

Undersökning av nätverks-RTK- meddelande tillsammans med olika GNSS- mottagare

– vid nätverks-RTK-mätning i
SWEPOS nät av fasta
referensstationer

Examensarbete av
Rebecka Lundell

Gävle 2012

LANTMÄTERIET





Copyright ©

2012-08-17

Författare Rebecka Lundell

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 56

Lantmäterirapport 2012:3 ISSN 0280-5731

Undersökning av nätverks-RTK- meddelande tillsammans med olika GNSS- mottagare

– vid nätverks-RTK-mätning i
SWEPOS nät av fasta
referensstationer

Examensarbete av
Rebecka Lundell

Gävle 2012

L A N T M Ä T E R I E T



Förord

Det här examensarbetet avslutar tre års studier på Lantmätarprogrammet på Högskolan i Gävle. Examensarbetet har utförts på Geodesienheten på Lantmäteriet i Gävle.

Tack till Johan Sunna på Lantmäteriet, som har fungerat som handledare, för din vägledning och ditt stöd under arbetet med det här examensarbetet. Jag vill även rikta ett stort tack till personal på Geodesienheten som på något vis har bidragit och hjälpt mig i genomförandet av detta examensarbete. Jag vill även passa på att uppmärksamma resterande personal för ert mycket vänliga bemötande. Självklart även tack till Stig-Göran Mårtensson som har fungerat som handledare på Högskolan i Gävle.

Gävle, den 25 maj 2012

Rebecka Lundell

Sammanfattning

Nätverks-RTK (Real-Time Kinematic) är en metod för positionsbestämning med Global Navigation Satellite System (GNSS) i realtid. Metoden kräver att en driftledningscentral kan kommunicera med de GNSS-mottagare som använder referensstationsnätet, för att bland annat skicka ut korrigerade GNSS-data. I Sverige erbjuder SWEPOS, ett nät av fasta referensstationer, en tjänst för nätverks-RTK-mätning, som förväntas ge en mätosäkerhet på mindre än 15 mm i plan och 25 mm i höjd (över ellipsoiden) (med täckningsfaktorn $k = 1$ i bägge fallen). Den teknik som idag används av SWEPOS för att utföra positionsbestämning av GNSS-mottagare är Virtuellt Referensstation (VRS). VRS kräver tvåvägskommunikation eftersom mottagaren skickar in sin absoluta position till nätverks-RTK-programvaran hos driftledningscentralen, var beräkningarna av korrektionsdata sker, innan de skickas tillbaka till mottagaren. Det finns ett annat alternativ som möjliggör envägskommunikation, nämligen nätverks-RTK-meddelande. Då sänds observationsdata, i form av korrektioner, ut till mottagaren som utför positionsberäkningarna.

Syftet med det här examensarbetet var att undersöka nätverks-RTK-meddelande för GNSS-mottagare av tre olika fabrikat med avseende på initialiseringstider, mätosäkerhet, avståndsberoende från närmaste masterstation, och GLONASS-satelliters deltagande i positionsbestämningen. I studien ingick även att utföra några jämförande mätningar med VRS. Undersökningarna gjordes genom upprepade nätverks-RTK-mätningar med GNSS-mottagare från Leica Geosystems, Trimble och Topcon, på tre kända punkter sydöst om Gävle. Tre mätmetoder användes, nätverks-RTK-meddelande med automatiskt nät (tvåvägskommunikation) och statistiskt nät (envägskommunikation), samt VRS. De tre mätpunkterna valdes så att avståndet, till den referensstation som användes som en så kallad masterstation, varierade.

Studien visade att initialiseringstiderna skiljde mellan de tre mottagarfabrikaten. En anledning till detta var att varje mottagare oinitialiserades från olika lösningslägen. Generellt var mätosäkerheten något högre för statistiskt nät. Mätosäkerheten var omkring 11 mm i plan och 19 mm i höjd med det automatiska nätet, samt 13 mm respektive 22 mm i det statiska nätet. Fabrikaten emellan, låg Leica och Trimble på samma nivå, medan Topcon hade ett generellt problem för det statiska nätet, vilket det inte fanns möjlighet att närmare utreda orsaken till. Resultatet visade även att mätosäkerheten påverkas av avståndet till använd masterstation. I några fall var dessa förhållanden linjära. Vid några tillfällen användes inte GLONASS-satelliter i positionsbestämningen.

