



PM

Testmätningar med nätverks-RTK

1. Inledning

SWEPOS, Lantmäteriets nationella nät av fasta referensstationer för GNSS, består av 443 fasta referensstationer (oktober 2019). GNSS-data från stationerna används bl.a. för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst och för andra nationella nätverks-RTK-tjänster som drivs av andra tjänsteleverantörer.

SWEPOS och SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst är i ständig utveckling vad gäller hårdvara, mjukvara och datainnehåll i tjänsterna och så är även de metodbeskrivningar och riktlinjer som finns för genomförande av RTK-mätning. För att stödja all denna utveckling genomförs en hel del testmätningar med nätverks-RTK, bl.a. i form av examensarbeten.

2. Galileo

2.1 Införande av Galileo i SWEPOS

Vid RTK-mätning bidrar nyare GNSS vid sidan av GPS samt nya satellitsignaler till främst bättre tillgänglighet, men ger även en möjlighet till lägre mätosäkerhet. Med tillgänglighet avses förbättrade möjligheter att få fixlösning då sikten mot satelliterna är begränsad och mätmiljön är besvärlig. Att mätosäkerheten bör sjunka vid nätverks-RTK-mätning med fler använda satellitsystem konstaterades tidigt i det s.k. Close-projektet (Emardson et al., 2009).

SWEPOS var tidigt förberett för det ryska systemet Glonass och SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst har erbjudit data för kombinationen GPS och Glonass sedan april 2006. När Glonass först började kombineras med GPS var det mest som ett stöd för GPS. Idag får man förutsätta att Glonassignalerna ingår mer aktivt i positionsberäkningen.

Under de senaste åren har SWEPOS även blivit förberett för det europeiska systemet Galileo och för nya satellitsignaler från andra befintliga GNSS (Wiklund, 2016). Arbetet har bestått i att implementera det nya satellitsystemet och nya satellitsignaler i tjänsterna och i att installera Galileokompatibel utrustning. I februari 2018 släpptes Galileo på i SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst och en s.k. anslutningspunkt där signaler från såväl GPS, Glonass och Galileo ingår lanserades.

Inför (och även efter) att Galileo släpptes på i SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst har en hel del testmätningar genomförts. SWEPOS är nu även förberett för det kinesiska systemet Beidou och testmätningar med nätverks-RTK där signaler från Beidou ingår är planerade.

2.2 Examensarbeten med Galileo och RTK

De första testmätningarna med RTK där signaler från Galileo ingick genomfördes i april 2016 som enkelstations-RTK i form av ett examensarbete vid Stockholms universitet (Berggren, 2016). Fältmätningar genomfördes på Södermalm i Stockholm och en GNSS-mottagare av fabrikatet Trimble R8 användes, se Figur 1. Resultaten gav en bild av att Galileo tillför en del när det gäller fler lyckade fixbestämningar och kortare tid till fixlösning. Där emot var det svårare att avgöra om standardosäkerheten i plan och höjd påverkades av användandet av Galileosatelliter.

Figur 1: De första testmätningarna med RTK där signaler från Galileo ingick genomfördes i ett examensarbete nedanför Sofiakyrkan i Vitabergsparken i Stockholm under den kylslagna våren 2016. Bild: Anna Berggren.



Ett ytterligare examensarbete genomfördes på Högskolan i Gävle våren 2017 (Johansson & Tysk, 2017). Det utfördes med nätverks-RTK i stadsmiljö och i skogsmiljö och en GNSS-mottagare av fabrikatet Trimble R8 användes. Glonass togs med i mätningarna som i nämnda mätmiljö kom att omfatta runt fem GPS- och ungefär lika många Glonassatelliter. Antalet Galileosatelliter kom att variera mellan noll och två stycken och tack vare tillgången till både GPS och Glonass blev det trots den lite besvärliga mätmiljön nästan uteslutande fixlösningar. När elevationsgränsen höjdes till 25 respektive 35 grader utan att det nämnvärt påverkade tillgången på GPS- respektive Glonassatelliter, så bidrog dock de två Galileo-satelliterna till en märkbart högre andel lyckade fixbestämningar.

