocka med osäkerheten tio nanosekunder per dag och en passiv vätemaserklocka med en osäkerhet på en nanosekund per dag, vilket idag (hösten 2016) är den mest

exakta klockan i rymden (ESA, 2010b).

De satelliter som Galileosystemet kommer att bestå av är särskilt framtagna från grunden med erfarenhet från Giove-projektet om bland annat strålningsmiljö och hur nyttolasten och osäkerheten påverkas av omgivningen inom och utanför satellitfarkosten. Giove-projektets satelliter var framtagna med modifierade redan existerande satellittekniker (ESA, 2012).

Giove-projektet gav utvecklarna god erfarenhet av hur satelliterna påverkas av den kosmiska strålningen vid den höjden och hur atmosfären påverkar satellitsignalerna (ESA, 2007a). Resultatet har haft stort värde för vidare utveckling av Galileosystemet, både rymd- och marksegmenten (ESA, 2010c)

Inför Giove-steget byggdes en egen kärninfrastruktur upp, speciellt utformad för Galileos kommande satelliter. Det bestod av ett världsomspännande nätverk med tretton mottagare placerade på europeisk mark. Dessa mottagare tog emot och vidarebefordrade råa GPS- och Galileosignaler till Gioves processcenter i ESA ESTEC i Nederländerna (ESA, 2007b). Därutöver fortsatte det experimentella systemet från GSTB-V1 att användas för bland annat tidssynkroni-

seringen. Under Giove-projektet utvecklades kontrollsystemet och det insamlades mycket erfarenhet hur satelliterna och deras nyttolast beter sig på plats i rymden. Man undersökte också hur de nya delarna i navigeringssignalerna beter sig och hur GNSS-mottagare kan arbeta med flera signaler samtidigt samt deras svagheter i fasta och rörliga situationer för att bättre kunna beräkna påverkan av det nya systemet för navigering och andra planerade användningsområden (ESA, 2007b).

Ett samarbete mellan olika rymdforskningscenter bland andra det tyska Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), det franska Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) och det kanadensiska Canadian Space Agency låg till grund för experimentets framgång. De hade alla tillgång till samma data som de bearbetade oberoende av varandra och redovisade sina metoder och resultat hos Gioves processcenter (ESA, 2007b).

När det sedan var dags att skicka upp fullskaliga Galileosatelliter inför nästa utvärderingsfas (IOV) fick GIOVE-A och GIOVE-B flytta på sig för att göra plats för de nya satelliterna. GIOVE-A flyttades redan 2009 upp ca 100 km till en satellitgravomlopps bana där den fick fortsätta vara aktiv för att ge forskarna uppgifter hur satellit och nyttolast beter sig när de blir äldre och samla mer information om hur den varierande strålningen från solen och universum påverkar nyttolast och satellit. GIOVE-B användes under sommaren 2012 till att finkalibrera nyttolasten på de båda fullskaliga Galileosatelliter som sköts upp 2011. Därefter stängdes nyttolasten ned och GIOVE-B flyttades till en satellitgravomlopps bana ca 300 km över den ursprungliga. Både GIOVE-A och -B var utformade att hålla i 27 månader men de hade varit aktiva i 78 respektive 50 månader innan de helt stängdes ned i juni respektive augusti 2012 (ESA, 2012).

### 3.3 Galileo IOV (In-Orbit Validation) - fasen

När EU-kommissionen tog över förvaltningen 2008 efter en hel del förseningar tog projektet fart (ESA, 2013b). Nästa steg var att utvärdera systemet med fullskaliga satelliter med komplett nyttolast i omlopps bana (Fig. 11). Detta steg kallas Galileo In-Orbit-Validaton (IOV) och består av fyra satelliter uppskjutna i par i oktober 2011 respektive oktober 2012 (ESA, 2014b). Dessa fyra satelliter användes till att säkerställa och utveckla



*Figur 11 De två första Galileo IOV-satelliterna i omlopps bana (illustration). Källa: ESA – P Carril.*

funktionaliteten i systemets alla delar (rymd-, mark- och

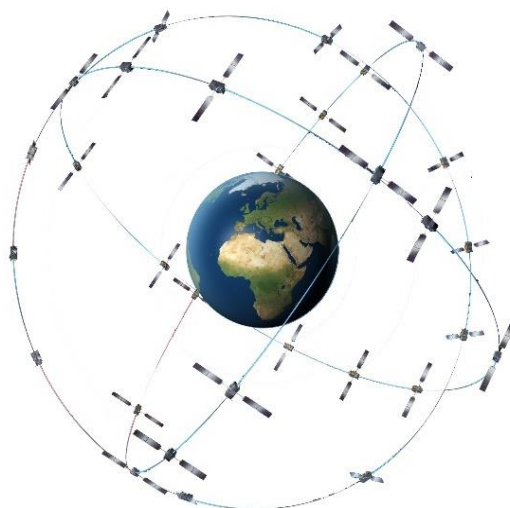
användarsegmenten) genom grundliga test både i omloppsbanan och på marken (ESA, 2013b). Fyra satelliter är ett minimum för att kunna göra positionsbestämning vilket är anledningen till att Galileos IOV-fas var uppbyggt så. IOV-satelliterna kommer sedan att utgöra en del av hela Galileosystemet (ESA, 2014b). Den 12 mars 2013 utfördes den första positionsbestämningen på marken genom ett lyckat samarbete mellan rymd- och marksegmenten. Detta skedde vid Navigationslaboratoriet i ESTEC i Nederländerna. Därefter följde många tester i bland annat Belgien, Frankrike, Tyskland, Italien och Nederländerna. IOV-fasen avslutades i oktober 2013 och man slog fast att systemet kan leverera efter förväntningarna. Nästa steg var att utöka systemet med satelliter och markstationer för att det ska kunna ge den låga osäkerhet man eftersträvar (ESA, 2014b; ESA, 2016b).

### 3.4 Full Operational Capability

När hela systemet är fullt utbyggt kommer Galileo att ha 30 satelliter jämnt fördelade i tre omloppsbanor (Fig. 12) med tio satelliter i varje varav åtta kommer att vara aktiva och två i standby (ESA, 2016c; EC, 2015a). Varje satellit har en omloppstid på cirka 14 timmar. Satelliterna kommer att vara jämnt fördelade över hela omloppsbanorna som ligger på ungefär 23 222 km:s höjd över jorden och de har en inklination (vinkel) på  $56^\circ$  mot ekvatorn. De vänder ungefär i höjd med Ölands södra udde. Detta är i sig inte så mycket högre än GPS som vänder vid  $55^\circ$ , i höjd med Bornholm, men då Galileo-satelliternas omloppsbanan ligger ca 3 000 km högre än GPS tillhandahåller de ändå en lite bättre navigationssignaltäckning över de norra breddgraderna (Bartolomé m.fl., 2015).

Samma satellitkonstellation kommer att upprepas med tio dagars mellanrum, då har varje satellit passerat samma ställe på jorden 17 gånger. Placeringen av satelliterna är framtagen för att få bättre tillgänglighet i de polära områdena där täckningen för GPS är gles (ESA, 2016c) och för att undvika för stor påverkan från jordens gravitation så att inte positionen i omloppsbanan ska behöva justeras alls under satellitens livstid efter den första optimeringen (Navipedia, 2015). När hela systemet är utbyggt kommer Galileos navigeringssignaler ge god täckning på breddgrader upp till cirka  $75^\circ$  vilket motsvarar Nordkap i norra Norge (ESA, 2015a).

Galileo kommer att vara en del i SAR (Search And Rescue service) vilket är en global räddningstjänst som Cospas-Sarsat tillhandahåller (beskrivning finns i Appendix 2).



*Figur 12 Galileos satellitkonstellation med 30 satelliter i tre banor med åtta aktiva satelliter och två i standby. Efter: ESA - P Carril.*

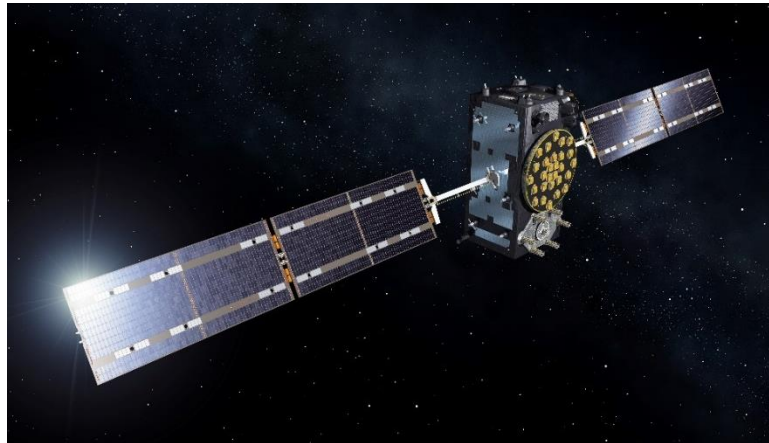
Tack vare fler signaler, ny satellitklockdesign och förbättrad uträkning av korrektioner för jonosfärstörningen utlovar Galileo lägre osäkerhet globalt. EU-kommissionen publicerade i juni 2015 ett öppet dokument med algoritmer för jonosfärskorrektioner som kan läggas in i enklare GNSS-mottagare (så som bilnavigatorer eller smartphones) som möjliggör extra låg osäkerhet globalt vid användning av enfrekvensmätning, även vid hög solaktivitet då solens påverkan på elektronik är hög (EC, 2015b). Kombinerat med GPS-satelliterna kommer både tillgängligheten till satelliter och osäkerheten förbättras. Särskilt i stadskärnor, där fri sikt mot de satelliter som ligger lägre på himmelen är begränsad, ger det ökade antalet satelliter större möjlighet till kontakt med tillräckligt många satelliter för en bra positionsbestämning (EC, 2016b).

De två första satelliterna (benämnda nummer 5 och 6) i nästa fas, FOC - Full Operational Capability, sköts upp i augusti 2014 men hamnade i felaktig, elliptisk, bana. Efter ett antal noga beräknade manövrar är de nu placerade i en bana som har bättre förutsättningar för framtida användning av satelliterna (Norin, 2015; ESA, 2016b). Deras bana är fortfarande mer utsträckt än de andra satelliternas banor som är närmast cirkulära. De felaktiga satellitbanornas höjd växlar med 8 500 km två gånger om dagen vilket har gjort dem mycket intressanta för forskare (ESA, 2015b). De utnyttjar den förlängda satellitbanan och använder data från dessa två satelliter under ett års tid till att bekräfta Einsteins relativitetsteori angående den krökta rumtiden (Delva m.fl., 2015). Det gör det också möjligt för Galileoprojektet att identifiera och ta bort systematiska felkällor (ESA, 2015b).

Hittills (november 2016) har fjorton fullskaliga satelliter (FOC-satelliter) (Fig. 13) skjutits upp och placerats i sina omloppsbanor (ESA, 2016d) vilket gör det möjligt att öppna upp Galileosystemet för



inledande tjänster och detta är beräknat att ske mot slutet av 2016 (ESA, 2015a).



*Figur 13 En FOC-satellit i omloppsbana (illustration). Källa: ESA – P. Carril.*

I dagsläget är totalt arton satelliter uppskjutna och ligger i omloppsbana. Av dessa är nio aktiva och fullt opererbara, sex stycken ligger i utvärderingsfasen (ESA, 2016e), två ligger i fel bana (ESA, 2016b) och kan inte användas fullt ut men kommer under 2016 att bli mer användbara efter anpassning av markstationer (Blonski m.fl., 2015) och signalerna från en av IOV-satelliterna är tills vidare ej tillgängliga (GSC, 2016).

Satelliternas storlek är 2,7 x 1,1 x 1,2 m och har ett 13 m brett solpanelsegel och de väger ca 700 kg. Varje satellit är utrustad med:

- En L-bandsantenn som sänder tio olika navigeringssignaler i frekvensspannet 1200–1600 MHz (ESA, 2016e).
- En SAR- (Search and Rescue) antenn (ESA, 2016e) som fångar upp nödsignaler från jordytan och sänder nödsignal och position till markstation i systemet Cospas-Sarsat, som sänder vidare till berörd räddningstjänst. Nytt på dessa satelliter är en tvåvägsantenn så att nödställd får bekräftelse att signalen är mottagen och att hjälp är tillkallad (ESA, 2007c).
- En C-bandsantenn som tar emot signaler från marksegmentet rörande synkronisering av satellitens klockor mot markstationens referenstid och information om alla satelliters status. Satellitstatusen bäddas in i navigeringsmeddelandet som skickas till användaren (ESA, 2016e).
- Två S-bandantennerna för spårning och övervakning av satelliterna i deras banor. De sänder statusinformation om klockor, navigationsenhet och styrdator samt satellitens hälsa till markkontrollen och får tillbaka kontrollkommandon nyttolasten. Med hjälp av S-bandantennerna övervakas också satellitens banhöjd med en osäkerhet till inom några meter (ESA, 2016e).

- Infraröda jord- och solsensorer som hjälper satelliten att känna av så att den hela tiden ligger med rätt sida mot jorden (ESA, 2016e).
- Laserreflektorer som finns för lasermätning av satellitens höjd till inom några centimeter, detta utförs bara cirka en gång per år då S-bandmätningen av banhöjden för det mesta är tillräckligt exakt (ESA, 2016e).
- Värmeradiatorer som hjälper till att hålla rätt och jämn temperatur för ombordvarande klockor och navigations-signalskapande enhet (ESA, 2016e).
- Två passiva vätemaserklockor som mäter tid med en osäkerhet på 0,45 nanosekunder under tolv timmar. Den ena är den aktiva masterklockan som producerar referens-frekvensen som navigationssignalen är genererad från. Den andra är med som reserv och startar upp om den första fallerar (ESA, 2016e).
- Två rubidiumklockor som mäter tid med en osäkerhet på 1,8 nanosekunder under tolv timmar. Den ena är aktiv och har som huvudsyfte att synkronisera satellitens klockor och navigationssignalskapande enhet men om masterklockan fallerar hoppar den aktiva rubidiumklockan in och tar över produktion av referensfrekvens tills de två inaktiva klockorna har startat upp och tar över inom några dagar. Då går den inhoppade klockan ned i stand-by och blir reservklocka. Den andra rubidiumklockan är med som reserv om den aktiva skulle falla (ESA, 2016e).