Abstract

Network RTK (Real-Time Kinematic) is a method of positioning with Global Navigation Satellite System (GNSS) in real-time. The method requires that a control centre can communicate with the GNSS receiver, which is using the reference station network, for example to send out corrected GNSS data. In Sweden, SWEPOS, which is a network of permanent reference stations for GNSS, offers a service for Network RTK measurement. This is expected to give an uncertainty of less than 15 mm in plane and 25 mm in (ellipsoidal) height (with the coverage factor $k=1$ in both cases). The technology currently used by SWEPOS, to perform positioning of a GNSS receiver, is Virtual Reference Station (VRS). VRS requires two-way communication because the receiver submits its navigated location to the control centre, where the calculations of correction data are made, before they are sent back to the receiver. Another alternative is Network RTK messages which make use of one-way communication. Then the observation data are transmitted to the receiver, which performs determination of its position.

The purpose of this thesis was to investigate the network RTK messages with GNSS receivers from three different manufacturers with regard to time to fix ambiguities, measurement uncertainty and its dependence on the distance from the master station, and GLONASS satellites presence in the positioning. Also included in the study was the performance of comparative measurements with VRS. The investigations were conducted through repeated network RTK measurements with GNSS receivers from Leica Geosystems, Trimble and Topcon, at three known points south-east of Gävle. Three methods were used, network RTK message with automatic and static networks, and VRS. The three measurement points were chosen so that the distance to the reference station that was used as the so-called master station, varied.

The study showed that the time to fix ambiguities differed between the three brands of receivers. One reason for this was that each receiver was reinitialized from different steps in the initialization process. In general, the uncertainty in the measurement was slightly higher for the static network. The uncertainty was about 11 mm in plane and 19 mm in height with the automated network, and 13 mm and 22 mm respectively in the static network. The brands Leica and Trimble were at the same level, while Topcon had general problems for the static network, which there was no possibility to closer investigate the reason for. The results also showed that the uncertainty is influenced by the distance to used master station. In some cases, this relationship is linear. On some occasions, GLONASS satellites were not included in the positioning.

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|-------------------------------------|-----------|
| | Förord | 5 |
| | Sammanfattning | 7 |
| | Abstract | 8 |
| 1 | Inledning | 11 |
| 1.1 | Bakgrund | 11 |
| 1.1.1 | Positionsbestämning med GNSS | 11 |
| 1.1.2 | Nätverks-RTK-lösningar | 12 |
| 1.1.3 | SWEPOS | 14 |
| 1.2 | Problembeskrivning och syfte | 15 |
| 1.3 | Tidigare studier | 16 |
| 2 | Metod | 18 |
| 2.1 | Mätmetoder | 18 |
| 2.2 | Testområde | 18 |
| 2.3 | Utrustning | 20 |
| 2.4 | Datainsamling | 21 |
| 2.5 | Analys | 22 |
| 2.6 | Test av linjära samband | 23 |
| 3 | Resultat | 25 |
| 3.1 | Inmätning | 25 |
| 3.2 | Mätosäkerhet | 27 |
| 3.3 | Linjära samband | 32 |
| 4 | Diskussion | 34 |
| 4.1 | Analys och jämförelse | 34 |
| 4.2 | Framtida studier | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 5 | Slutsatser | 38 |
| | Referenser | 39 |
| | Bilaga 1. Mätningarnas spridning i plan och höjd kring kända koordinater på mätpunkterna A, B och C | 42 |
| | Bilaga 2. Initialiseringstider och andel lyckade initialiseringar med varje mätmetod | 50 |
| | Bilaga 3. Mätprocedur för respektive mottagare | 52 |

Undersökning av nätverks-RTK-meddelande tillsammans med olika GNSS-mottagare

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Satellitbaserad positionering och navigering blir allt vanligare och sker numera i en utbredd omfattning. Global Navigation Satellite Systems (GNSS) är det samlingsnamn som används för satellitbaserade positioneringssystem. Det mest kända och använda systemet är det amerikanska Global Positioning Systems (GPS). Även Ryssland har ett fullt operationellt system, Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS). Ett europeiskt system kallat Galileo är under uppbyggnad.

I det här kapitlet följer en kortfattad beskrivning av positionsbestämning med GNSS, samt metoderna för Virtuellt Referensstation (VRS) och nätverks-RTK-meddelande. I kapitel 2 respektive 3 görs en redogörelse för de testmätningar och analyser som har utförts, samt resultat som erhållits. I rapporten används de begrepp som föreslås i GUM (Guide to the expression of Uncertainty in Measurement) (JCGM 100, 2008). Begreppet "mätosäkerhet" ersätter begreppen "precision" och "noggrannhet", liksom standardosäkerhet ersätter standardavvikelse. Resultat av mätosäkerheter kommer i den här rapporten att redovisas med täckningsfaktor $k=1$. Det innebär att cirka 68 % av slumpmässiga fel i mätningarna ligger inom de gränser som anges som mätosäkerheter.