2.3 Testmätningar med Galileo och RTK

2.3.1 TESTMÄTNINGAR I FÄLT

Efter det första lyckade examensarbetet med RTK där signaler från Galileo ingick (Berggren, 2016) genomfördes testmätningar främst som nätverks-RTK i Gävletrakten vintern 2016/2017 (Öberg et al., 2017 och Norin, 2017a, 2017b). Dessa visade fortsatt att Galileo såg ut att tillföra en del när det gäller fler lyckade fixbestämningar och kortare tid till fixlösning. Efter det andra examensarbetet (Johansson & Tysk, 2017) gjordes även en del testmätningar av nätverks-RTK-användare.

I oktober 2018 utfördes kontinuerlig nätverks-RTK-mätning med en sekunds intervall utan ominitialisering på två punkter i skoglig miljö, se Figur 2, Tabell 1 och Tabell 2. En av punkterna låg nära en fysisk referensstation och den andra punkten låg 16 kilometer ifrån närmaste fysiska referensstation. Två stycken GNSS-mottagare av fabrikatet Leica Viva GS10 användes och de var kopplade till varsin GNSS-antenn för simultan mätning under några timmar med de bägge antennerna uppsatta på samma stativ.

Figur 2: 1 oktober 2018 genomfördes testmätningar i skoglig miljö som kontinuerlig mätning med nätverks-RTK där signaler från Galileo ingick. Bild: Stefan Öberg.



De kontinuerliga testmätningarna i oktober 2018 visade ingen större skillnad i positionsosäkerhet beroende på om Galileosatelliter adderades tillsammans med GPS- och Glonassatelliter eller inte. Även dessa testmätningar indikerade att det var en fördel för tillgängligheten att ha med Galileo och speciellt då med en hög elevationsgräns (i testmätningarna användes en så pass hög elevationsgräns som 25 grader).

Tabell 1: Fyra testmätningar i skoglig miljö med nätverks-RTK i Gävle i oktober 2018. Avståndet till närmaste använda SWEPOS-station var 0,2 km. Varje mätning är kontinuerligt inmätt med en sekunds intervall utan ominitialisering eller medeltalsbildning. Samtliga satelliter över vald elevationsgräns har använts.

| Satellitantal (medel) (st) | | | Elevations- gräns (grader) | Andel lyckad fixbestämning (%) | Standard- osäkerhet i plan (mm) | Standard- osäkerhet i höjd (mm) | Medel-PDOP |
|-------------------------------|---------|---------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|------------|
| GPS | Glonass | Galileo | | | | | |
| 9 | 5 | – | 13 | 99 | 17 | 25 | 1,5 |
| 8 | 3 | – | 25 | 92 | 20 | 32 | 2,3 |
| 9 | 5 | 4 | 13 | 95 | 18 | 25 | 1,5 |
| 8 | 3 | 2 | 25 | 99 | 18 | 21 | 2,2 |

Tabell 2: Fyra testmätningar i skoglig miljö med nätverks-RTK i Rörberg (Gävletrakten) i oktober 2018. Avståndet till närmaste använda SWEPOS-station var 16 km. Varje mätning är kontinuerligt inmätt med en sekunds intervall utan ominitialisering eller medeltalsbildning. Samtliga tillgängliga satelliter över vald elevationsgräns har använts.

| Satellitantal (medel) (st) | | | Elevations- gräns (grader) | Andel lyckad fixbestämning (%) | Standard- osäkerhet i plan (mm) | Standard- osäkerhet i höjd (mm) | Medel-PDOP |
|-------------------------------|---------|---------|----------------------------------|--------------------------------------|--|--|------------|
| GPS | Glonass | Galileo | | | | | |
| 9 | 6 | – | 13 | 97 | 17 | 21 | 1,5 |
| 7 | 4 | – | 25 | 97 | 26 | 38 | 2,4 |
| 9 | 5 | 3 | 13 | 97 | 22 | 30 | 1,5 |
| 7 | 4 | 3 | 25 | 99,9 | 23 | 28 | 2,3 |