Satelliterna är byggda för att hålla i minst tolv år i omloppsbanan.

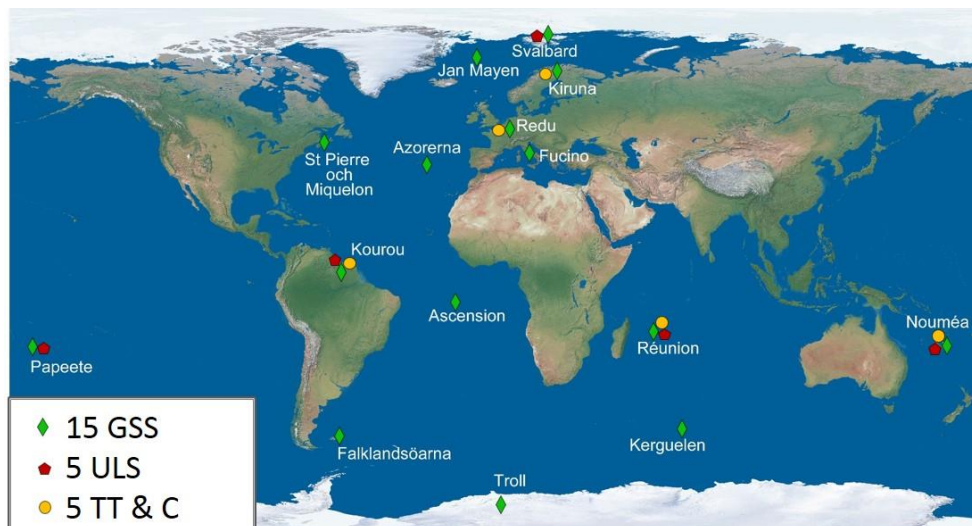
Marksegmentets uppgift är att tillhandahålla en exakt tid för synkronisering av satelliternas klockor och nyttolast, hålla reda på satelliternas position i omloppsbanan i förhållande till jorden och till de andra satelliterna samt se till att de behåller sin plats i omloppsbanan. Satelliterna påverkas hela tiden av jordens och månens dragningskraft och även solens konstanta strålning kan med tiden föra satelliten ur sin bana (ESA, 2013d).

Under 2015 uppgraderades hela Galileos marksegment, både maskinvara och program, för att kunna hålla den höga standard det är planerat för (Blonski m.fl., 2015). För närvarande består marksegmentet av:

- Två huvudkontrollcenter; Ground Mission Segment (GMS) i Fucino i Italien och Ground Control Segment (GCS) i Oberpfaffenhofen i Tyskland. Både GCS och GMC är fullt operativa. Tidigare var systemet uppdelat mellan dessa två, nu kan både GMS och GCS hantera hela systemet och är synkroniserade i realtid vilket gör att om ena anläggningen går ned fortsätter den andra utan avbrott (ESA, 2014c).

Kontrollstationerna inhyser parallellt två anläggningar för exakt tid (Precise Timing Facilities) som levererar en referenstid kallad Galileo System Time (GST). Ett världsomspännande nätverk tillhandahåller GST med hjälp av mycket stabila markbundna referenskllockor bestående av bland annat atomkllockor baserade på cesiums atomfrekvens. Den är mycket mer stabil över längre tid än vätemaser- och rubidiumkllockorna (ESA, 2014d). De två tidsanläggningarna dubbelkontrolleras mot den Internationella standardatomtiden av en grupp europeiska tidslaboratorier (ESA, 2014c).

- Ett nätverk bestående av femton Galileosensorstationer (GSS – Galileo Sensor Stations) för kontinuerlig täckning för klocksynkronisering och omloppsbaneberäkningar (ESA, 2014c). Dessa är utspridda över hela jorden (Fig. 14) (Blonski m.fl., 2015).
- Fem upplänkstationer (ULS – Up-Link Station) i Kourou i Franska Guyana, Nouméa i Nya Kaledonien, Réunion utanför Afrikas östkust, Svalbard i Arktis och Papeete i Franska Polynesien i Stilla havet (Blonski m.fl., 2015). Dessa sänder navigations- och integritetsdata till satelliterna (ESA, 2014c).
- Fem övervakningsstationer (TT&C – Telemetry, Trackning and Command) i Kiruna i norra Sverige, Kourou i Franska Guyana, Nouméa i Nya Kaledonien, Réunion utanför Afrikas östkust och Redu i Belgien (Blonski m.fl., 2015). Dessa håller reda på status och positioner för satelliterna.



**Figur 14** Galileos sensor-, övervaknings- och upplänkstationer placerade på europeisk mark utspridda över hela jorden efter uppgraderingen av marksegmentet. Efter Blonski m.fl., 2015.

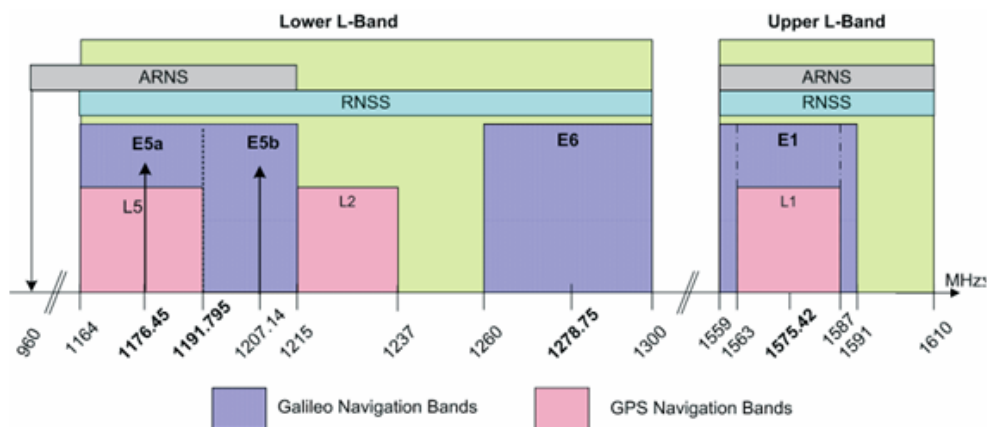
Uppgraderingen innebar en utökning av hela det markbundna systemet med fyra nya sensorstationer, två upplänkstationer och två övervakningsstationer. Utöver det ska systemet under 2016 anpassas till att kunna använda även de två satelliter som hamnat i avvikande

ana. Tester efter uppgraderingen visar på en tydlig förbättring gällande tiden och positionsbestämningen (Blonski m.fl., 2015).

### 3.5 Frekvensområden och signaler

Galileos navigationssignaler består bland annat av en ny typ av sammansatta signaler. De består av två delar. Den ena delen, datasignalen, innehåller navigationsdata och den andra, pilotsignalen, är en signal som sänds vinkelrätt mot datasignalen och hjälper till att förstärka signalen för att göra den lättare att urskilja mot bakgrundsbruset. Pilotsignalen innehåller inga navigationsdata, bara den egna spridningskoden. Navigationsdata inkluderar navigationskod, banparametrar (efemerider), beräknade satellitpositioner för hela systemet (almanacka) och satellitens klockfel (Lohan m.fl., 2015).

Galileo sänder tio navigationssignaler över fyra frekvensband; E1, E5a, E5b och E6 (Fig. 15) som moduleras med spridningskoder och i vissa fall även navigationsdata. Signalerna har fått namn efter de frekvensband de sänds inom (EC, 2015a). En närmare beskrivning av Galileos signaler återfinns i Appendix 3.



Figur 15 Galileos frekvenser med Galileos bärvågor markerade. Källa: Galileo OS SIS ICD, 2015.

### 3.6 Galileos tjänster

Galileo kommer att tillhandahålla fyra tjänster varav tre är navigationstjänster, både öppna (OS) och kodade (CS och PRS) (Tabell 2). Den andra (SAR) är dedikerad till räddnings- och restriktivare navigationstjänster.

**Tabell 2 Galileos tjänster och signaler (Galileos och GPS signaler och tjänster är sammanställda i Appendix 5).**

Tjänst	Galileos signaler									
	OS				CS				PRS	
Frekvensband	E1		E5a		E5b		E6		E1	E6
Bärvåg (MHz)	1575,420		1176,450		1207,140		1278,750		1575,420	1278,750
Kodfrekvens (Mbit/s)	1,023	6,138	10,23		10,23		5,115		2,5575	5,115
Signal-komponent	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Data
Längd på kod (tecken)	4092		10 230		10 230		5115		N/A	N/A
Repeteras efter	4 ms	4 ms	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	N/A	N/A	N/A	N/A

Open Services (OS) – den kostnadsfria tjänsten som tillhandahåller navigations- och tidssignaler som kan kombineras med andra GNSS-signaler. Den är öppen för allmänheten och ingen speciell mottagare behövs annat än att den kan ta emot och utföra beräkningar med Galileos signaler. Den kommer inte att ha någon tjänstgaranti och användaren får själv bedöma kvaliteten på signalen (ESA, 2010d). När hela systemet är utbyggt förväntas osäkerheten (med en konfidensnivå på 95 %) för positionering bli 15 m horisontellt och 35 m vertikalt vid enfrekvensmätning (single frequency) respektive 7 till 11 m horisontellt och 13 till 26 m vertikalt för tvåfrekvensmätning (dual frequency) vid mätning bara mot Galileo (Tabell 3) och med en elevationsgräns på 10° över horisonten. Vid kombinerad mätning med GPS förväntas en osäkerhet på 4 m horisontellt och 8 m vertikalt vid enfrekvensmätning och 3 till 4 m horisontellt och 6 till 8 m vertikalt vid tvåfrekvensmätning med en 10° elevationsgräns. Jonosfärens påverkan korrigeras genom en modell för enfrekvensmätningen och inkommande signaler vid tvåfrekvensmätningen (EC, 2002).

**Tabell 3 Förväntad osäkerhet för Open Services med en konfidensnivå på 95 % och en elevationsgräns på 10° över horisonten. Tillgängligheten på satelliter förväntas bli 99 % globalt.**

	Galileo OS enfrekvensmätning	Galileo OS + GPS enfrekvensmätning	Galileo OS tvåfrekvensmätning	Galileo OS + GPS tvåfrekvensmätning
Horisontell osäkerhet (m)	15	4	7-11	3-4
Vertikal osäkerhet (m)	35	8	13-26	6-8

Commercial Services (CS) – den kodade tjänsten som är avsedd för att användas för externa tjänsteleverantörer ska kunna tillhandahålla till exempel tjänster för mätning med Precise Point Positioning (PPP) med förbättrad osäkerhet. Den vänder sig till de som behöver större precision än den öppna tjänsten erbjuder. För att kunna använda denna tjänst behövs mer avancerade GNSS-mottagare med

licensnycklar som tillhandahålls av tjänsteleverantören (GSA, 2015). CS är belagd med en kostnad som då bland annat ger tjänstgaranti, tillgång till jonofärsstörningsmodeller och korrektionssignaler (ESA, 2010d).

Public Regulated Signal (PRS) - en kodad och extra stabil navigationstjänst. Extra motståndskraftig mot det som kallas spoofing, där felaktiga GNSS-signaler skickas i syfte att få mottagaren att beräkna fel position, och jamming, medvetna sändningar av radiosignaler i GNSS-frekvensområdet i syfte att störa ut GNSS-signalerna. PRS är primärt avsedd att användas av räddningstjänst och polis och kommer att vara strikt begränsad till de auktoriserade användarna (ESA, 2010d).

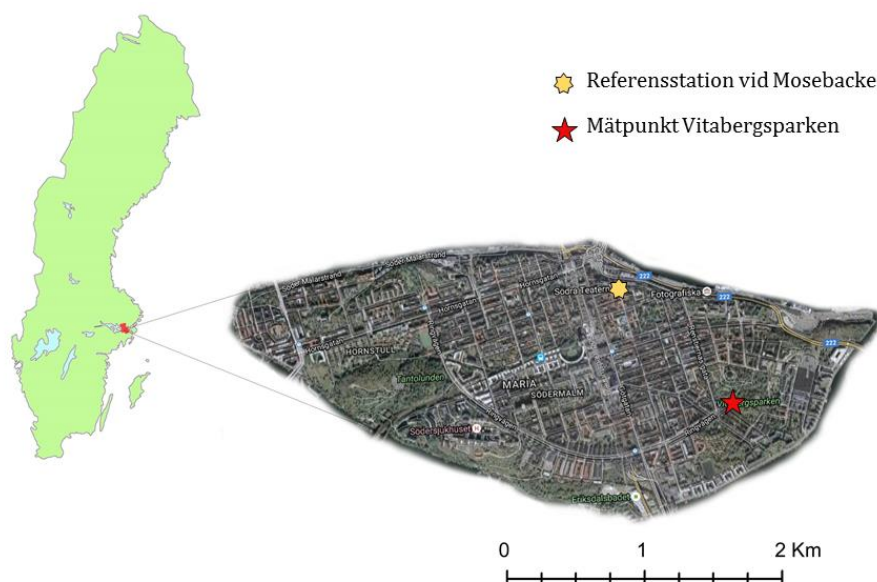
Search And Rescue (SAR) - den internationella räddningstjänsten som tillhandahålls av Cospas-Sarsat (Appendix 2).

Galileo kommer också att tillhandahålla satellitdata för att förbättra osäkerheten i Egnos Safety of Life (SoL)-tjänst. Den vänder sig till flyg- och båttrafik för sömlös täckning av hög navigeringsstandard även där markstationer saknas (ESA, 2014e).

## 4 Fältmätningar

### 4.1 Mätpunkt

Fältmätningarna omfattade testmätningar med enkelstations-RTK mot GPS- och Galileosatelliter med RTK-data från en referensstation för GNSS som ingår i SWEPOS. Mätningarna gjordes över en och samma punkt varje arbetsdag under två veckors tid i början av april 2016. Punkten består av Stockholms stadsbyggnadskontors stompunkt nr 136335. Koordinaterna i Northing och Easting för punkten i deras register är 6578702,669 och 675839,084 angivna i SWEREF 99 TM. Den är ett metallrör som är ingjutet i berghällen uppe i Vitabergsparken på Södermalm i Stockholm. Punkten ligger ca 1,2 km från SWEPOS-stationen, vid Södra teatern vid Mosebacke, mot vilken alla mätningar gjordes (Fig. 16).