1.1.1 Positionsbestämning med GNSS

Positionsbestämning med GNSS kan göras absolut eller relativt en eller flera mottagare (Hofmann-Wallenhof, Lichtenegger & Collins, 2001). De vanligaste metoderna för relativ positionsbestämning är statisk mätning, DGNSS (differentiell GNSS) och Real-Time Kinematic (RTK-mätning). Statisk mätning innebär efterberäkning av bärvågsdata från minst två mottagare, och DGNSS innebär relativ kodmätning (Lilje, Engfeldt & Jivall, 2007).

RTK fungerar på liknande sätt som DGNSS, men använder bärvågsmätning istället för kodmätning för att bestämma avstånd till satelliterna. Mätningen kan göras i förhållande till en referensstation,

det vill säga enkelstations-RTK, eller i förhållande till flera referensstationer i ett nät, så kallad nätverks-RTK. En fördel med nätverks-RTK är att avståndsberoende fel som orsakas av jonosfären och troposfären kan modelleras och därmed korrigeras vid positionsbestämningen (Alves & Monico, 2011). För att reducera påverkan från dessa felkällor, men även andra, sänder referensstationen ut korrektioner som kombineras med mottagarens data. Dessa korrektioner, tillsammans med att mottagarens periodobekanta bestäms, resulterar i en mätosäkerhet på centimeternivå. Andra fördelar med nätverks-RTK är att avståndet mellan referensstationer och GNSS-mottagaren kan ökas utan märkbar försämring av mätosäkerheten (Janssen, 2009).

Ett flertal faktorer påverkar mätosäkerheten vid positionsbestämning med GNSS. Den största felkällan är atmosfären som ger upphov till fördröjningar i satellitsignalerna (Schofield & Breach, 2007). Atmosfären delas upp i två skikt, jonosfär och troposfär. Jonosfärfelet uppkommer på grund av fria elektroner och kan elimineras helt. Troposfärfelet orsakas av väderförhållanden och kan korrigeras för. Även satelliternas banor och klockor orsakar fel. Klockfelet i satelliterna kan elimineras helt vid nätverks-RTK-mätning, medan banfelet kan reduceras till en låg nivå om minst tre referensstationer används (Emardson, Jarlemark, Bergstrand, Nilsson & Johansson, 2009). Övriga felkällor som påverkar mätningar är bland annat flervägsfel, sikthinder och satelliternas geometri.

1.1.2 Nätverks-RTK-lösningar

Det finns flera olika metoder för att skapa nätverkskorrektioner och skicka ut informationen utifrån ett nät av fasta referensstationer. I det här avsnittet beskrivs VRS och nätverks-RTK-meddelande, som är mest intressanta för det här examensarbetet. Andra metoder är Fläcken-korrektur-parameter (FKP), som skapar ytkorrektionsparametrar genom att använda plan för att representera omgivande referensstationers atmosfärsfel, samt Pseudo-reference Stations (PRS), som liksom VRS skapar en ickefysisk referensstation (Takac & Zelzer, 2008).

Virtuell referensstation

VRS innebär att GNSS-mottagaren skickar en absolut position till en driftledningscentral som ansvarar för att distribuera data till användare i referensstationsnätet. RTK-programvaran i centralen beräknar utifrån positionen, korrektioner för felkällorna i de observationsdata som kommer från de närmaste referensstationerna. Korrektionerna skickas sedan till mottagaren och används för att skapa en virtuell referensstation i dess närhet. Positionen för denna VRS används därefter som närmaste referensstation i de fortsatta mätningarna, och korrektionsdata relativt VRS skickas kontinuerligt från

driftledningscentralen till mottagaren (Landau, Vollath & Chen, 2002). Denna metod kräver tvåvägskommunikation, eftersom det inte har funnits något standardformat för att sända ut (envägskommunikation) denna typ av data (Lilje m.fl., 2007). Tvåvägskommunikationen sker med Globalt System för Mobil Kommunikation (GSM, ursprungligen Groupe Spécial Mobile), eller med General Packet Radio Service (GPRS), som är mobilt Internet.