2.3.2 DATA FRÅN MONITORSTATION

I mars 2019 studerades data från monitorstationen i Örebro, vilken ligger ganska mitt emellan närliggande SWEPOS-stationer som i området har ett ungefärligt inbördes avstånd på 35 kilometer, se Tabell 3. Två identiska GNSS-mottagare av fabrikatet Septentrio PolaRx5 användes och var parallellt kopplade till samma GNSS-antenn (dvs. monitorstationens antenn). Nätverks-RTK-mätning utfördes som kontinuerlig mätning under flera dygn med en sekunds intervall och med ominitialisering efter varje halvannan minut. Elevationsgränsen var satt till 35 grader för att efterlikna en svår mätmiljö i den annars öppna mätmiljön. Samtliga tre satellitsystem (GPS, Glonass och Galileo) användes av den ena GNSS-mottagaren och bara GPS och Glonass användes av den andra under den samtidiga mätningen.

Tabell 3: Testmätningar med nätverks-RTK på monitorstationen i Örebro i mars 2019. Avståndet till närmaste använda SWEPOS-station var 16 km. Varje mätning är kontinuerligt inmätt med en sekunds intervall med ominitialisering efter halvannan minut. Elevationsgränsen har varit satt till 35 grader och samtliga tillgängliga satelliter över denna gräns har använts.

| Satellitantal (medel) (st) | Mätningar (st) | Andel lyckad fixbestämning (%) | Outliers (st) | Standard- osäkerhet i plan (mm) | Standard- osäkerhet i höjd (mm) |
|----------------------------------|-------------------|--------------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 7,4 (GG) | 259097 | 86,8 | 50 | 9 | 18 |
| 9,9 (GGG) | 259200 | 95,7 | 16 | 7 | 14 |

De kontinuerliga samtidiga testmätningarna i mars 2019 indikerade både en lägre positionsosäkerhet och en större tillgänglighet då Galileosatelliter adderades tillsammans med GPS- och Glonassatelliter.

Samtidig mätning gjordes även med samtliga tre satellitsystem (GPS, Glonass och Galileo), där den ena GNSS-mottagaren använde en elevationsgräns på 13 grader och den andra använde 25 respektive 35 grader. Denna test visade (inte oväntat) att tillgängligheten var lite större och mätosäkerheten lite lägre vid 13 graders elevationsgräns.

3. Förtättningsgraden i SWEPOS

3.1 Olika förtättningsgrad i SWEPOS

SWEPOS har efter förtätningar med lite olika syften fått ett varierat avstånd mellan referensstationerna. Som glesast är det ca 70 kilometer mellan dem, ofta är det runt 35 kilometer och i vissa områden är det ännu tätare. Att ett tätare nät av fasta referensstationer (hög förtättningsgrad) bidrar till bättre tillgänglighet och lägre mätosäkerhet vid nätverks-RTK-mätning är inga konstigheter. Med tillgänglighet avses förbättrade möjligheter att få fixlösning då sikten mot satelliterna är begränsad och mätmiljön är besvärlig. Att hög förtättningsgrad och användning av fler GNSS kan sänka mätosäker-

heten studerades i det s.k. Close-projektet (Emardson et al., 2009), vilket kan sägas ligga till grund för de genomförda förtätningarna av SWEPOS. En lägre mätosäkerhet konstaterades även i praktiska fältmätningar i ett examensarbete 2011, som utfördes i och kring det då nyförtätade SWEPOS-nätet i Stockholmsområdet (Jansson, 2011). Ett annat examensarbete studerade förhållandena ur lite olika aspekter i bl.a. Uppsala-trakten (Ohlsson, 2014).

Under 2018 gjordes några riktade förtätningar av SWEPOS med åtta nya referensstationer i nordvästra Skåne och med nio nya SWEPOS-stationer i Kalmartrakten, se Figur 3 och Figur 4.

Figur 3: Mölle är en av de SWEPOS-stationer som ingår i den förtätning av SWEPOS som är gjord i nordvästra Skåne. Bild: SWEPOS.