**Figur 16** Flygbildskarta över Södermalm i Stockholm där mätningarna i denna studie utfördes. Mätpunkten i Vitabergsparken och referensstationen vid Mosebacke är utmärkta med röd respektive gul stjärna. Avståndet mellan dem (baslinjen) är ungefär 1,2 km.

Valet av punkt gjordes tillsammans med min handledare, Dan Norin, från Lantmäteriet i Gävle. Vid samma tillfälle (22 mars 2016) mättes punkten in med samma instrument som senare användes vid alla mätningar i denna rapport. Mottagaren fick mäta mot ordinarie nätverks-RTK-tjänst från SWEPOS under 30 minuter, en mätning per sekund och sedan beräknades medelvärdet. Då fick vi punkens koordinater angivna i SWEREF 99 TM och höjden i RH 2000:

N: 6578702,661

E: 675839,077

Höjd: 33,061

Mätpunkten ligger relativt öppet på en klippställning med några träd en liten bit bort (Fig. 17). Mot norr ligger Sofiakyrkan men den borde inte störa då satelliterna inte går så långt norr ut. Åt andra håll ligger hustak en bra bit bort och i ungefär samma höjd som punkten eller



något under, med ett elevationsfilter på tio grader över horisonten kommer de inte att spela någon roll. Mätperioden var innan lövsprickning vilket gör att störning från träd och buskage är så liten som möjligt.



*Figur 17* Mätpunkten belägen relativt öppet på en berghäll i närheten av lekparken i Vitabergsparken på Södermalm i Stockholm. I bakgrunden, mot norr, syns Sofiakyrkan.

Vi valde att använda de inmätta koordinaterna som referensvärden istället för stadsbyggnadskontorets koordinater. Anledningen till det är att stadsbyggnadskontorets värden togs fram via polygonmätning i flera steg vilket kan ses som en liten lokal version av SWEREF 99 med någon centimeters osäkerhet mot SWEPOS SWEREF 99 och att den senast inventerades för nio år sedan. Dessutom saknade deras punkt höjdvärde. Då denna studie mäter mot en SWEPOS-station valde vi att använda koordinaterna vi trodde skulle överensstämma bäst.

## 4.2 Instrument



*Figur 18* Rovern som användes i denna studie, Trimble R8-3.

GNSS-mottagare (rover): Trimble R8-3 (Fig. 18) med firmware-version 5.10 och bootversion 4.93.

Handdator: Trimble TSC3 med Trimble Access version 2015.022 (9930).

Positionsberäkningar gjordes direkt i fält med observationer från enkelstations-RTK med uppkoppling via mobilt internet mot SWEPOS driftledningscentral i Gävle där programvaran *Trimble Pivot Platform GNSS Infrastructure Software (TPP)* används.



Styrprogrammet i handdatorn har möjlighet att välja vilka satelliter som skall tas med i positionsberäkningen.

Mottagare från andra märken undersöktes också inför mätningarna men det var bara Trimble som vid mätningens tidpunkt hade möjlighet att använda sig av Galileos signaler. De andra var förberedda för Galileo men deras programvara var inte tillräckligt utvecklad för praktisk användning vid mättillfället.

## 5 Metod

### 5.1 Enkelstations-RTK mot Mosebacke

En av SWEPOS referensstationer är placerad på taket på Södra teatern vid Mosebacke, belägen cirka 1,2 km från mätpunkten (Fig. 19). SWEPOS driftledningscentral ordnade en anslutningspunkt med RTK-data baserad på bara den stationen för denna studie. Rovern kopplades upp mot SWEPOS via mobilt internet och mätningen gjordes direkt i fält. Koordinater och vissa kvalitetstal lagrades i mottagaren och tankades över till dator efter mätningarnas slut. Tidpunkt, tid till fixlösning och antal GPS- och Galileosatelliter respektive antecknades för hand. Innan mätstart antecknades väderförhållanden och antennhöjd. Tid till fixlösning mättes med handburet tidtagningsur. Alla tider under två sekunder tilldelades två sekunder då det blir för osäkert att ange mer precis tid.

Osäkerhet ligger i hur snabbt handdatorn kan redovisa vad som händer och hur snabbt man reagerar på vad handdatorn visar. Alla tider över tre minuter och de omgångar som inte nådde fixlösning alls ansågs som misslyckad fixbestämning och mätningen avbröts och ny uppkoppling mot SWEPOS-stationen initierades. Internetanslutningen kopplades ned mellan varje mätning. Då valdes också vilka satelliter som skulle användas i nästkommande mätning. I denna studie användes enbart satelliter i GPS- och Galileosystemen.

### 5.2 Utförande

Vid varje mättillfälle placerades stativet över mätpunkten och med hjälp av ett optiskt lod centrerades mottagaren över mätpunkten. GNSS-mottagaren placerades alltid i ungefärlig samma riktning med kontrollpanelen i riktning mot Sofiakyrkan. Höjden till antennen mättes med tumstock med millimeterskala, antecknades i mätprotokollet och lades in i mätprofilen i handdatorn. Väderförhållanden och lufttemperatur antecknades också i mätprotokollet.

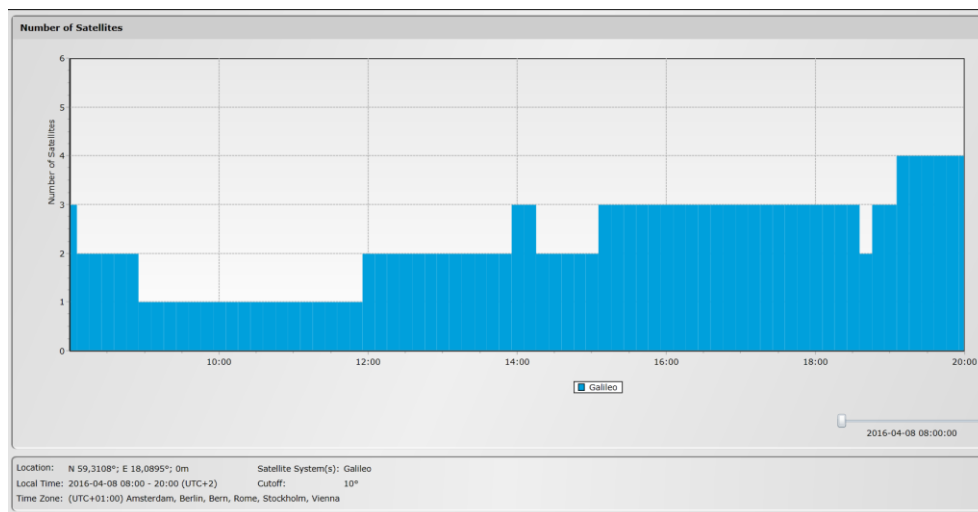
Efter uppstart av rover och handdator valdes de satelliter ut som skulle vara med i mätningen, de andra släcktes i handdatorn. Fem till sex GPS-satelliter och mellan noll och fyra Galileosatelliter valdes med en så bra spridning över himlen som möjligt. Orsaken till att maximalt sex GPS-satelliter användes var att försöka simulera en mer besvärlig mätmiljö med mer begränsad sikt mot satelliterna än vad det i verkligheten var. Fyra Galileosatelliter var det största antal som fanns över horisonten under hela mätperioden. Vid försök med enbart fyra GPS-satelliter eller med fyra GPS- och olika antal Galileosatelliter kunde fixlösning inte nås. En elevationsgräns på tio grader över horisonten användes, dvs. satelliter under tio graders vinkel över horisonten filterades bort för att undvika för mycket

störningar från atmosfär och omkringliggande bebyggelse och terräng.

När rovern kopplades upp mot SWEPOS-stationen mättes tiden till fixlösning och därefter utfördes en mätning med de valda satelliterna. En mätning består av medelvärdet av tio positionsavläsningar, med en sekunds mellanrum (en mätepok), som lagras i handdatorn. Därefter ändrades antalet satelliter och internetanslutningen kopplades ned innan ny uppkoppling gjordes och ny mätning med den nya satellitinställningen gjordes.

Tidpunkt för mätning skilde för olika dagar då valet av när mätning skulle ske valdes med största möjliga antal Galileosatelliter tillgängliga. De tidpunkter då enbart en Galileosatellit fanns tillgänglig valdes den bort automatiskt av GNSS-mottagaren. Valet av tidpunkt för mätning gjordes med hjälp av Trimbles satellitplaneringssida

<http://www.trimble.com/GNSSPlanningOnline/#/Settings>. På denna sida väljer man vilka system och satelliter man vill ha prediktion om. Figur 19 visar ett exempel på hur en sådan sida ser ut. Denna dag, 8 april, gick jag ut på eftermiddagen runt 16-tiden och mätte. Dagen innan hade vädret gjort att ett mättillfälle hade gått förlorat så jag beslutade att gå ut igen vid 19.30-tiden för att få fler mätningar med fyra Galileosatelliter.



**Figur 19** Trimbles satellitplaneringssida för 8 april 2016. Denna sida visar bara satelliter från Galileosystemet där dessutom satellitnummer 14, 18 och 20 inte är medräknade då dessa inte var tillgängliga för beräkning av position vid mättillfället

Vid två tillfällen påverkade andra saker mätmöjligheten, ena gången regnade och haglade det så kraftigt att det inte var möjligt att fortsätta med mätningarna. Andra gången var tekniska problem orsaken till missat mättillfälle. Den trådlösa uppkopplingen (Bluetooth) mellan rover och handdator slutade att fungera vilket gjorde mätningarna omöjliga att genomföra då alla kommandon skedde via handdatorn. Efter en hel del teknisk felsökning utan

resultat hittade jag en kommunikationskabel att använda vid nästa mättillfälle.

### 5.3 Intressanta värden

Totalt utfördes 261 mätningar där alla som blev fixlösning består av medelvärdet av tio positionsavläsningar med en sekunds mellanrum. Dessa lagrades i handdatorn för senare bearbetning.

Vid RTK-mätningarna mot SWEPOS lagrades följande värden i handdatorn:

- Koordinater i plan (E och N) i referenssystemet SWEREF 99 TM och höjden i RH 2000.
- Uppskattade värden för osäkerheten i mätningen i plan och höjd.
- Antalet satelliter, men inte fördelning mellan olika system – det fick man hålla reda på själv.
- Ett värde för satelliternas fördelning över himlen – PDOP.

Tiden till fixlösning fick man också hålla reda på själv.

De värden som var av intresse att titta på i denna studie är koordinaterna, antalet satelliter, tid till fixlösning och om det överhuvudtaget blev fixlösning inom tre minuter samt PDOP som står för Position Dilution of Precision. PDOP-värdet bör vara så lågt som möjligt (helst mellan ett och fyra) för att räknas som en bra mätning (Norin m.fl., 2010).

Dessa värden bearbetades statistiskt för att kunna utvärdera mätningarna och i slutändan kunna uppskatta vad Galileo tillför vid RTK-mätning med SWEPOS och bara GPS-satelliter.

### 5.4 Grundläggande statistik

I detta arbete används benämningen osäkerhet i stället för noggrannhet och standard-osäkerhet ersätter standardavvikelse i enlighet med den terminologi som GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) rekommenderar (JCGM, 2008) och som följs av Lantmäteriet.

*Medelvärdet  $\bar{X}$*

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Där  $\bar{X}$  är medelvärdet av  $n$  antal mätningar  $x_i$

*Felet  $\varepsilon$*

$$\varepsilon = (x_i - x_{känd})$$

Felet  $\varepsilon$  använd inte inom GUM, men kan ses som skillnaden mellan uppmätt värde  $x_i$  och referensvärdet  $x_{känd}$ .

### ***RMS - Root Mean Square***

RMS är ett mått på spridningen av felen (avvikelserna) kring ett referensvärde.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{känd})^2}{n}}$$

Där  $\varepsilon$  är felet och  $n$  är antalet mätningar.

### ***Standardosäkerheten $u$***

Standardosäkerhet är benämningen för standardavvikelsen enligt GUM.

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}$$

Där  $u$  är standardosäkerheten för uppmätta värden  $x_i$  och  $\bar{X}$  är medelvärdet för  $n$  antal mätningar.

### ***Gemensamt värde för osäkerheten i plan $u_{plan}$***

För att få ett gemensamt värde för standardosäkerheten i plan slogs de plana standardosäkerheterna (N- och E-koordinater) ihop enligt följande ekvation:

$$u_{plan} = \sqrt{(u_N^2 + u_E^2)}$$

Där  $u_N$  är standardosäkerheten för N-koordinaterna och  $u_E$  för E-koordinaterna.

## **5.5 Statistiska uträkningar**

All statistisk bearbetning skedde i MS Excel. De lagrade mätningarna delades upp efter andelen GPS- (fem eller sex) och Galileosatelliter (noll till fyra). De lades in på varsin flik som bearbetades var för sig.

På alla flikar beräknades:

- Felet (avvikelsen från de inmätta referensvärdena) för N-, E- och höjdkoordinater.
- Felet (avvikelsen från det inmätta referensvärdet) i plan.
- Medelvärdet för felen (medelavvikelsen) för N-, E- och höjdkoordinater.
- Medelvärdet för tiden till fixlösning för lyckade fixlösningar inom maximalt tre minuter.
- Medelvärdet för PDOP.
- RMS för N-, E- och höjdkoordinaters fel (avvikelser från de inmätta referensvärdena).
- Standardosäkerheten för N-, E- och höjdkoordinater.
- Gemensamt värde i plan för RMS, standardosäkerheten och medelavvikelsen.
- Andelen lyckade nådda fixlösningar.

## 6 Resultat

Tabell 4 visar fördelningen mellan GPS- och Galileosatelliter och resultatet av fältmätningarna med enkelstations-RTK mot GPS- och Galileosatelliter med RTK-data från SWEPOS-stationen Mosebacke som gjordes i början av april 2016.