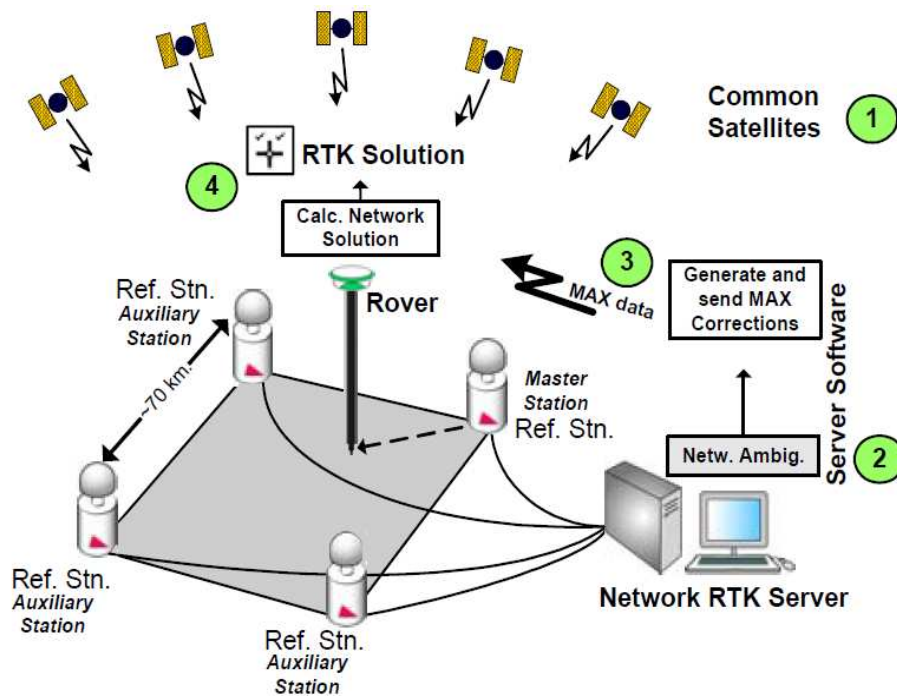
Fördelen med VRS, som Janssen (2009) pekar ut, är att det inte krävs av mottagarna att de ska klara av avancerade beräkningar för att modellera atmosfärspåverkan. Istället görs dessa beräkningar i RTK-programvaran, genom att använda information från hela nätverket. Däremot har tekniken begränsningar vad gäller förflyttningar, eftersom en ny virtuell referensstation måste skapas om mottagaren rör sig för långt bort, vilket resulterar i en ominitialisering.

Nätverks-RTK-meddelande och MAC

När standardformatet RTCM version 3.1 introducerades 2006 blev det möjligt att sända ut ett nätverks-RTK-meddelande, och att använda envägskommunikation vid överföring av information från referensstationer (Lilje m.fl., 2007). Master-Auxiliary Concept (MAC) är den teknik som används för nätverks-RTK-meddelande, och bygger på att den information som nätverket har om observerade osäkerhetskällor i största möjliga utsträckning ska levereras till GNSS-mottagaren för positionsberäkning (Brown, Geisler & Troyer, 2006). I figur 1 förklaras processen, som börjar med att rådata från referensstationer (1) samlas in till driftledningscentralen, var de periodobekanta beräknas (2). Ett nätverks-RTK-meddelande innehållandes nätverkskorrektioner skapas därefter (3). Meddelandet innehåller fullständiga observationsdata (korrektioner) för en så kallad masterstation. För övriga stationer, vilka benämns hjälpstationer (auxiliary stations), innehåller meddelandet korrektionsskillnader i förhållande till masterstationen (Janssen, 2009). Detta upplägg är till för att minska mängden data som skickas till mottagaren. Slutligen beräknar mottagaren sin position utifrån denna information (4).

Eftersom masterstationen inte har någon speciell betydelse vid beräkningen av korrektioner, utan enbart används för dataöverföringen, behöver inte den närmaste referensstationen användas som masterstation (Janssen, 2009). Hur masterstationen väljs ut beror på vilket kommunikationssätt som används. Den kan väljas automatiskt (i ett automatiskt nät), vilket kräver att mottagaren skickar in sin position till driftledningscentralen som väljer masterstationen utifrån avståndet till GNSS-mottagaren. Detta kräver tvåvägskommunikation men minskar den mängd data som skickas (Brown m.fl., 2006). Masterstationen kan också vara fördefinierad till en specifik referensstation i ett statiskt nät som väljs av en användare, endast envägskommunikation nyttjas (Janssen, 2009). Hjälpstationer i nätet

är således fördefinierade. Nätverks-RTK-meddelande kan därmed användas både i ett statiskt respektive automatiskt nät. Båda dessa har testats i det här examensarbetet.



Figur 1: Förhållandet mellan RTK-programvaran och GNSS-mottagaren för nätverks-RTK-meddelande (Leica Geosystems AB, 2008). Bilden reproduceras med tillstånd från Leica Geosystems.