3.2 Kommunal testmätning i områden med förtätat SWEPOS

3.2.1 TESTMÄTNINGAR I OMRÅDEN MED FÖRTÄTAT SWEPOS – GENOMFÖRANDE

För att jämföra prestandan hos SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst före och efter förtätningarna i nordvästra Skåne och i Kalmartrakten genomfördes testmätningar med tjänsten under vintern/våren 2019. Dessa utfördes av mätpersonal från Helsingborgs, Landskrona och Kalmar kommuner, dels i ursprungligt nät (35-kilometersnät), dels i förtätat nät. För att kunna mäta i ursprungligt 35-kilometersnät efter att förtätningarna blivit gjorda så var de nya referensstationerna i dessa mätningar bortplockade. Kommunerna har i samtliga fall använt egen RTK-utrustning av fabrikatet Trimble R10. Utrustningen har varit uppsatt på stativ med kontinuerlig loggning under två–fyra timmar av

runt 10 000 fixlösningar, dels i ursprungligt 35-kilometersnät, dels i förtätat nät. Sex punkter användes för testmätningarna enligt Tabell 4.

Figur 4: SWEPOS förtätades under 2018 i nordvästra Skåne och i Kalmartrakten. I kartorna är SWEPOS-stationerna markerade med en grön kartnål och de stationer som ingick i det ursprungliga 35-kilometersnätet är dessutom markerade med ringar.



Tabell 4: Sammanställning av de sex punkter där testmätningarna har genomförts.

| Kommun | Punktnummer | Använt nummer | Beskaffenhet |
|-------------|-------------|---------------|--|
| Helsingborg | 7373 | H1 | Öppen sand- och gräsyta |
| Helsingborg | 9984 | H2 | Öppen miljö längs väg, men nära en järnvägsövergång |
| Landskrona | 4197 | L1 | Gatukorsning i öppen miljö |
| Landskrona | 9531 | L2 | Öppen miljö längs väg |
| Kalmar | 114 | K1 | Gatukorsning i stadsmiljö |
| Kalmar | 10304 | K2 | Gatukorsning i halvöppen miljö, men med två stora lövträd, se Figur 5. |

Figur 5: Testmätningarna genomfördes bl.a. på punkten H2 i Kattarp utanför Helsingborg (öppen miljö längs väg, men nära en järnvägsövergång) och på punkten K2 i Kalmar (gatukorsning i ganska öppen miljö, men med två stora lövträd). Bilder: Helsingborgs kommun (vänster) och Kalmar kommun (höger).



Testmätningarna på de sex punkterna genomfördes enligt:

- **18 februari 2019:** Ursprungligt 35-kilometersnät på punkt H1 och H2 i Helsingborgs kommun.
- **20 februari 2019:** Förtätat nät på punkt H1 och H2 i Helsingborgs kommun.
- **27 februari 2019:** Ursprungligt 35-kilometersnät på punkt L1 och L2 i Landskrona kommun.
- **28 februari 2019:** Förtätat nät på punkt L1 och L2 i Landskrona kommun.
- **9 maj 2019:** Förtätat nät på punkt K1 och K2 i Kalmar kommun.

- **13 maj 2019:** Ursprungligt 35-kilometersnät på punkt K1 och K2 i Kalmar kommun.

För mätningarna användes satellitsignaler från GPS och Glonass och elevationsgränsen har varit satt till 10 grader i Helsingborg och Landskrona respektive 15 grader i Kalmar. Standardosäkerheterna för de erhållna fixlösningbaserade positionerna för respektive mätserie om två–fyra timmar har beräknats.

3.2.2 TESTMÄTNINGAR I OMRÅDEN MED FÖRTÄTAT SWEPOS – RESULTAT

Resultat för testmätningarna i de tre kommunerna i både ursprungligt 35-kilometersnät och i förtätat nät finns i Tabell 5.