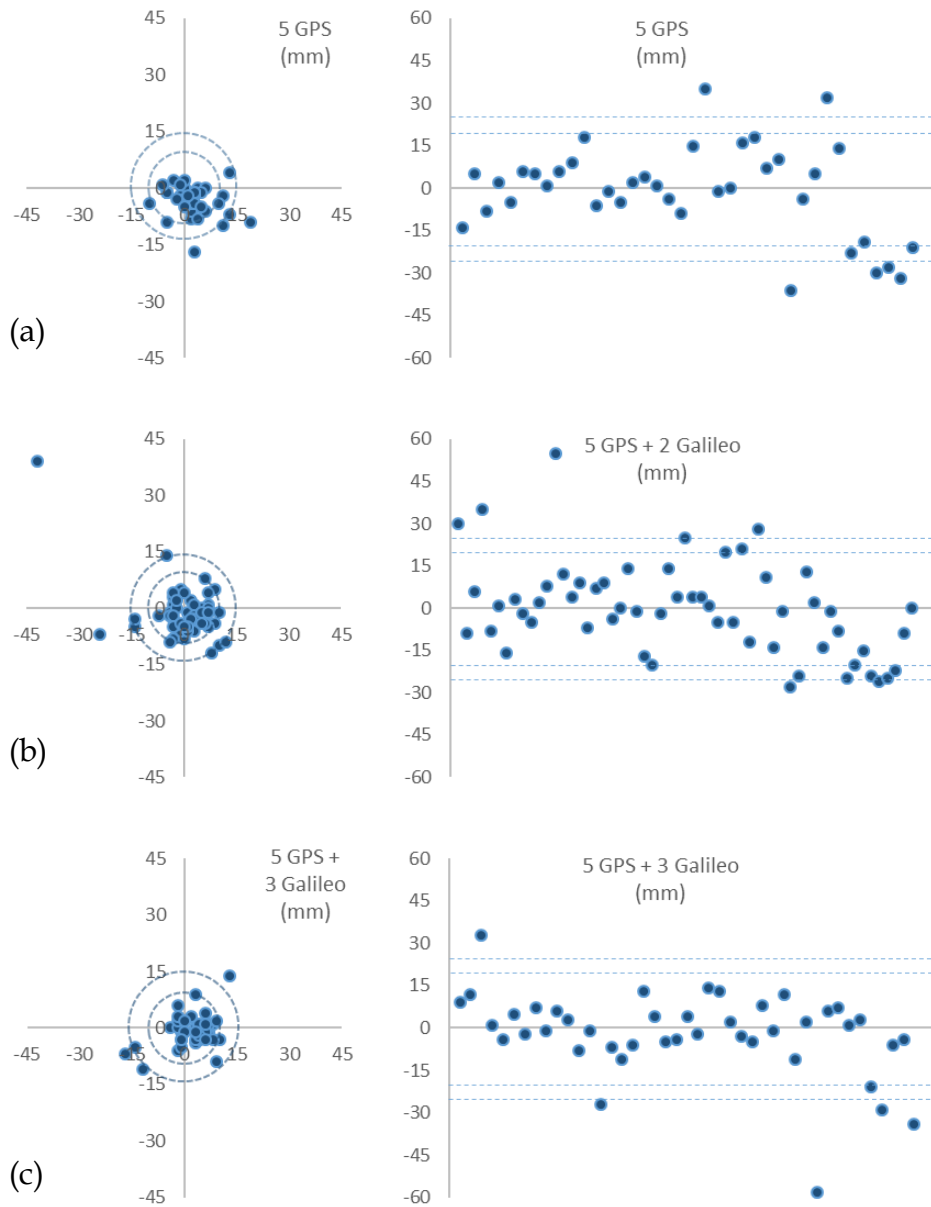
*Tabell 4 Resultatet från fältmätningarna med enkelstations-RTK mot GPS- och Galileosatelliter med RTK-data från SWEPOS-stationen Mosebacke gjorda i april 2016.*

Satelliter		Antal mätningar (st.)	Andel lyckad fixbestämning (%)	Medeltid till fixlösning (sek)	Standard- osäkerheten i plan (mm)	Standard- osäkerheten i höjd (mm)	Medel- PDOP
GPS	Galileo						
5	0	41	88	28	7	16	4,1
5	2	61	93	16	11*	17	3,2
5	3	43	100	23	7	15	2,6
5	4	7	100	13	8	8	2,2
6	0	35	94	10	6	12	3,0
6	2	42	98	12	8	14	2,4
6	3	27	96	8	5	11	2,2
6	4	5	100	8	4	4	2,1

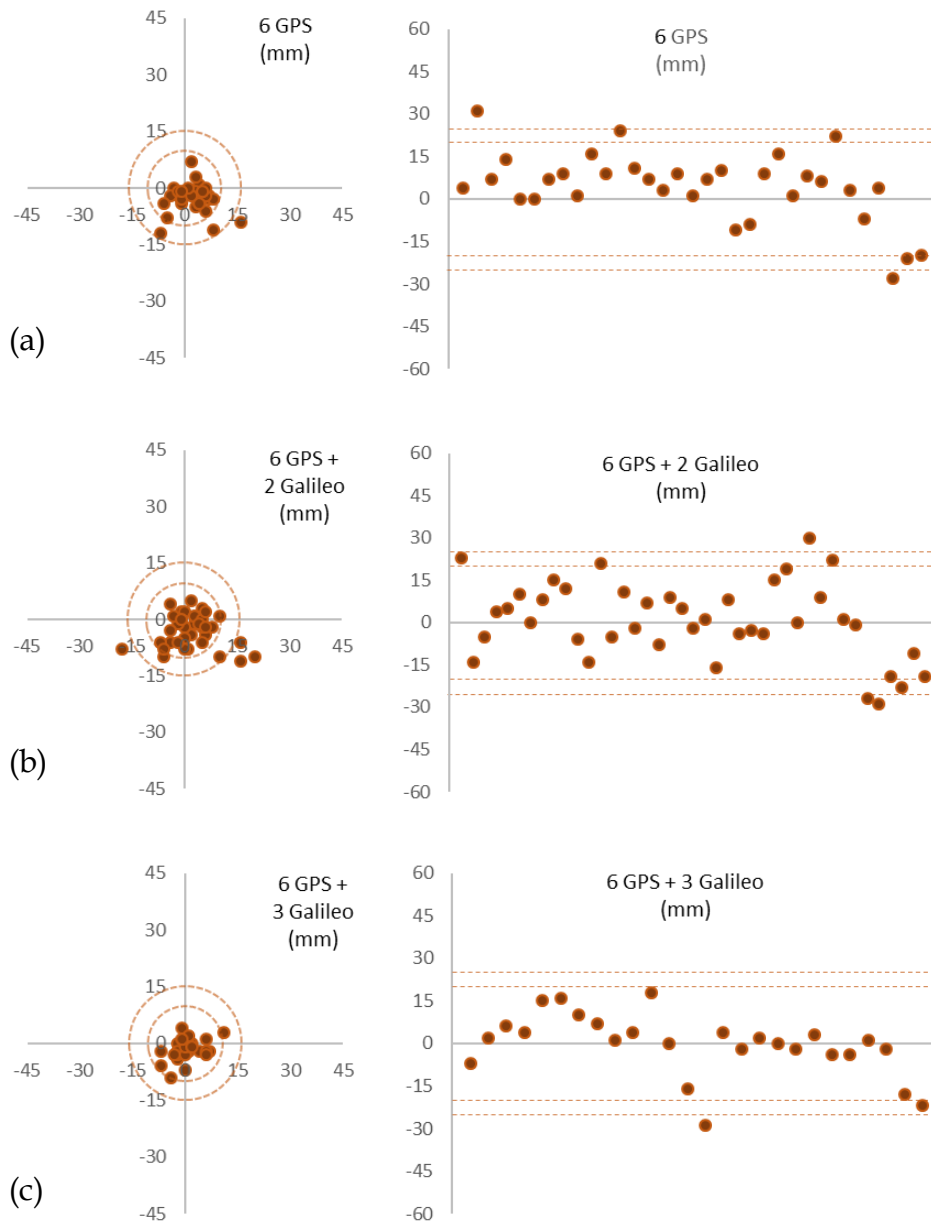
\*8 mm om en stor avvikelse på 57 mm togs bort.

Vid ökat antalet Galileosatelliter i kombination med fem eller sex GPS-satelliter ökar andelen lyckade fixbestämningar, medeltiden till fixlösning går ned och satellitgeometrin blir bättre vilket syns på medelvärdet för PDOP. Värdena för positionsosäkerheten (standardosäkerheten) i plan och höjd ligger under de förväntade vid användning av SWEPOS nätverks-RTK-tjänst som för plan är mellan 10 och 15 mm och i höjd mellan 20 och 25 mm (HMK-Geodesi, 2015). Plottning av alla mätningar visar att merparten av mätningarna hamnade inom de förväntade (Fig. 20 och 21).

En observation avvek markant, 57 mm i plan (men inte märkbart i höjd), för mätning med fem GPS- och två Galileosatelliter (Fig. 20b). Men den avviker inte tillräckligt för att det skulle vara motiverat att ta bort den helt från studien. Vid beräkning med denna mätning får man en standardosäkerhet på 11 mm i plan och 17 mm i höjd med en lyckandegrad på 93 %. Tas denna mätning bort från beräkningar (och lägger den till misslyckad mätning) får man standardosäkerheten 8 mm i plan och en lyckandegrad på 92 % medan varken standardosäkerheten i höjd, medeltid till fixlösning, eller medel-PDOP påverkas.



**Figur 20** Mätfelet (avvikelsen från det inmätta referensvärdet) i millimeter för alla mätningar med fem GPS-satelliter. Till vänster syns mätfelet i plan i millimeter (referensvärdet i origo) och till höger syns mätfelet för höjd i millimeter (referensvärdet i horisontell axel). Streckade linjer är den förväntade osäkerheten för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst, mellan 10 och 15 mm för plan och mellan 20 och 25 mm i höjd.



**Figur 21** Mätfelet (avvikelsen från det inmätta referensvärdet) i millimeter för alla mätningar med sex GPS-satelliter. Till vänster syns mätfelet i plan i millimeter (referensvärdet i origo) och till höger syns mätfelet för höjd i millimeter (referensvärdet i horisontell axel). Streckade linjer är den förväntade osäkerheten för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst, mellan 10 och 15 mm för plan och mellan 20 och 25 mm i höjd.



## 7 Diskussion och slutsats

### 7.1 Diskussion

Det är tydligt att Galileosatelliterna i denna studie tillför större andel lyckad fixbestämning, bättre medel på PDOP och lägre medeltid till fixlösning. Däremot är det för få mätningar gjorda för att man ska kunna uttala sig med säkerhet om Galileos påverkan på standardosäkerheten i mätningarna. Det ser ut som att Galileosatelliterna skulle kunna påverka standardosäkerheten positivt, men fler mätningar behövs. Standardosäkerheten i både plan och höjd ligger under de förväntade värdena inom SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst på 10 till 15 mm i plan och 20 till 25 mm i höjd.

Plottas och jämförs alla mätningar i de olika kombinationerna (Fig. 20 och 21) syns det att när fler satelliter är inblandade hamnar också fler av mätningarna inom den förväntade osäkerheten.

Vid beräkning där två Galileosatelliter är inblandad ökar standardosäkerheten något (med fyra och två millimeter i plan och en och två millimeter i höjd för fem respektive sex GPS-satelliter) jämfört med mätning med enbart samma antal GPS-satelliter. När fler Galileosatelliter tas med i beräkningen går standardosäkerheten ned under värdet för mätning med enbart GPS. Ökningen är så liten att den inte går att utesluta att det bara är tillfälligheter som medför detta.

Antalet satelliter som tas med i beräkning påverkar resultatet, oftast till det bättre men både vid användning av fem och sex GPS-satelliter och två från Galileo verkar det som att Galileosatelliterna kan ställa till det för mottagaren och osäkerheten går upp något för att vid användning av fler satelliter från Galileo gå ned under osäkerheten med bara GPS-satelliter. Diagrammen är mer spretiga när två Galileosatelliter läggs till än både mätningarna med enbart GPS- och i kombination med tre Galileosatelliter (Fig. 20 och 21). Det är mest tydligt i plan men det går att ana liknande tendens i höjddiagrammen. Det kan tolkas som om GNSS-mottagaren behöver "vänja sig" vid Galileo. Vid mätning mot bara en Galileosatellit sparkas den ut helt från beräkningarna av GNSS-mottagaren.

Vid några av mätningarna användes samma fem eller sex GPS-satelliter och bara Galileosatelliterna ändrades. I vissa fall togs fler serier med olika antal satelliter från Galileo utan att GPS-satelliterna byttes ut. Det kunde då hända att någon GPS-satellit hade rört sig så pass mycket att den hamnade mycket nära gränsen för satellitens elevationsvinkel och låg och "blinkade" vilket kunde störa GNSS-mottagaren så att det tog längre tid att nå fixlösning.

Vid mättillfället fanns inte tillräckligt med satelliter på plats i omloppsbana för genomförande av mätning mot enbart

Galileosatelliter och Galileos inledande tjänster (early services) hade inte heller kommit igång. Efter mättillfället har ytterligare sex Galileosatelliter skjutits upp och de två i utvärderingsskedet har aktiverats. Marksegmentet har uppdaterats så att de två satelliterna som ligger i en felaktig omloppsbanan är mer användbara (de skickar navigationsdata och kan användas till SAR men de sänder ingen almanacka). Efter årets satellituppskjutningar har planerna på att starta de inledande tjänsterna goda chanser att komma igång som planerat under december samma år.

Det behövdes minst fem GPS-satelliter, oavsett antal satelliter från andra system, för att få fixlösning vid nätverks-RTK-mätningar för den GNSS-mottagare som användes i denna studie. Även andra studier med andra GNSS-mottagare bekräftar att det behövs minst fem satelliter för att nå fixlösning vid mätning mot Glonass kombinerat med GPS (Eriksson och Hedlund, 2005) och vid test av olika GNSS-mottagare (Fredriksson och Olsson, 2015).

Enligt telefonkontakt med Trimtecs (Trimbles distributör i Sverige) supportchef, Mikael Gjertz (2016) behöver den GNSS-mottagare som används i denna studie minst fem satelliter för att nå fixlösning vid RTK-mätning men kan behålla fixlösningen med bara fyra satelliter (det vill säga den behåller fixlösningen även om en satellit faller bort efter nådd fixlösning).

Det är en egenskap hos mottagaren. Alla äldre modeller av Trimbles GNSS-mottagare behöver minst fem satelliter från samma system för att nå fixlösning vid RTK-mätning, men den senaste modellen (R10) ska däremot ha möjlighet att nå fixlösning med en blandning av satelliter från olika system även när det är färre än fem GPS-satelliter inblandade.