Nätverkskorrektionerna som skapas kallas för MAX (master-auxiliary corrections). De är endast tillgängliga för mottagare som stödjer RTCM version 3.1, varpå det har utvecklats i-MAX (individualised Master-Auxiliary corrections) anpassat för äldre GNSS-mottagare. i-MAX fungerar på liknande sätt som MAX med skillnaden att nätverksservern beräknar korrektionerna för mottagaren och använder data från masterstationen (Janssen, 2009).

Fördelar med nätverks-RTK-meddelande är dess bredd, både envägs- och tvåvägskommunikation kan användas, samt att gamla GNSS-mottagare stöds i och med i-MAX. Till skillnad från VRS har nätverks-RTK-meddelande även fördelen att förflyttningar över längre sträckor är möjliga (Janssen, 2009). Däremot kräver metoden mer av GNSS-mottagaren när det gäller prestanda, på grund av att fler beräkningar görs i den.

1.1.3 SWEPOS

SWEPOS är ett nät av fasta referensstationer för GNSS i Sverige och drivs av Lantmäteriet. Syftet är att tillhandahålla GNSS-data för navigering och positionering, samt realisera det nationella

referenssystemet SWEREF 99. SWEPOS erbjuder tjänster för mätning i realtid samt efterberäkning. Antalet referensstationer i nätet är 280 (2012-05-18), och avståndet mellan dem är cirka 60-70 km. Stationerna tar emot signaler från satelliter från både GPS och GLONASS. En tjänst för mätning med nätverks-RTK tillhandahålls, med en förväntad mätosäkerhet i standardnätet (cirka 70 km mellan referensstationerna) på 15 mm i plan ($k=1$) och 25 mm i höjd ($k=1$) (Norin, Jonsson & Wiklund, 2008). En senare studie av Mårtensson, Reshetyuk och Jivall (2012) presenterar dock att det är möjligt att uppnå en mätosäkerhet på mindre än 10 mm i plan och 16 mm i höjd vid nätverks-RTK-mätning i SWEPOS. Dessa resultat grundas på mätningar där VRS har använts. För tillfället pågår en förtätning av nätet, genom att i vissa delar av Sverige upprätta nya referensstationer, eftersom ett tätare nät resulterar i en förbättrad mätosäkerhet, främst för höjdkomponenten (Emardson m.fl., 2009). Förtätningen ska även ge en bättre tillförlitlighet och tillgänglighet för användarna av SWEPOS tjänster. Metoden för att skicka korrektioner till användarna av SWEPOS nätverks-RTK-tjänst är VRS, men det finns även planer på att skicka ut data via nätverks-RTK-meddelande.

1.2 Problembeskrivning och syfte

Det finns ett intresse från Lantmäteriets sida att undersöka metoden med nätverks-RTK-meddelande, och hur den presterar i SWEPOS för att kunna erbjuda det som en alternativ tjänst. Numera stödjer denna teknik även GLONASS, och det har skett en utveckling i mottagarna som gör att fler fabrikat kan hantera tekniken. Det finns även en efterfrågan från bland annat Sjöfartsverket om att kunna mäta kontinuerligt med nätverks-RTK utan avbrott, vilket är möjligt i ett statistiskt nät med nätverks-RTK-meddelande.

Syftet med examensarbetet är att undersöka nätverks-RTK-meddelande för GNSS-mottagare av tre olika fabrikat. Nätverks-RTK-mätningar har utförts för samtliga mottagare i ett automatiskt och statistiskt nät, för att utreda hur mottagarna presterar tillsammans med nätverks-RTK-meddelande, samt undersöka eventuella skillnader fabrikaten emellan. Målsättningen är att besvara följande frågeställningar:

- Hur lång initialiseringstid krävs samt hur stor är andelen lyckade initialiseringar?
- Vilken mätosäkerhet kan erhållas?
- På vilket sätt påverkar avståndet till använd masterstation mätosäkerheten?
- Finns GLONASS-satelliter med vid positionsbestämningen?

Initialiseringstiden påverkar mätosäkerheten och långa initialiseringstider kan vara en indikation på att mätningar är av en sämre kvalitet (Odolinski, 2010). Mätosäkerheten påverkas även ut-

ifrån avstånd till referensstationer, varför det är intressant att undersöka hur avståndet till använd masterstation inverkar. Det är också av intresse att undersöka hur GLONASS-satelliter hanteras vid mätningarna, eftersom en tidigare studie utförd på Lantmäteriet (Johansson & Persson, 2008) enbart utförde mätningar med GPS. Mätningar med den idag inom SWEPOS använda metoden VRS har till viss del också utförts för att kunna jämföra och utvärdera nätverks-RTK-meddelande. Detta har dock inte skett med samtliga fabriker eftersom huvudsyftet är att utreda hur de olika mottagarna hanterar nätverks-RTK-meddelande och inte VRS.