Tabell 5: Sammanställning av beräknade standardosäkerheter (u) för testmätningarna i nordvästra Skåne och i Kalmartrakten i både ursprungligt 35-kilometersnät och i förtätat nät.

| Punkt | $U_{\text{plan, 35 km}}$ | $U_{\text{plan, förtätat}}$ | $U_{\text{höjd, 35 km}}$ | $U_{\text{höjd, förtätat}}$ |
|--------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| H1 | 5,7 mm | 4,1 mm | 9,2 mm | 5,6 mm |
| H2 | 6,3 mm | 6,6 mm | 9,6 mm | 10,3 mm |
| L1 | 7,8 mm | 5,9 mm | 10,2 mm | 8,7 mm |
| L2 | 4,7 mm | 4,5 mm | 7,5 mm | 6,5 mm |
| K2 | 16,8 mm | 14,2 mm | 19,1 mm | 17,2 mm |
| Medel | 8,3 mm | 7,1 mm | 11,1 mm | 9,7 mm |

I Tabell 5 är resultatet från punkt K1 inte medtaget då den urbana miljön orsakade såväl begränsad satellittillgång som påverkan genom flervägsfel.

3.2.3 TESTMÄTNINGAR I OMRÅDEN MED FÖRTÄTAT SWEPOS – SLUTSATSER

I de genomförda ganska begränsade testmätningarna har mätosäkerheten blivit lite lägre (ca 14 % lägre) efter förtätningarna av SWEPOS. Lägesosäkerheten i dem är generellt god och för de skånska mätningarna t.o.m. mycket låg. Dessa mätningar gjordes dock under goda betingelser vad gäller både yttre förhållanden och mätmiljö, vilket kan ha avspeglat sig i resultatjämförelsen. För mätningarna i Kalmar blev lägesosäkerheten högre än i de skånska kommunerna. Där var dock mätpunkten i en svårare mätmiljö med två stora lövträd och med hårdgjorda ytor, se Figur 5.

4. Inbyggd lutningskompensator i RTK-utrustningars mätstång

4.1 Lansering av produkter med inbyggd lutningskompensator

Automatisk lutningskompensation av RTK-stången som GNSS-antennen är placerad på ger möjlighet till mätning utan att stången behöver vara i lod. Lutningskompensa-

tionen bygger på tröghetsteknik, vars osäkerhet bidrar till en viss osäkerhetsförsämring även i RTK-mätta positioner. Ett tröghetssystem, eller Inertial Navigation System (INS), mäter upp acceleration och rotation hos de accelerometrar och gyron som utgör ett IMU (Inertial Measurement Unit). Dessa sensorer är små och lätta, så kallade mikroelektromekaniska sensorer (MEMS).

Möjligheten till automatisk lutningskompensation av RTK-stången visades redan 2004 i projektet GPS Shadow Explorer (GSE), se Figur 4.1 (Billger, 2005). GSE-projektet drevs av Lantmäteriet, några kommuner och företaget Imego och innefattade även positionsbestämning genom tröghetstekniken under kort förflyttning med dålig satellit-täckning, dvs. utan fixlösning.

Under senare år har RTK-utrustningar med lite olika lösningar på lutningskompensation lanserats. Vid den stora mässan vid Intergeo i Berlin hösten 2017 lanserade Hexagon GNSS-mottagaren Leica GS18 T, där RTK-stångens lutningsriktning kan bestämmas utan någon magnetisk sensor (dvs. okänsligt för magnetiska störningar), se Figur 6. Den maximala lutningsgraden på stången är specificerad till 30°.

Figur 6: Hexagon lanserade hösten 2017 RTK-rovern Leica GS18 T, vilken har automatisk lutningskompensation av mätstången som bygger helt på tröghetsteknik (IMU). Redan 2004 visade det svenska GSE-projektet att detta var möjligt. Bilder: Leica Geosystems AG (vänster) och Borås stad (höger).



4.2 Examensarbete med inbyggd lutningskompensator i RTK-stången

I ett examensarbete under våren 2019 undersöktes Leica GS18 T ur ett användar-perspektiv och hur lutningsgraden och lutningsriktningen av mätstången påverkade lägesosäkerheten vid nätverks-RTK-mätning (Almstedt & Peterson, 2019). Fältmätning skedde på två öppna punkter och på en punkt med sikthinder samt i form av inmätning av hushörn, se Figur 7.

Figur 7: Fältmätningarna i examensarbetet som undersökte Leica GS18 T utfördes både i öppen och besvärlig mätmiljö samt i form av inmätning av hushörn. Bilder: Niclas Peterson och Åsa Almstedt.