I dagsläget (hösten 2016) är det ännu inte möjligt att göra mätningar med enbart Galileo då detta system inte är tillräckligt utbyggt än. Dessutom har merparten av marknads GNSS-mottagare inte varit tillräckligt utvecklade än så att de kan bearbeta signaler från Galileo. Under 2016 har dock flera leverantörer av några mer avancerade GNSS-mottagare börjat få möjlighet att använda sig av signaler från Galileos satelliter för RTK. Då systemet inte ännu är igång är det ännu så länge bara möjligt att utföra experimentella mätningar tillsammans med signaler från GPS-systemet. I detta arbete användes Trimbles GNSS-mottagare modell R8-3 som var den enda av de tillgängliga mottagare som, vid denna studies fältmätningar, kunde ta emot och göra beräkningar med Galileosignaler. EU:s mål är att kunna vara helt oberoende av USA för navigering vilket då skulle innebära att även komponenter till och själva mottagarna behöver produceras helt i Europa.

På marknaden finns idag (hösten 2016) är utbudet mycket begränsat när det gäller enklare GNSS-mottagare, så som bilnavigatorer eller

smartphones, som kommer att ha möjlighet att ta emot Galileos signaler när dessa blir allmänt tillgängliga mot slutet av 2016. Det spanska teknikföretaget BQ:s smartphone Aquaris X5 Plus är idag den enda smartphone på marknaden som är förberedd för Galileos signaler vilket gör den till den första allmänt tillgängliga GNSS-mottagare som är Galileoförberedd. Däremot kommer en programmuppdatering behövas innan den faktiskt kan ta emot Galileos signaler (GSA, 2016). Vid en undersökning av marknadens bilnavigatorer så som bland annat Garmin och Tomtom hittas inga enheter som idag (hösten 2016) är förberedda för Galileo.

### **7.1.1 Vad kunde göras annorlunda?**

Med de erfarenheter jag dragit sedan fältmätningarna skulle jag om mätningarna planerades idag:

- Se till att antalet mätningar med de olika kombinationerna skulle bli mer jämnt fördelat och försökt få till fler mätningar totalt.
- Se till att ha tydligare rutiner och planen klar redan innan mätningen i fält så att rådatan skulle få bättre struktur.

### **7.1.2 Galileo**

Galileo är ett system under uppbyggnad. Hela programmet omorganiserades 2008 där styrning och finansiering ändrades. Hela programmet har lidit stora förseningar och den del av ursprungsplanerna har ändrats som bland annat gäller tjänster och satellitkonstellationen. Detta har gjort att de artiklar som skrivits om olika delar av utvecklingen har pratat om "dagslägen" för vad som gällde när artikeln/rapporten skrevs. Det medför att det är viktigt att kontrollera när en artikel skrevs då det i vissa lägen har olika uppgifter om samma sak, till exempel fördelningen av aktiva satelliter i omloppsbanorna. Från början var tanken att Galileosystemet skulle tillhandahålla en Safety of Life (SoL)-tjänst för extra stabil sömlös navigation dit inga markbundna hjälpsystem kunde nå. I det syftet planerades att det skulle finnas nio aktiva navigations satelliter och en aktiv reserv (den skickar inga egna navigationsmeddelanden men sänder vidare inkommande signaler) som inom några dagar kunde flyttas till den trasiga satellitens position och ta över. SoL-tjänsten flyttades senare över till Egnos-systemet vilket gjorde att det skulle räcka med åtta aktiva navigations satelliter och två i reserv men ändå bibehålla samma låga nivå av osäkerhet.

## **7.2 Slutsatser**

Våren 2016 var det inte möjligt att använda enbart Galileo för positionsmätning. Systemet var inte tillräckligt utbyggt. Fler satelliter

i omloppsbana behövs och programvaran i GNSS-mottagarna behöver uppdateras för att kunna använda sig av enbart Galileos signaler. Efter årets satellituppskjutningar är de tidiga tjänsterna (early services) schemalagda att sättas igång under december 2016. Programvaran i de flesta GNSS-mottagare behöver också uppdateras för att kunna ta emot och bearbeta Galileos signaler.

Testmätningarna tyder på ökad satellittillgänglighet och att RTK-mätning underlättas när Galileosatelliter kombineras med fem eller sex GPS-satelliter jämfört med mätningar utan Galileo. I testmätningarna med enkelstations-RTK visade det sig att en större andel lyckade fixlösningar och kortare tid till fixlösning uppnåddes. Galileo ser ut att ha en positiv påverkan vid mätning med RTK.

Variationen är för liten vid kombinerad mätning med Galileo jämfört med bara GPS i denna studie för att säkert kunna uttala sig om Galileos påverkan på positionsosäkerheten.

Fler mätningar behövs för att kunna uttala sig mer säkert om hur Galileo påverkar mätning med SWEPOS nätverks-RTK-tjänst.

### **7.3 Rekommendationer inför framtida studier**

När systemet är igång med fler tillgängliga Galileosatelliter vore det intressant med mätning mot fem eller sex Galileosatelliter ensamma och jämföra med mätning med lika många GPS-satelliter för att se om det blir någon skillnad i positionsosäkerheten, tid till fix eller andelen lyckad fixlösning.

En annan studie skulle kunna vara att jämföra kombinerad mätning med till exempel fem GPS- och tre Galileosatelliter, eller sex GPS- och två Galileo, mot mätning med enbart åtta GPS-satelliter. Det vill säga antalet satelliter är det samma med olika kombinationer, blir det någon skillnad i positionsosäkerheten, tid till fix eller andelen lyckad fixlösning?

Det skulle också vara intressant att använda en enklare utrustning att göra positionsbestämning med för att se om det blir någon skillnad i positionsosäkerheten vid kodmätning när Galileo är inblandad. Vid mättillfället fanns inga enklare GNSS-mottagare (typ bilnavigator, smartphone eller handhållen navigator från ex. TomTom eller Garmin) som kan använda sig av Galileos kod vilket gör att de inte utnyttja Galileosatelliterna för positionsbestämning. Under sommaren 2016 släppte det spanska teknikföretaget BQ en smartphone, *BQ Aquaris X5 Plus*, som är förberedd för Galileos navigationssignal men då systemet inte officiellt är igång än så behövs en uppdatering av programvaran innan det fungerar fullt ut (GSA, 2016).

## Referenser

- Alm, G., 2003. Geodesi. I: Introduktion till Kartografi och Geografisk information. Studentlitteratur, Lund, 17–44.
- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J., Garayt, B. och Boucher, C., 2007. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters. *J. Geophys. Res.*, 112, B09401. doi:10.1029/2007JB004949.
- Altamimi, Z., Rebischung, P., Métivier, L. och Collilieux, X., 2016. ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 121. doi:10.1002/2016JB013098.
- Appleby, G., Rodríguez, J. och Altamimi, Z., 2016. Assessment of the accuracy of global geodetic satellite laser ranging observations and estimated impact on ITRF scale: estimation of systematic errors in LAGEOS observations 1993–2014. *J. Geod.*, online (published 2016-06-29). doi:10.1007/s00190-016-0929-2.
- Aviso, 2016. AVISO Satellite Altimetry Data. Techniques / DORIS / Principle i vänstra menyn. <http://www.aviso.altimetry.fr/en/techniques/doris/principle.html>, besökt 2016-09-20.
- Bartolomé, J.P., Maufroid, X., Hernández, I.F., López Salcedo, J.A. och Granados, G.S., 2015. Overview of Galileo System. I: Nurmi, J., Lohan, E.S., Sand, S. och Hurskainen, H., (red), GALILEO Positioning Technology. Signals and Communication Technology 182, 9–33, doi:10.1007/978-94-007-1830-2\_2.
- Blonski, D., Galluzzo, G., Hahn, J., Binda, S., Lucas, R., Hollreiser, M., Spinelli, E., Sirikan, N., Kirchner, M., Goetzelmann, M., Kueger, J., Eleuteri, M. och Gasbarra, M., 2015. Galileo as Measured Performance after 2015 Ground Segment Upgrade. Proceedings of the 28th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2015), Tampa, Florida, September 2015, 1940-1946.
- Delva, P., Hees, A., Bertone, S., Richard, E. och Wolf, P., 2015. Test of the gravitational redshift with stable clocks in eccentric orbits: application to Galileo satellites 5 and 6. *Classical Quant. Grav.*, 32 (23). doi: 10.1088/0264-9381/32/23/232003.
- Dragomir, V.C., Ghițău, D.N., Mihăilescu, M.S. och Rotaru M.G., 1982. Theory of Earth's shape. Developments in Solid Earth Geophysics 13. 704 s. Elsevier. ISBN 9781483291895.

- EC, 2002. Galileo Mission High Level Definition version 3 2002-09-23. [http://ec.europa.eu/dgs/energy\\_transport/galileo/doc/galileo\\_hld\\_v3\\_23\\_09\\_02.pdf](http://ec.europa.eu/dgs/energy_transport/galileo/doc/galileo_hld_v3_23_09_02.pdf), besökt 2016-06-16.
- EC, 2007. United States and the European Union announce final design for GPS-Galileo common civil signal. European Press Release Database. Publicerad 2007-07-27. [http://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-07-1180\\_en.htm](http://europa.eu/rapid/press-release_IP-07-1180_en.htm), besökt 2016-10-06.
- EC, 2011. Mid-term review of the European satellite radio navigation programmes. Report from the commission to the European Parliament and the council 2011-01-18, Bryssel. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX052011DC0005&from=EN>, besökt 2016-06-16.
- EC, 2015a. European GNSS (Galileo) Open Service Signal In Space Interface Control Document version 1.2 30 November 2015. Publicerades på [http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/os-sis-icd/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/os-sis-icd/index_en.htm), besökt 2016-06-16.
- EC, 2015b. Senast uppdaterad 2015-04-14. [http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item\\_id=8211&lang=en&tpa\\_id=1059&title=Galileo-Open-Service-%3A-Ionospheric-Correction-Algorithm-for-Galileo-Single-Frequency-Users](http://ec.europa.eu/growth/tools-databases/newsroom/cf/itemdetail.cfm?item_id=8211&lang=en&tpa_id=1059&title=Galileo-Open-Service-%3A-Ionospheric-Correction-Algorithm-for-Galileo-Single-Frequency-Users), besökt 2016-09-08.
- EC, 2016a. Galileo. Senast uppdaterad 2016-10-17. [http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo/index_en.htm), besökt 2016-10-17.
- EC, 2016b. Galileo. Senast uppdaterad 2016-09-07. <http://ec.europa.eu/growth/sectors/space/galileo>, besökt 2016-09-08.
- Eriksson, M. och Hedlund, G., 2005. Satellitpositionering med GPS och GPS/GLONASS. Lantmäterirapport 2005:8, 68s, Lantmäteriet. ISSN 280-5731.
- ESA, 2004a. ESA GSTB-V1 Technology Developments. Senast uppdaterad 2004-05-11 [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/GSTB-V1\\_Technology\\_Developments](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/GSTB-V1_Technology_Developments), besökt 2016-07-06.
- ESA, 2004b. Galileo System Test Bed V1 Experimental Timing Station (E-PTS). Publicerad 2004-04-06. [http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA\\_GSTBv1\\_EPTS.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA_GSTBv1_EPTS.pdf), besökt 2016-07-07.

- ESA, 2004c. Galileo System Test Bed V1 Experimental Orbitography and Synchronisation Processing Facility (E-OSPF). Publicerad 2004-04-06. [http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA\\_GSTBv1\\_EOSPF.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA_GSTBv1_EOSPF.pdf), besökt 2016-07-07.
- ESA, 2004d. Galileo System Test Bed V1 Experimental Integrity Processing Facility (E-IPF). Publicerad 2004-04-06. [http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA\\_GSTBv1\\_EIPF.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA_GSTBv1_EIPF.pdf), besökt 2016-07-07.
- ESA, 2005. About satellite navigation. Senast uppdaterad 2005-02-02. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/About\\_satellite\\_navigation](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/About_satellite_navigation), besökt 2016-05-31.
- ESA, 2007a. Ett år av Galileo-signaler. Publicerad 2007-01-23 [http://www.esa.int/swe/ESA\\_in\\_your\\_country/Sweden/Ett\\_ar\\_av\\_Galileo-signaler](http://www.esa.int/swe/ESA_in_your_country/Sweden/Ett_ar_av_Galileo-signaler), besökt 2016-06-17.
- ESA, 2007b. GIOVE Mission Core Infrastructure. Publicerad 2007-02-26. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/GIOVE\\_mission\\_core\\_infrastructure](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/GIOVE_mission_core_infrastructure), besökt 2016-07-07.
- ESA, 2007c. Galileo to support global search and rescue. Publicerad 2007-08-09. [http://m.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo\\_to\\_support\\_global\\_search\\_and\\_rescue](http://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_to_support_global_search_and_rescue), besökt 2016-05-28.
- ESA, 2009. [http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/ESA\\_EGNOS\\_br284\\_2009.pdf](http://www.egnos-pro.esa.int/Publications/ESA_EGNOS_br284_2009.pdf), besökt 2016-05-18.
- ESA, 2010a. Galileo testbeds. Senast uppdaterad 2010-07-01. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_testbeds](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_testbeds), besökt 2016-06-17.
- ESA, 2010b. First satellites: Galileo In Orbit Validation Element / Giove. Publicerad 2010-07-01. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/First\\_satellites\\_Galileo\\_In\\_Orbit\\_Validation\\_Element\\_GIOVE](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/First_satellites_Galileo_In_Orbit_Validation_Element_GIOVE), besökt 2016-06-17.
- ESA, 2010c. Navigation Galileo Overview senast uppdaterad 2010-07-01. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Overview](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Overview), besökt 2016-06-17.
- ESA, 2010d. Galileo Services. Senast uppdaterad 2010-07-01. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_services](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_services), besökt 2016-07-22.
- ESA, 2011. How satellite navigation works. Senast uppdaterad 2011-09-22.