1.3 Tidigare studier

Fokus i tidigare studier som har undersökt nätverks-RTK-meddelande har varit att jämföra metoden med andra nätverks-RTK-lösningar, till exempel VRS, och inte att jämföra hur olika GNSS-mottagare presterar tillsammans med nätverks-RTK-meddelande. Enligt Janssen (2009) stöds dock både VRS och MAC av de ledande tillverkarna av GNSS-utrustning. Han hävdar att olika mottagarfabriker också ska ge mätresultat på samma osäkerhetsnivå.

Johansson och Persson (2008) utförde en studie med syftet att jämföra VRS med nätverks-RTK-meddelande. De undersökte både automatisk och statisk mätmetod, och använde sig av GNSS-mottagare från Leica och Trimble. Mätningar utfördes med enbart GPS eftersom nätverks-RTK-meddelande inte hade stöd för GLONASS vid studiens genomförande. Vid statisk mätmetod utfördes mätningar med två olika referensstationer som masterstation, benämnda Gävle och Leksand. Avstånden från mätpunkterna till Gävle var mellan 10 och 40 km, och till Leksand mellan 131 och 160 km. För automatisk mätmetod var avstånden 10-36 km. Resultatet visar inga större skillnader i mätosäkerhet mellan automatiskt och statiskt nät för respektive mottagare, inte heller mellan nätverks-RTK-meddelande och VRS. Standardosäkerheten är ungefär 11 mm i plan och 21 mm i höjd. Medelvärden för initialiseringstider är 36 s för Leica-mottagaren och ca 40 s för Trimble-mottagaren i båda näten. Andelen lyckade initialiseringar är för Leica 97 % för både automatiskt och statiskt nät (enbart med referensstationen Gävle). För Trimble är samma siffror 100 % respektive 99 %.

Brown m.fl. (2006) jämför i sin studie MAX med bland annat VRS. GNSS-mottagaren som användes för MAX var Leica System 1200, och för VRS användes en mottagare av ett okänt märke. Avstånden mellan referensstationerna var upp till 100 km i plan och 1400 m i höjd. Författarna fokuserade sina analyser på höjdkomponenten, och anser att deras tester visar att VRS ger en betydligt högre mätosäkerhet i höjd än MAX. Avvikelserna i höjd från kända koordinater är cirka 75 mm för VRS och 25 mm för MAX.

I en studie utförd av Garrido, Giménez, de Lacy & Gil (2011) jämfördes två nät för nätverks-RTK, med syfte att jämföra bland annat tid för att lösa periodobekanta och mätosäkerhet. Det ena nätet använde VRS och det andra använde MAC för att erhålla korrektioner. Medelavståndet mellan referensstationerna var för båda näten 60 km och Leica GRX1230 mottagare användes på mätpunkterna. Resultatet visade att i 90 % av fallen är initialiseringen lyckad, och att problem enbart uppstår vid punkter i anslutning till gränsen mellan två olika referensstationsnät. Testen gav en mätosäkerhet i plan som är lägre än 25 mm, och en mätosäkerhet i höjd som är lägre än 50 mm, för båda näten/mätmetoderna.

Wang, Feng, Higgins och Cowie (2010) behandlar avstånd mellan referensstationer i ett nät och hur nätverks-RTK fungerar om avstånden ökas. Tester utfördes i tre nät där avstånden var cirka 69 (standardavstånd), 118 respektive 166 km, och MAX och VRS användes. Testerna utfördes med Leica GX1230 GG mottagare. Resultaten visar att VRS ger lägre mätosäkerhet än MAX när standardavstånd används, men vid längre avstånd presterar MAX bättre. För MAX ökar mätosäkerheten i plan i takt med att avståndet blir större (27, 31 och 32 mm), medan mätosäkerheten i höjd är som lägst på det kortaste avståndet (50 mm), som högst på det mellersta avståndet (83 mm) och mittemellan på det längsta avståndet (63 mm). Vad gäller initialiseringstider och andel lyckade fixlösningar visar resultatet värden på 143 s som en medeltid för att erhålla fixlösning, och en andel på 97 % lyckade initialiseringar för mätningar utförda med MAX.