Generellt hamnade lägesosäkerheten på centimeternivå i plan och i höjd, men planosäkerheten har i de utförda mätningarna påverkats av lutningsgraden och som det ser ut av lutningsriktningen. Någon orsak till att dessa mätningar påverkats på detta vis är inte är klarlagd och behöver undersökas vidare.

5. Tillgänglighet i besvärlig mätmiljö

Tillgängligheten av RTK-mätning i besvärlig mätmiljö med t.ex. sikthinder är av stort intresse. Ett litet resultat om detta finns som en bieffekt från 2019 års inventering av höjdfixar i det nationella referensnätet i höjd (höjdfixar i RH 2000). Detta nät tillsammans med det andra passiva nationella referensnätet (dvs. det tredimensionella nätet av GNSS-bestämda punkter som försäkrar referenssystemet SWEREF 99) och det aktiva referensnätet SWEPOS förvaltas enligt fastlagda planer (Alfredsson et al., 2019). Under fältsäsongen 2019 har en GNSS-mottagare av fabrikatet Trimble Geo 7x använts för att med SWEPOS DGNSS-tjänst mäta in höjdfixarna ungefärligt i plan. Av de 2515 höjdfixar som inventerades under 2019 har ca 99 % av de återfunna och åtkomstbara punkterna kunnat mätas in med DGNSS.

Inför fältsäsongen testades förfarandet på en avvägningsslinga med besvärlig skog i Gävletrakten. I denna test med 87 höjdfixar var 79 stycken mätbara och av dessa kunde 52 stycken mätas in med nätverks-RTK, medan övriga 27 fick tas med DGNSS.

6. Påverkan vid snö på referensstationerna

För hela SWEPOS-nätet beräknas dagligen koordinater för varje referensstation baserade på ett dygns GNSS-observationer med syftet att studera stationens rörelser över tid. I dessa tidsserier syns förändringar i referensstationernas koordinater (främst i höjddled) som kommer av att det samlas snö på radomerna som skyddar GNSS-antennerna, se Figur 8. Detta beror på att den påverkan som den ackumulerade snön på

radomen har på GNSS-signalerna, innan de når GNSS-antennen, inte modelleras och korrigeras på ett korrekt sätt i beräkningarna av referensstationens koordinater. Snö på referensstationerna bör därmed även kunna ge upphov till felaktigheter i beräkningen av RTK-data för nätverks-RTK-tjänster och i slutändan en förhöjd osäkerhet i nätverks-RTK-inmätta positioner.

Figur 8: Mycket snö hade samlats på radomerna som skyddar de bägge GNSS-antennerna för SWEPOS-stationen Kiruna i februari 2018. Den vänstra GNSS-antennen används för nätverks-RTK och den högra utgör den ursprungliga fundamentalstationen. Bild: SWEPOS.



Tester genomfördes under vintern 2017/2018 med en Leica Viva GS15 GNSS-mottagare uppkopplad mot SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst i närheten av SWEPOS-stationen Mårtsbo i Gästrikland. Testmätningarna genomfördes som kontinuerlig nätverks-RTK-mätning under ungefär fem timmar på en ganska besvärlig punkt belägen i skog. Först skedde mätning under fem timmar när det låg snö på radomen på GNSS-antennen för SWEPOS-stationen Mårtsbo och sedan under fem timmar med snön bortborstad från den, se Figur 9. En andra mätomgång med samma procedur genomfördes också vid ett senare tillfälle.

Figur 9: Bortborstning av snö från radomen på GNSS-antennen för SWEPOS-stationen Mårtsbo i samband med nätverks-RTK-testmätning i dess närhet 22 februari 2018. Bild: Kent Ohlsson.



Genomförandet av och de erhållna resultaten från testmätningarna med nätverks-RTK på den ganska besvärliga punkten (som också kan ha påverkats) finns utförligt beskrivna (Ohlsson et al., 2018). En snabb titt på resultaten ger att plankoordinaterna höll sig stabila mellan nätverks-RTK-mätning då det låg snö och då det inte låg snö på referensstationens radom, medan det blev ett hopp på någon eller några centimeter i höjd. Vad gäller de nätverks-RTK-mätta positionernas standardosäkerhet så var de tämligen likvärdiga i plan, men lite högre i höjd (30–40 % högre) då det fanns snö på radomen. En annan slutsats var också att blötsnö verkar påverka mer än torr kallsnö.