- [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/How\\_satellite\\_navigation\\_works](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/How_satellite_navigation_works), besökt 2016-10-21.
- ESA, 2012. Mission accomplished for Galileo's Pathfinder GIOVE-A. Publicerad 2012-07-03.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Mission\\_accomplished\\_for\\_Galileo\\_s\\_pathfinder\\_GIOVE-A](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Mission_accomplished_for_Galileo_s_pathfinder_GIOVE-A), besökt 2016-07-08.
- ESA, 2013a. What is Egnos? Senast uppdaterad 2013-08-02.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/EGNOS/What\\_is\\_EGNOS](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/EGNOS/What_is_EGNOS), besökt 2016-05-18.
- ESA, 2013b. Faktablad om Galileos valideringsfas. Senast uppdaterad 2013-02-15.  
[http://download.esa.int/docs/Galileo\\_IOV\\_Launch/Galileo\\_IOV\\_factsheet\\_2012.pdf](http://download.esa.int/docs/Galileo_IOV_Launch/Galileo_IOV_factsheet_2012.pdf), besökt 2016-06-16.
- ESA, 2013d. Galileo's earth. The Galileo ground segment. ESA Bulletin 156 34-37.  
<http://esamultimedia.esa.int/multimedia/publications/ESA-Bulletin-156>, besökt 2016-07-08.
- ESA, 2014a. Galileo on the ground. Senast uppdaterad 2014-06-27.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_on\\_the\\_ground](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_on_the_ground), besökt 2016-09-09.
- ESA, 2014b. Galileo works, and works well. Publicerad 2014-02-10.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo\\_works\\_and\\_works\\_well](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_works_and_works_well), besökt 2016-10-21.
- ESA, 2014c. Galileo on the ground. Senast uppdaterad 2014-06-27.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_on\\_the\\_ground](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_on_the_ground), besökt 2016-06-01.
- ESA, 2014d. Galileo's clocks. Senast uppdaterad 2014-06-27.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_s\\_clocks](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_s_clocks), besökt 2016-06-17.
- ESA, 2014e. Galileo and Egnos. Senast uppdaterad 2014-08-22.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo\\_and\\_EGNOS](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_and_EGNOS), besökt 2016-10-17.
- ESA, 2015a. What is Galileo? Senast uppdaterad 2015-12-18.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/What\\_is\\_Galileo](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/What_is_Galileo), besökt 2016-07-22.
- ESA, 2015b. Galileo satellites set for year-long Einstein experiment. Publicerad 2015-11-09.  
[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo\\_satellites\\_set\\_for\\_year-long\\_Einstein\\_experiment](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_satellites_set_for_year-long_Einstein_experiment), besökt 2016-09-09.



- ESA, 2016a. Galileo System Test Bed V1 Data Server Facility (DSF), [http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA\\_GSTBv1\\_DSF.pdf](http://esamultimedia.esa.int/docs/GSTB-V1/ESA_GSTBv1_DSF.pdf), besökt 2016-07-07.
- ESA, 2016b. Launching Galileo Steps so far. Senast uppdaterad 2016-05-31. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Launching\\_Galileo/Steps\\_so\\_far](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Launching_Galileo/Steps_so_far), besökt 2016-06-18.
- ESA, 2016c. Galileo: a constellation of navigation satellites. Senast uppdaterad 2016-09-21. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Galileo\\_a\\_constellation\\_of\\_navigation\\_satellites](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Galileo_a_constellation_of_navigation_satellites), besökt 2016-10-17.
- ESA, 2016d. Launch of new Galileo Navigation Quartet. Publicerad 2016-11-17. [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/Launching\\_Galileo/Launch\\_of\\_new\\_Galileo\\_navigation\\_quartet](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/Launching_Galileo/Launch_of_new_Galileo_navigation_quartet), besökt 2016-11-28.
- ESA, 2016e. Galileo The First Four Satellites [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo/The\\_first\\_four\\_satellites](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo/The_first_four_satellites), besökt 2016-06-17.
- Fredriksson, A. och Olsson, M., 2015. Jämförelse av höjdmätning med olika GNSS-mottagare i SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. Lantmäterirapport 2015:1, 48 s, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
- Gendt, G., Altamimi, Z., Dach, R., Söhne, W. och Springer, T., 2011. GGSP: Realisation and maintenance of the Galileo Terrestrial Reference Frame. Adv. Space. Res., 47, 174–185. doi: 10.1016/j.asr.2010.02.001.
- gov.uk, 2004. Agreement on the Promotion, Provision and use of Galileo and GPS Satellite-based Navigation Systems and related Applications. Dromoland Castle, Co.Clare, Ireland, 26 June 2004. [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/252494/TS.24.Cm8667.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/252494/TS.24.Cm8667.pdf).
- gps.gov, 2016a. The Global Positioning System. Senast uppdaterad 2016-09-26. <http://www.gps.gov/systems/gps>, besökt 2016-10-17.
- GSA, 2014. First Galileo Commercial Service Demonstration with Encrypted Signals. Publicerad 2014-07-31. <https://www.gsa.europa.eu/news/first-galileo-commercial-service-demonstration-encrypted-signals>, besökt 2016-10-27.
- GSA, 2015. Digging Deeper: An Inside Look at GNSS Market Trends. Publicerad 2015-08-07. <https://www.gsa.europa.eu/news/digging-deeper-inside-look-gnss-market-trends>, besökt 2016-10-17.

- GSA, 2016. First European Galileo-ready smartphone to hit stores in July. Publicerad 2016-07-14.  
<https://www.gsa.europa.eu/newsroom/news/first-european-galileo-ready-smartphone-hit-stores-july>, besökt 2016-09-19.
- GSC, 2016. Constellation Information. Senaste händelse 2016-10-07.  
<http://www.gsc-europa.eu/system-status/Constellation-Information>, besökt 2016-10-17.
- HMK-Geodesi, 2015. HMK – Handbok i mät- och kartfrågor, Geodesi: GNSS-baserad detaljmätning.  
[http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/geodesi/hmk-ge\\_gnss\\_2015.pdf](http://www.lantmateriet.se/globalassets/om-lantmateriet/var-samverkan-med-andra/handbok-mat--och-kartfragor/geodesi/hmk-ge_gnss_2015.pdf), senast besökt 2016-11-28.
- JCGM, 2008. JCGM 100:2008 Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement. Utgiven september 2008.  
[http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM\\_100\\_2008\\_E.pdf](http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf), besökt 2016-07-13.
- Lantmäteriet, 2016a. Avståndsmätning med kod.  
<https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Avstandsmatning-med-kod>, besökt 2016-10-27.
- Lantmäteriet, 2016b. Avståndsmätning med bärvåg.  
<http://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Avstandsmatning-med-barvag>, besökt 2016-10-27.
- Lantmäteriet, 2016c. Nätverks-RTK.  
<https://www.lantmateriet.se/sv/Kartor-och-geografisk-information/GPS-och-geodetisk-matning/GPS-och-satellitpositionering/Metoder-for-GNSS-matning/Natverks-RTK>, besökt 2016-05-27.
- Lantmäteriet m.fl., 2013. Geodetisk och fotogrammetrisk mättnings- och beräkningsteknik version 2013-10-28.  
<https://www.lantmateriet.se/Om-Lantmateriet/Samverkan-med-andra/Handbok-i-mat--och-kartfragor-HMK/referensbibliotek/Utbildningsmaterial/Geodetisk-och-fotogrammetrisk-matnings--och-berakningsteknik>, besökt 2016-11-28.
- Lilje, C., Engfeldt, A. och Jivall, L., 2007. Introduktion till GNSS. Lantmäterirapport 2007:11 70s, Lantmäteriet. ISSN 280-5731.
- Lohan, E.S., Hurskainen, H. och Nurmi, J., 2015. Galileo Signals. I: Nurmi, J., Lohan, E.S., Sand, S. och Hurskainen, H., (red),

- GALILEO Positioning Technology. Sig. Com. Tec.,182. doi 10.1007/978-94-007-1830-2\_3, 35-56.
- Malys, S., Seago, J.H., Pavlis, N.K., Seidelmann, P.K. och Kaplan, G.H., 2015. Why the Greenwich meridian moved. J. Geod., 89:1263-1272. doi 10.1007/s00190-015-0844-y.
- Navipedia, 2014. Navipedia Reference Frames in GNSS. Senast uppdaterad 2014-04-24  
[http://www.navipedia.net/index.php/Reference\\_Frames\\_in\\_GNSS#Galileo\\_reference\\_frame\\_.28GTRF.29](http://www.navipedia.net/index.php/Reference_Frames_in_GNSS#Galileo_reference_frame_.28GTRF.29), besökt 2016-07-26.
- Navipedia, 2015. Galileo Space Segment. Senast uppdaterad 2015-04-06.  
[http://www.navipedia.net/index.php/Galileo\\_Space\\_Segment](http://www.navipedia.net/index.php/Galileo_Space_Segment), besökt 2016-10-12.
- Navipedia, 2016a. Galileo Open Service. Senast uppdaterad 2016-02-24.  
[http://www.navipedia.net/index.php/GALILEO\\_Open\\_Service](http://www.navipedia.net/index.php/GALILEO_Open_Service), besökt 2016-10-05.
- NIMA, 2000. Department of Defense World Geodetic System 1984 – Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems. National Imagery and Mapping Agency Technical Report Third Edition Amendment 1 3 Januari 2000. NIMA TR8650.2.
- Norin, D., 2015. Kort beskrivning av olika GNSS och dess status, PM Lantmäteriet 2015-10-28.
- Norin, D., Engfeldt, A., Öberg, S. och Jämtnäs, L., 2010. Kortmanual för mätning med SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem Lantmäterirapport 2006:2 Utgåva 3 26 s, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
- QPS, 2016. World Geodetic System 1984 (WGS84).  
<https://confluence.qps.nl/pages/viewpage.action?pageId=29855173#app-switcher>, besökt 2016-09-22.
- Odolinski, R., 2010. Checklista för nätverks-RTK. Lantmäterirapport 2010:3 23 s, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
- Ohlsson K., 2014. Studie av mätosäkerhet och tidskorrelationer vid mätning med nätverks-RTK i SWEPOS 35 km-nät. Lantmäterirapport 2014:5 94 s, Lantmäteriet. ISSN 0280-5731.
- Schilizzi, R.T., 1986. Very long baseline interferometry. Radio Sci., 21 (4). doi: 10.1029/RS021i004p00665.
- SWEPOS, 2016a. Om SWEPOS - Aktuell driftstatus för SWEPOS referensstationer. Uppdateras kontinuerligt  
<https://swepos.lantmateriet.se/swepos/driftstatus/driftstatus.aspx>, besökt 2016-06-14.

- SWEPOS, 2016b. SWEPOS-tjänster - Nätverks-RTK.  
<https://swepos.lantmateriet.se/tjanster/realtid/realtid.aspx>,  
besökt 2016-10-21.
- SWEPOS, 2016c. SWEPOS-tjänster - Stödtjänster.  
<https://swepos.lantmateriet.se/tjanster/stodtjanster.aspx>,  
besökt 2016-10-17.
- SWEPOS, 2016d. SWEPOS-tjänster - Efterberäkning.  
<https://swepos.lantmateriet.se/tjanster/efterberakning/efterberakning.aspx>, besökt 2016-10-17.
- SWEPOS, 2016e. OM SWEPOS - Om SWEPOS-stationerna -  
Klassificering och utrustning.  
<https://SWEPOS.lantmateriet.se/SWEPOS/stationer/klassochutrustning.aspx>, besökt 2016-09-09.
- SWEPOS, 2016f. Om SWEPOS - Det här är SWEPOS! - Vår  
internationella roll.  
<https://SWEPOS.lantmateriet.se/SWEPOS/dethararSWEPOS/internationellroll.aspx>, besökt 2016-06-14.
- USNO, 2016. Naval Oceanography Portal GPS Info.  
<http://www.usno.navy.mil/USNO/time/gps/gps-info>, besökt  
2016-10-04.
- WAAS, 2015. Satellite navigation - WAAS - How it works. Senast  
uppdaterad 2015-06-15.  
[http://www.faa.gov/about/office\\_org/headquarters\\_offices/ato/service\\_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks](http://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ato/service_units/techops/navservices/gnss/waas/howitworks),  
besökt 2016-05-19.

**Personlig referens:**

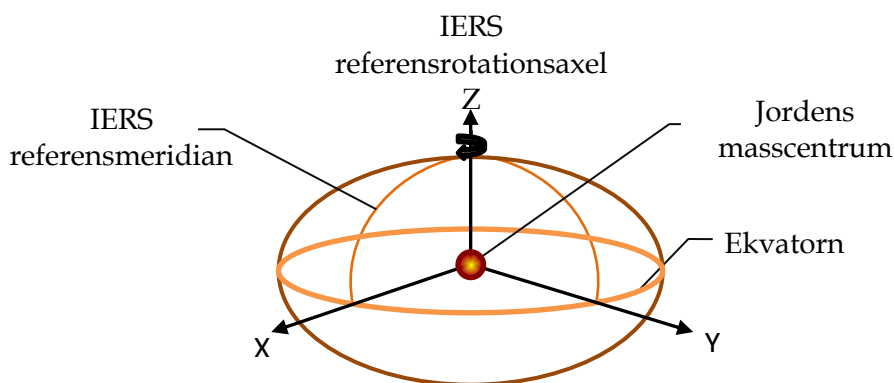
- Mikael Gjertz, 2016. Supportchef Trimtec AB, telefonkontakt 2016-09-19.
- Dan Norin, 2016. Lantmäteriet, mailkontakt, 2016-10-21.

# Appendix 1

## BTS 84

Bureau International de L'Heure (BIH) för BIH Terrestrial System epok 1984.0

Definitioner (Malys m.fl., 2015):



- Origo = Jordens masscentrum, inklusive hav och atmosfär.
- Z-axel = Riktning mot BIH:s vedertagna jordpol (Conventional Earth Pole - CEP) epok 1984.0, ett medelvärde av observationer av jordpolen mellan åren 1900 till 1905.
- X-axel = sammanfaller med det plan som går genom jordens nollmeridian (ungefär 102 m öster om observatoriet i Greenwich) och är vinkelrätt mot Z-axeln och ekvatorn.
- Y-axeln = ligger i ekvatorplanet vinkelrätt mot Z- och X-axlarna i ritning mot öst.

## Referens

Malys, S., Seago, J.H., Pavlis, N.K., Seidelmann, P.K. och Kaplan, G.H., 2015. Why the Greenwich meridian moved. *J Geod* (2015) 89:1263–1272. doi: 10.1007/s00190-015-0844-y.