2 Metod

2.1 Mätmetoder

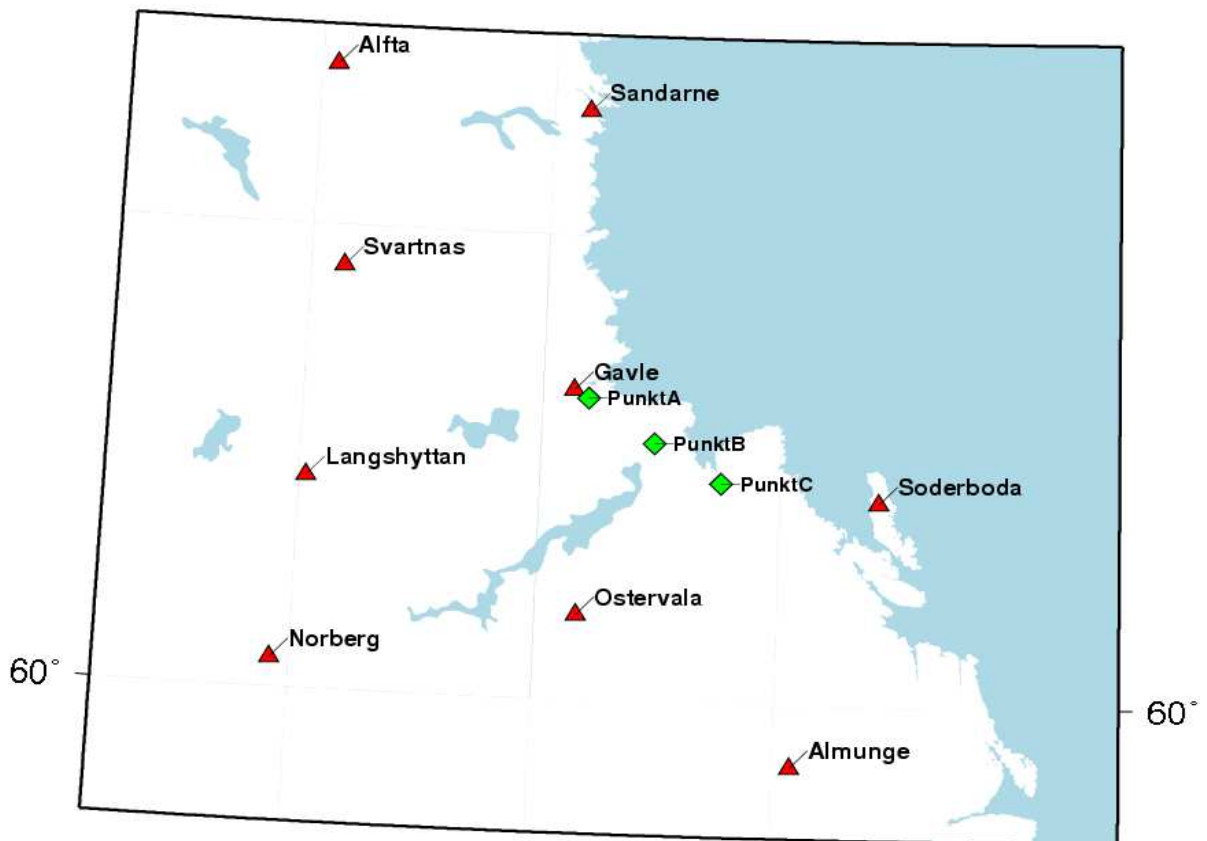
För att utvärdera de olika mottagarnas hantering av nätverks-RTK-meddelande utfördes upprepade mätningar med två olika mätmetoder, statisk och automatisk. För att få en jämförelse mot VRS utfördes även testmätningar med denna teknik. Sammanlagt användes tre mätmetoder:

- Nätverks-RTK-meddelande med ett automatiskt nät anpassat för tvåvägskommunikation. Masterstationen valdes som referensstationen närmast GNSS-mottagaren och sex hjälpstationer användes.
- Nätverks-RTK-meddelande med ett statiskt nät om nio referensstationer i ett område som omsluter mätpunkterna (se figur 2). Masterstationen var låst på referensstationen Svartnäs, vilket möjliggjorde envägskommunikation. Övriga åtta stationer agerade som hjälpstationer.
- VRS med SWEPOS nät av referensstationer.

Hjälpstationerna var fler i det statiska nätet än i det automatiska därför att GNSS-mottagaren kan befinna sig långt ifrån masterstationen i ett statiskt nät, och då behövs data från fler referensstationer för att kunna göra en positionsbestämning.