7. Troposfärens påverkan

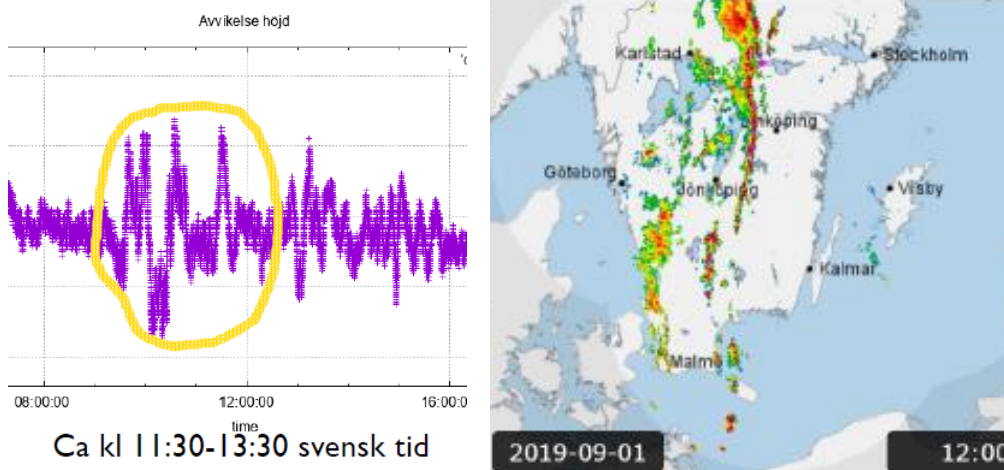
Under sommaren 2019 inkom det rapporter från användare om tidvisa höjdavvikelser på upp mot en decimeter vid mätning med såväl SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst som nätverks-RTK generellt. Trots omfattande felsökning kunde inget samband mellan platser och tidpunkter eller använda roverutrustningar konstateras. Inte heller visade använda satellitsystem (t.ex. Galileo), satellitsignaler eller mottagarfabrikat på SWEPOS-stationerna något avvikande. I stället verkar det som om höjdavvikelserna uppkom i samband med passager av vissa väderfronter som vandrar företrädesvis från väster till öster över Sverige. Det noterades även att samma problematik fanns vid vissa tillfällen under sommaren 2018.

Fördröjningen av satellitsignalerna genom troposfären är en av de viktigaste felkällorna och faktorerna att beakta vid RTK-mätning. Nätverks-RTK-programvaran modellerar på ett bra sätt den variation i signalfördröjning som en förändring i troposfärens vattenångainnehåll ger upphov till. Vid exceptionella förhållanden som vid vissa åskfrontspassager främst sommartid (juni–augusti) kan modelleringen vid uppskattningsvis upp mot fem tillfällen per sommarmånad vara otillräcklig, särskilt i den inledande

delen av passagen. En anmodan till användare är därmed att alltid beakta de faktorer som kan påverka RTK-mätning som tillsammans med kvalitetssäkring beskrivs i Handbok i mät- och kartfrågor (HMK) och specifikt i HMK – GNSS-baserad detaljmätning 2017, där avsnitt 2.3.2 och 3.4.2 beskriver troposfärens påverkan (Lantmäteriet, 2017). HMK:s geodesidokument håller på att revideras för utgivning i nya versioner 2019.

Slutsatsen rörande de upplevda höjdavvikelserna drogs efter att ha studerat data från 2018 och 2019 från SWEPOS monitorstationer (<https://swepos.lantmateriet.se/services/realtimemonitors.aspx>). Dagvisa standardosäkerheter för de mätta höjderna på dessa stationer beräknades. Vissa dagar under främst sommarmånaderna (juni–augusti) både 2018 och 2019 var dessa standardosäkerheter lite större än normalt. En närmare titt på dessa dagar visade att höjdvariationen inte varit stor hela dagen, utan bara under en begränsad tid på ungefär en–två timmar (decimeternivå). Genom att jämföra tidpunkterna med radarbilderna på SMHI:s Öppna data (<https://opendata-download-radar.smhi.se/explore/#>) konstaterades ett samband mellan de stora höjdvariationerna och passager av väderfronter över respektive monitorstation, särskilt i den inledande delen av passagen, se Figur 10. Vid dessa enstaka exceptionella åskfrontspassager verkar modelleringen av den variation i fördröjning av GNSS-signalerna som en förändring i troposfärens vattenångainnehåll ger upphov till ha varit otillräcklig i nätverks-RTK-programvaran.