## Appendix 2

### Cospas-Sarsat

Ett globalt system med jordnära och geostationära satelliter som fångar upp och vidarebefordrar nödsignaler från land, luft och vatten. Grundades av USA, Kanada, Frankrike och Sovjetunionen i början av 1980-talet och togs i fullt bruk 1985 (Cospas-Sarsat, 2014). Systemet har utvecklats och idag är minst 42 länder över hela jorden användare, däribland Sverige (Cospas-Sarsat, 2015a). Det är det obligatoriskt för större fartyg (över 300 ton) och rekommenderat för flygplan i civilt bruk att ha SAR-sändare installerade. Systemet använder frekvensen 406 MHz. På senare tid har SAR-mottagare monterats i navigationssatelliter som ligger mellan de jordnära och geostationära satelliterna (Cospas-Sarsat, 2015b). Navigations-satelliterna har bättre möjlighet att snabbare lokalisera och bestämma positionen hos en nödställd då de systemen är konstruerade att alltid ha minst fyra satelliter över horisont. De senaste GPS-, Glonass- och Galileosatelliterna har SAR-antennerna monterade. Galileosatelliterna och framtida GPS-satelliter kommer dessutom att ha tvåvägs-kommunikation med SAR-sändaren så att ett meddelande om att nödsignalen tagits emot kan skickas tillbaka till de nödställda (ESA, 2007).

### Referenser

Cospas-Sarsat, 2014. Introduction to the Cospas-Sarsat System. Publicerad oktober 2014. <https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/CS-G003-OCT-2014.pdf>, besökt 2016-05-28.

Cospas-Sarsat, 2015a. Cospas-Sarsat System Data. Publicerad december 2015. <https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/SD41-DEC15.pdf>, besökt 2016-05-28.

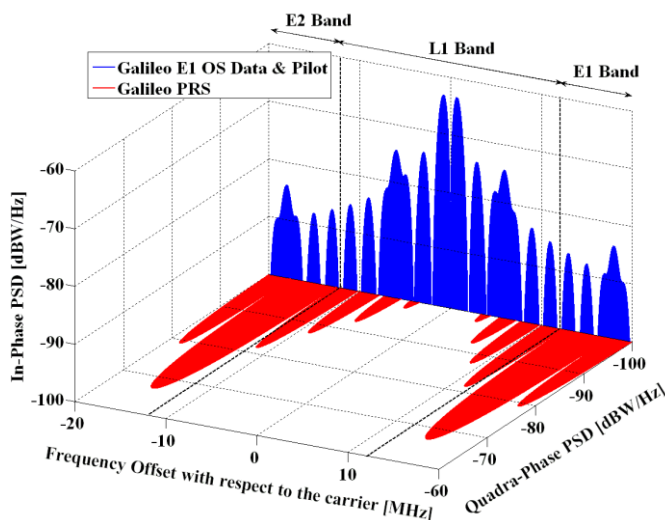
Cospas-Sarsat, 2015b. Description of the 406 MHz payloads used in the Cospas-Sarsat Meosar System. Publicerad december 2015. <https://www.cospas-sarsat.int/images/stories/SystemDocs/Current/T-016-DEC-2015.pdf>, besökt 2016-05-28.

ESA, 2007. Galileo to support global search and rescue. Publicerad 2007-08-09. [http://m.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/Galileo\\_to\\_support\\_global\\_search\\_and\\_rescue](http://m.esa.int/Our_Activities/Navigation/Galileo_to_support_global_search_and_rescue), besökt 2016-05-28.

## Appendix 3

### Galileos signaler

E1 är centrerad runt bärvåg 1575,420 MHz med en våglängd på ca 19 cm. Bärvågen är modulerad med tre spridningskoder (Fig. 3-1), E1A (datasignal) är reserverad för PRS. E1B (data) och E1C (pilot) sänds okodad för den öppna tjänsten (OS) och levererar även krypterade integritetsdata för den kommersiella tjänsten (CS) (Jaldehyag, 2016). Under den gemensamma utvecklingen av den nya signaldesignen gick en del av E1 bandet under namnet L1 då det är det samma som hos GPS och ändrades först i samband med första versionen av satellitsignaldefinitionen för OS 2008 (Avila-Rodriguez, m.fl., 2008).



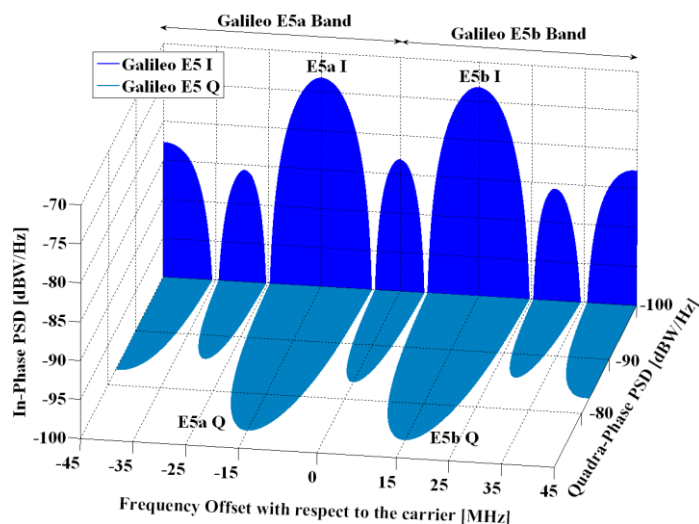
**Figur 3-1** Spektrum för E1-bandet med E1A (reserverad för PRS) vinkelrätt mot OS-koderna (tidigare gick E1-bandet under benämning L1, ändrades nyligen till namnet E1 hos Galileo). Källa: Avila-Rodriguez, m.fl., 2008.

E5a är centrerad runt bärvåg 1176,45 MHz och har en våglängd på ca 25,5 cm. E5a är modulerad med två spridningssignaler E5a-I (data) och E5a-Q (pilot) där Q-signalen ligger vinkelrätt mot I-signalen (Fig. 3-2). Båda är tillgängliga för OS och CS (Jaldehyag, 2016).

E5b är centrerad runt bärvåg 1207,14 med våglängden ca 25 cm. E5b är modulerad med två spridningssignaler E5b-I (data) och E5b-Q (pilot) där Q-signalen ligger vinkelrätt mot I-signalen (Fig. 3-2). Båda är tillgängliga för OS och CS (Jaldehyag, 2016).

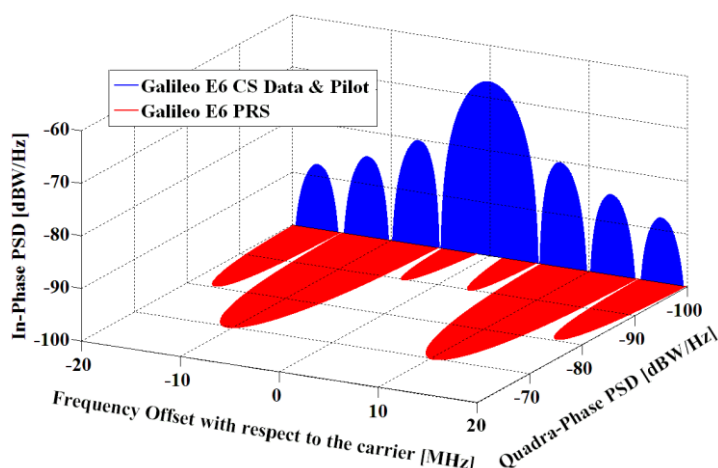
Det är möjligt att kombinera E5a och E5b till en modulerad E5-signal. Den ligger centrerad runt 1191,795 MHz och blir då en bredbandig signal som inte är lika känslig för flervägsfel (Jaldehyag, 2016).





**Figur 3-2** Spektrum för Galileos E5a- och E5b-signaler med Q-koderna vinkelrätt mot I-koderna. Källa: Avila-Rodriguez, m.fl., 2008.

E6 är centrerad runt 1278,75 som har våglängden ca 23 cm. E6 är modulerad med tre spridningskoder (Fig. 3-3), E6-A (datasignal) är reserverad för PRS, E6-B (data) och E6-C (pilot) är reserverad för CS (GSA, 2014).



**Figur 3-3** Spektrum för E6-bandet med E6-A (reserverad för PRS) vinkelrätt mot CS-koderna. Källa: Avila-Rodriguez, m.fl., 2008.

## Referenser

Avila-Rodriguez, J.A., Hein, G.W., Wallner, S., Issler, J.-L., Ries, L., Lestarquit, L., De Latour, A., Godet, J., Bastide, F., Pratt, T. och Owen, J., 2008. The MBOC modulation: The final touch to the Galileo frequency and signal plan. *J. Inst. Navig.*, 55(1), 15–28. doi: 10.1002/j.2161-4296.2008.tb00415.x.

Jaldehyag, K., 2016. Galileo-data for time applications. Presentations-anteckningar RNN Galileo Seminarium 30 september 2016, Stockholm. Kenneth Jaldehyag från SP Technical Research Institute of Sweden.



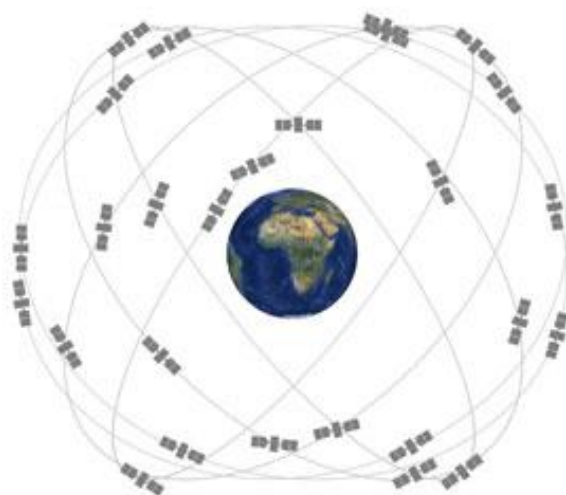
## Appendix 4

### Navstar GPS

NAVSTAR GPS – NAVigation Satellite Time And Ranging Global Positioning System – ägs av USA:s regering och byggdes upp och drivs av det amerikanska flygvapnet – United States Air Force.

#### Rymdsegmentet

Rymdsegmentet består av sex omloppsbanor med fyra till sex aktiva satelliter i varje (Fig. 4-1) med idag (november 2016) totalt 31 aktiva satelliter (gps.gov, 2016b). Omloppsbanorna ligger på ca 20 200 km höjd över jorden och de har en inklination på 55° mot ekvatorn. Tiden det tar för en satellit att gå runt jorden är cirka 11 timmar och 58 minuter.



*Figur 4-1 GPS satellitkonstellation med 31 satelliter i sex omloppsbanor med fyra till sex aktiva satelliter i varje. Källa: GPS rymden (2016).*

Varje satellitkonstellation upprepas två gånger per dygn. Satelliterna är placerade så att det överallt på jorden ska finnas minst fyra satelliter tillgängliga för att kunna bestämma en position, ofta är det mellan sex och åtta satelliter över horisonten. GPS består i nuläget, (november 2016) av satelliter från fyra olika block med ett femte block under produktion. Andra blockets första generation (Block IIA) skickades upp under 1990–1997 och den sista satelliten från det blocket avaktiveras under 2016. En del av de avaktiverade satelliterna ligger kvar i sina banor som backup för att kunna aktiveras om någon av de aktiva satelliterna behöver servas. Andra blockets mer avancerade satelliter från andra generationen (Block IIR) sändes upp under 1997–2004 och där är 12 satelliter fortfarande igång. Satelliterna i tredje (Block IIR-M) och fjärde (Block IIF) generationen är moderniserade med nya signaler och koder både för civilt och militärt bruk. Tredje generationen i Block II sändes upp 2005–2009 och består idag (hösten 2016) av sju aktiva satelliter och

fjärde generationen sändes upp 2010–2016 och består av 12 aktiva satelliter (gps.gov, 2016b).

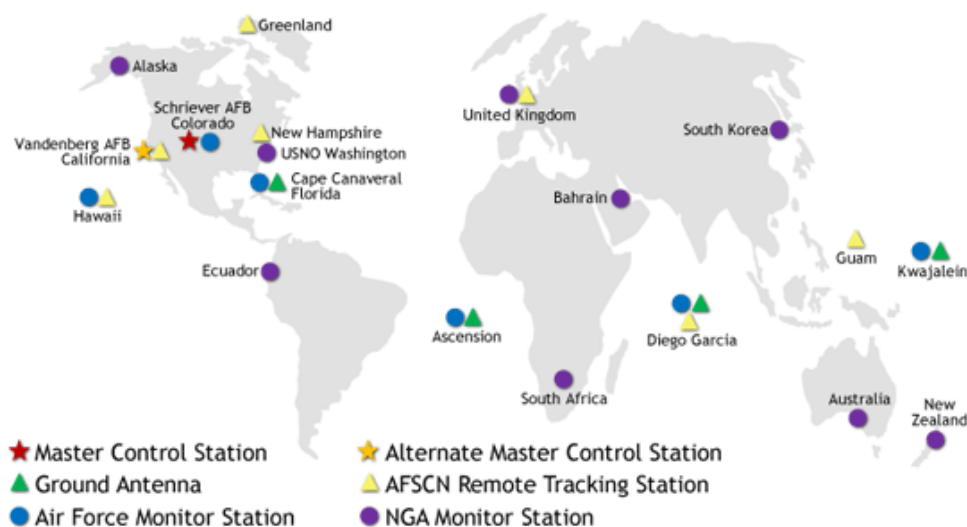
Block IIA och block IIR har två navigationskoder varav den ena, C/A-koden, är för civilt bruk och skickas på L1-signalen, och den andra, P(Y)-koden, är endast för militärt bruk och skickas både på L1- och L2-signalen för bättre osäkerhet (gps, 2014).

Block IIR-M har fyra navigationskoder. Utöver samma koder som tidigare block har det tillkommit en civil signal (L2C) på L2 och en mer störningstålig kod för militärt bruk (M-kod) (gps.gov, 2016b). Block IIF har fått en tredje civil signal, L5, och en mer avancerad atomklocka som ger bättre osäkerhet och signalkvalitet (gps.gov, 2016b).

GPS III – Den tredje generationen satelliter är under konstruktion och kommer att ha en fjärde civil signal på L1 (L1C) utöver alla signaler från tidigare block. GPS III kommer att tillhöra andra GNSS-generationen, vilket också Galileo tillhör, med högre krav på osäkerhet och driftsäkerhet än tidigare. Satelliterna kommer också att ha en SAR-antenn och ingå i Cospas-Sarsat-tjänsten. Första GPS-satelliten i nya generationen är planerad att skjutas upp under 2017 (Navipedia, 2016b; gps.gov, 2016b).

### Marksegmentet

I systemet ingår också en markbunden huvudkontrollstation (Master Control Station – MCS) placerad i Colorado och en alternativ MCS i Kalifornien som båda bemannas av U.S. Air Force. MCS tar emot navigeringsinformation från 17 övervakningsstationer, utspridda över hela jorden (Fig. 4-2), och beräknar satelliternas exakta position i rymden och skickar upp dessa data till satelliterna (gps.gov, 2016c).



*Figur 4-2* Karta över GPS marksegment där en kontrollstation i Argentina och en på Tahiti har tillkommit. Källa: gps.gov, 2016c.

Där övervakas och underhålls satelliternas, konstellationens och hela systemets hälsa. Kommunikationen mellan MCS och satelliter sker

med markbundna antenner (Ground antennas). Det finns fyra specifika GPS-antennstationer som även är sammankopplade med luftförsvarets satellitkontrollnätverk AFSCN (Air Force Satellite Control Network). MCS kan övervaka upp till 32 satelliter. U.S. Air Force har byggt upp ett system, LADO (Launch and early orbit, Anomaly resolution and Disposal Operations), att ta hand om och har kontroll över de satelliter som inte är aktiva för tillfället. Till exempel nyligen uppskjutna satelliter, satelliter som behöver justeras eller servas, avaktiverade satelliter som ligger kvar som reserv och omhändertagandet av satelliterna som helt tagits ur bruk. Detta system använder bara AFSCN inte de dedikerade GPS-antennstationerna (gps.gov, 2016c).

### Frekvenser och signaler

L1, L2 och L5 är bärvågorna som moduleras med koder i satellitsignalerna (Tabell 4-1). L1 har frekvensen centrerad kring 1575,42 MHz med en våglängd på 19 cm, L2 har frekvensen centrerad kring 1227,60 MHz med våglängden 24 cm och L5 har frekvensen centrerad kring 1176,45 MHz med en våglängd på 25,5 cm (gps, 2014).

*Tabell 4-1 GPS tjänster och signaler (GPS och Galileos signaler och tjänster finns sammanställda i Appendix 5).*

GNSS-system	GPS								
	C/A	P(Y)-kod		M-kod		L2CM	L2CL	L5 I	L5 Q
Tjänst	L1	L1	L2	L1	L2	L2	L2	L5	L5
Frekvensband	L1	L1	L2	L1	L2	L2	L2	L5	L5
Bärvåg (MHz)	1575,42	1575,42	1227,60	1575,42	1227,60	1227,60	1227,60	1176,45	
Kodfrekvens (Mbit/s)	1,023	10,23	10,23	5,115	5,115	1,023	1,023	10,23	10,23
Signal-komponent	Data	Data	Data	N/A	N/A	Data	Pilot	Data	Pilot
Längd på kod (tecken)	1023	15 345 000		N/A	N/A	10 230	767 250	10 230	
Repeteras efter	1 ms	7 dagar		N/A	N/A	20 ms	1 500 ms	1 ms	1 ms

\* Varje satellit (Space Vehicle – SV) har en egen veckolång del av en mycket längre Pseudorandom Noise (PRN)-kod som startas om efter 37 veckor.

C/A-koden (Coarse/ Acquisition) sänds på L1 med frekvensen 1,023 Mbit/s och består av 1023 tecken som upprepas efter en millisekund (gps, 2014).

L2C-signalen sänds på L2 med frekvensen 1,023 Mbit/s. L2C innehåller två koder CM och CL var av CM består av 10 230 tecken och upprepas efter 20 ms och CL består av 767 250 tecken som upprepas efter 1,5 s (gps, 2014).

L5:s C-koder är två koder I och Q som sänds på L5 centrerad kring frekvensen 1176,45 MHz och består av 10 230 tecken som upprepas varje millisekund (gps, 2014).

P(Y)-koden (Precision, krypterad till en Y-kod, även kallad A/S - Anti-Spoofing) sänds både på L1 och L2 med frekvensen 10,23 Mbit/s och består av  $6,1871 \times 10^{12}$  tecken som upprepas efter 7 dagar (usno, 2016). P(Y)-koden är krypterad för att förhindra att fienden kopierar koden och skickar felaktig kod för vilseledning. (gps, 2014). Varje satellit (Space Vehicle - SV) har en egen veckolång del av en mycket längre Pseudorandom Noise (PRN)-kod som startas om efter 37 veckor. Det tilldelade PRN-segmentet tjänar också till att identifiera de olika satelliterna. Till exempel PRN 13, eller SV 13, avser den satellit som sänder koden som börjar 13 veckor in på koden. Omstart av koden sker midnatt mellan lördag och söndag vilket definierar enheten satellitvecka. Ett annat sätt att identifiera satelliten är vilken tur i ordningen den skickades upp, exempelvis PRN 13 skickades upp som SVN 9 (Space Vehicle launch Number) (Leick m.fl., 2015).

M-kod sänds både på L1 och L2 med frekvensen 5,115 Mbit/s och är endast tillgänglig för militärt bruk (gps, 2014).

### **Tjänster**

GPS tillhandahåller två tjänster, SPS för civilt bruk och PPS för militärt bruk. Nya generationen GPS III kommer också ingå i Cospas-Sarsats räddningstjänst (gps.gov, 2016b).

SPS (Standard Positioning Service) ger tillgång till C/A-kod, L2C-signalen, L5:s C-koder och bärvåg för L1 och L2 förutom satellitmeddelandet (gps, 2014). Positionsosäkerheten, som 95 % av alla avläsningar ska ligga inom är specificerad till 13 meter i plan, 22 meter i höjd och 40 nanosekunder i tidsöverföring globalt sett (RNP, 2010).

PPS (Precise Positioning Service) ger utöver SPS också tillgång till krypterad P-kod och M-kod för både L1 och L2. Tjänsten tillhandahålls främst för USA:s militär och dess allierade men civil användning kan erhållas för de som uppfyller USA:s nationella säkerhetskrav. Positionsosäkerheten är inte offentligt känd (RNP, 2010).

Det är ingen skillnad i osäkerheten mellan SPS och PPS för signalen i rymden (Signal in Space, SIS). Däremot sänder PPS signaler på två frekvenser vilket gör det möjligt för militären att korrigera för jonosfären vilket ger bättre positionsosäkerhet än för SPS (gps.gov, 2014).

### **Referenser**

gps, 2014. Global Positioning Systems directorate Systems Engineering & Integration. Interface Specification IS-GPS-200. signerad 2014-03-21. <http://www.gps.gov/technical/icwg/IS-GPS-200H.pdf>.

gps.gov, 2014. GPS Accuracy. Senast uppdaterad 2014-09-18.  
<http://www.gps.gov/systems/gps/performance/accuracy>, besökt 2016-08-25.

gps.gov, 2016b. Space Segment. Senast uppdaterad 2016-10-04.  
<http://www.gps.gov/systems/gps/space>, besökt 2016-10-03.

gps.gov, 2016c. Control Segment. Senast uppdaterad 2016-10-16.  
<http://www.gps.gov/systems/gps/control>, besökt 2016-10-17.

Leick, A., Rapoport, L. och Tatarnikov, D., 2015. GPS Satellite Surveying. Fjärde utgåvan, Wiley, Hoboken, New Jersey, 807 s.

Navipedia, 2016b. GPS Space Segment. Senast uppdaterad 2016-05-18. [http://www.navipedia.net/index.php/GPS\\_Space\\_Segment](http://www.navipedia.net/index.php/GPS_Space_Segment), besökt 2016-10-12.

RNP, 2010. Radionavigeringsplan för Sverige 2009 systembeskrivning. 0907-10-01206-1.

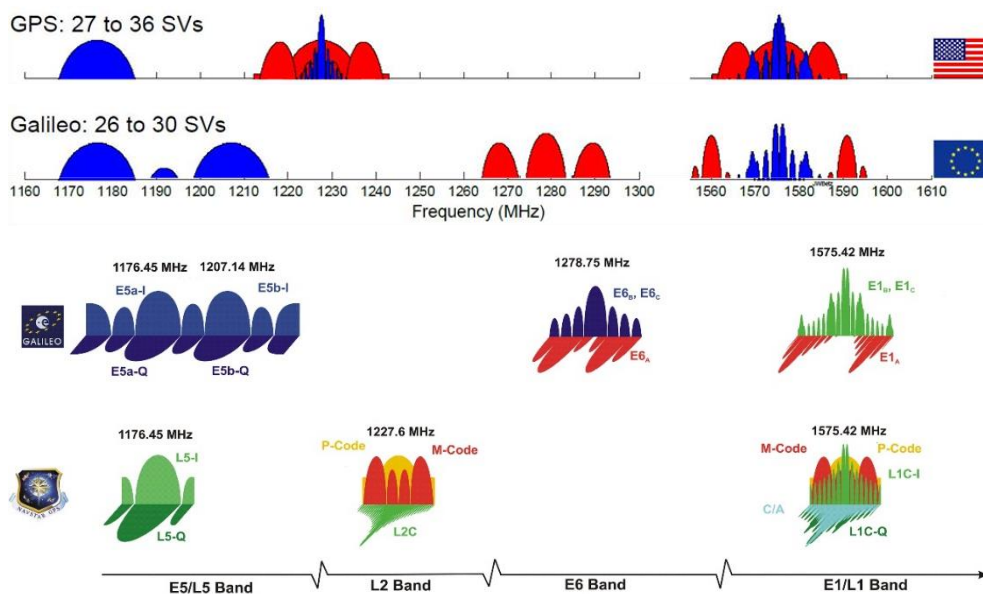
# Appendix 5

## Galileos och GPS signaler sammanställt

GNSS-system	Galileo									
	OS				CS		PRS			
Tjänst	OS				CS		PRS			
Frekvensband	E1		E5a		E5b		E6		E6	
Bärvåg (MHz)	1575,420		1176,450		1207,140		1278,750		1278,750	
Kodfrekvens (Mbit/s)	1,023	6,138	10,23		10,23		5,115		2,5575	5,115
Signal-komponent	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Pilot	Data	Data
Längd på kod (tecken)	4092		10 230		10 230		5115		N/A	N/A
Repeteras efter	4 ms	4 ms	1 ms	1 ms	1 ms	1 ms	N/A	N/A	N/A	N/A

GNSS-system	GPS									
	Tjänst	C/A	P(Y)-kod		M-kod		L2CM	L2CL	L5 I	L5 Q
Frekvensband	L1	L1	L2	L1	L2	L2	L2	L5	L5	
Bärvåg (MHz)	1575,42	1575,42	1227,60	1575,42	1227,60	1227,60	1227,60	1176,45		
Kodfrekvens (Mbit/s)	1,023	10,23	10,23	5,115	5,115	1,023	1,023	10,23	10,23	
Signal-komponent	Data	Data	Data	N/A	N/A	Data	Pilot	Data	Pilot	
Längd på kod (tecken)	1023	6,1871 x 10 <sup>12</sup>		N/A	N/A	10 230	767 250	10 230		
Repeteras efter	1 ms	7 dagar		N/A	N/A	20 ms	1 500 ms	1 ms	1 ms	

\*Varje satellit (Space Vehicle - SV) har en egen veckolång del av en mycket längre Pseudorandom Noise (PRN)-kod som startas om efter 37 veckor.



## Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriet

- 2010:4 Eriksson Per-Ola (ed.): Höjdmätning med GNSS – vägledning för olika mätsituationer.
- 2010:5 Eriksson Per-Ola (ed.): Anslutning av lokala höjdnät till RH 2000 med GNSS-stommätning.
- 2010:6 Engfeldt Andreas & Odolinski Robert: Punktbestämning i RH 2000 – statisk GNSS-mätning mot SWEPOS.
- 2010:7 Lord Jonas: Test av GNSS-mottagare från DataGrid.
- 2010:11 Ågren Jonas & Engberg Lars E: Om behovet av nationell geodetisk infrastruktur och dess förvaltning i framtiden.
- 2011:2 Jansson Jakob: Undersökning av mätosäkerheten i det förtätade SWEPOS-nätet i Stockholmsområdet – vid mätning med nätverks-RTK.
- 2011:3 Liu Ke: A study of the possibilities to connect local levelling networks to the Swedish height system RH 2000 using GNSS.
- 2012:3 Lundell Rebecka: Undersökning av nätverks-RTK-meddelande tillsammans med olika GNSS-mottagare – vid nätverks-RTK-mätning i SWEPOS nät av fasta referensstationer.
- 2014:2 Vestøl Olav, Eriksson Per-Ola, Jepsen Casper, Keller Kristian, Mäkinen Jaakko, Saaranen Veikko, Valsson Guðmundur, Hoftuft Olav: Review of current and near-future levelling technology – a study project within the NKG working group of Geoid and Height Systems.
- 2014:5 Ohlsson Kent: Studie av mätosäkerhet och tidskorrelationer vid mätning med nätverks-RTK i SWEPOS 35 km-nät.
- 2015:1 Fredriksson Annika & Olsson Madeleine: Jämförelse av höjdmätning med olika GNSS-mottagare i SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst.
- 2015:2 Norin Dan, Johansson Jan M, Mårtensson Stig-Göran, Eshagh Mehdi: Geodetic activities in Sweden 2010–2014.
- 2015:4 Andersson Bengt, Alfredsson Anders, Nordqvist Anders, Kilström Ronald: RIX 95-projektet – slutrapport.
- 2016:1 Engfeldt Andreas: RG 2000 – status March 2016.
- 2016:2 Engfeldt Andreas: Preparations and plans for the new national gravity system, RG 2000.
- 2016:4 Kempe Christina (ed.): Proceedings of the NKG General Assembly. Göteborg, Sweden, 1–4 September 2014.

# LANTMÄTERIET



Vaktmästeriet 801 82 GÄVLE Tfn 026 - 65 29 15 Fax 026 - 68 75 94  
Internet: [www.lantmateriet.se](http://www.lantmateriet.se)