Figur 10: Exempel på stora höjdvariationer (± 7 cm) för monitorstationen i Örebro 1 september 2019 runt kl. 11:30–13:30. Samtidigt är en kraftig åskfront på väg att passera Närke från väster till öster. Bilder: Martin Sundlöf (vänster) och SMHI:s Öppna data (<https://opendata-download-radar.smhi.se/explore/#>) (höger).



Problematiken studeras vidare och programvarutillverkarna har blivit försedda med data som underlag för en förbättrad troposfärmodellering.

Referenser

- Alfredsson A, Alm L, Dahlström F, Jivall L, Kempe C, Wiklund P (2019): *Förvaltning av de nationella geodetiska referensnäten*. Lantmäteriet, Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, 2019:1, 26 sidor, Gävle.
- Almstedt Å & Peterson N (2019): *Lägesosäkerhet vid nätverks-RTK-mätning med inbyggd lutningskompensator: en undersökning av Leica GS18 T*. Högskolan i Gävle, examensarbete, 73 sidor, Gävle.
- Berggren A (2016): *Inledande försök till mätning med Europas navigeringssystem Galileo*. Stockholms universitet, examensarbete avancerad nivå, NKA 172, 60 sidor, Stockholm (även i Lantmäteriet, Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, 2016:5, Gävle).
- Billger D (2005): *GPS Shadow Explorer – slutrapport för fas I*. Imego, Rapport, 7 sidor, Göteborg.
- Emardson R, Jarlemark P, Bergstrand S, Nilsson T, Johansson J, (2009): *Measurement accuracy in network RTK*. SP Technical Research Institute of Sweden (numera Rise), SP report 2009:23, 107 sidor, Borås.
- Jansson J (2011): *Undersökning av mätosäkerheten i det förtätade SWEPOS-nätet i Stockholmsområdet – vid mätning med nätverks-RTK*. Högskolan i Gävle, examensarbete, 38 sidor, Gävle (även i Lantmäteriet, Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, 2011:2, Gävle).
- Johansson S & Tysk P (2017): *Galileos påverkan vid nätverks-RTK – satellitpositionering i svåra miljöer*. Högskolan i Gävle, examensarbete, 56 sidor, Gävle.
- Norin D (2017a): *Galileo – europeisk satellitnavigering redo för praktisk användning*. SKMF, Sinus, nr 1 2017, sid. 10–12.
- Norin D (2017b): *Bättre mätkvalitet med Galileo och andra moderniserade GNSS*. Kartografiska sällskapet, Kart & Bildteknik, 2017:4, sid 8–11.
- Ohlsson K (2014): *Studie av mätosäkerhet och tidskorrelationer vid mätning med nätverks-RTK i SWEPOS 35 km-nät*. KTH, Master of science thesis in geodesy No 3132, 81 sidor, Stockholm (även i Lantmäteriet, Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, 2014:5, Gävle).
- Ohlsson K, Stedt F, Öberg S, Frisk A (2018): *Snö på referensstationers påverkan vid RTK-mätning*. Lantmäteriet, PM, 27 sidor, Gävle.
- Lantmäteriet (2017): *HMK – GNSS-baserad detaljmätning 2017*. Lantmäteriet, 52 sidor, Gävle.
- Wiklund P (2016): *SWEPOS® förbereds för Galileo och nya satellitsignaler*. Radionavigeringsnämnden, RNN-bulletinen, nr 1 2016, sid. 12–15.
- Öberg S, Norin D, Stedt F (2017): *Lantmäteriets testmätningar med RTK och Galileo i SWEPOS fram till januari 2017*. Lantmäteriet, PM, 7 sidor, Gävle.