2.2 Testområde

Mätmetoderna som beskrivs i avsnitt 2.1 testades på tre punkter, benämnda A, B och C, med sedan tidigare bestämda koordinater i ett testnät söder om Gävle, kallat Gävle testnät. I figur 2 visas punkternas lägen. Punkt A är belägen ett par kilometer sydöst om centrala Gävle, punkt B öster om Älvkarleby och punkt C inne i byn Skärplinge. Punkterna valdes så att olika referensstationer användes som masterstation med den automatiska mätmetoden. Baslängder mellan punkterna och de använda masterstationerna redovisas i tabell 1. Vid alla mätningar med automatiskt och statiskt nät för nätverks-RTK-meddelande använde mottagarna korrekt masterstation, alltså den närmaste referensstationen i det automatiska nätet och den fördefinierade referensstationen i det statiska nätet.



Figur 2: De nio referensstationerna som ingick i det statistiska nätet, tillsammans med mätpunkterna A, B och C som representeras av rombernas lägen.

Tabell 1: Avstånd mellan respektive punkt och använd masterstation. Avstånd avrundat till hela kilometer.

| Punkt | Använd masterstation och avstånd till respektive punkt | |
|-------|--|------------------|
| | Automatiskt nät | Statiskt nät |
| A | Gävle, 4 km | Svartnäs, 64 km |
| B | Gävle, 23 km | Svartnäs, 83 km |
| C | Söderboda, 37 km | Svartnäs, 101 km |

Koordinater på punkterna A, B och C har tagits fram tidigare i ett annat syfte, genom att samla in observationsdata genom statistisk mätning under tre timmar, som sedan beräknats till koordinater i SWE-POS beräkningstjänst. Dessa koordinater (se tabell 2) användes som kända koordinater vid dataanalyserna av de för den här studien utförda testmätningarna.

Tabell 2: Kända koordinater i SWEREF 99 TM och höjder över ellipsoiden (h) i SWEREF 99 på punkterna A, B och C.

| Punkt | Northing (m) | Easting (m) | h (m) |
|--------------|---------------------|--------------------|--------------|
| A | 6725728,161 | 619910,526 | 47,460 |
| B | 6715869,662 | 635712,998 | 46,584 |
| C | 6707354,071 | 651480,588 | 34,357 |

2.3 Utrustning

GNSS-utrustningar från Leica Geosystems, Trimble och Topcon användes i testerna. I tabell 3 nedan presenteras information om vilka olika delar som användes. Vid skapandet av konfigurationer för nätverks-RTK-meddelande, valdes i respektive mottagare den inställning som avser denna teknik. Utrustning från Leica tillhandahölls av Lantmäteriet, utrustning från Trimble av Trimtec AB och utrustning från Topcon av Top Position AB.

Tabell 3: Använda GNSS-utrustningar.

| Fabrikat | Leica | Trimble | Topcon |
|--|------------------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Mottagare | Leica Viva GS15 | Trimble R8-3 | GRS-1 |
| Antenntyp | Integrerad i mottagare | Integrerad i mottagare | PG-A1 |
| Handenhet | Leica Viva CS10 | TSC3 | Integrerad med mottagare |
| Programvara i handenhet | Leica Smart Worx Viva version 4.01 | Trimble Access version 2012.00 | TopSURV version 8.2 |
| Inställning för nätverks-RTK-meddelande | MAX | RTCM3Net | MAC |
| Firmware version | 4.01 | 4.44 | 3.6 |

2.4 Datainsamling

Inmätningen av punkterna A, B och C utfördes mellan den 18 och 30 april 2012. Varje mätsession började med att ett stativ med tillhörande trefot, vars optiska lod och doslibell hade kalibrerats före mätningarna, placerades ovanför den aktuella punkten, se figur 3. Antennen, integrerad i mottagaren eller separat, monterades på stativet och horisontering samt centrering av den gjordes. Därefter mättes en lutande antennhöjd med hjälp av en tumstock till angivna markeringar innan mottagaren startades.



Figur 3: En typisk uppställning till vänster, här med Leica-mottagaren. Överst till höger syns Trimble-mottagaren och nederst till höger visas antennen från Topcon.

Uppkopplings- och mätningförfarandet skiljde mellan de tre mottagarna. Det generella tillvägagångssättet var att en mätmetod valdes, varefter uppkoppling till Internet och anslutningspunkt gjordes. Initialiseringstiden mättes med tidtagarur och en mätning lagrades. Direkt därefter gjordes en ominitialisering innan nästa mätning lagrades. Sammanlagt lagrades fem mätningar innan byte till nästa mätmetod skedde. Därefter monterades nästa mottagare på stativet och mätning med de respektive mätmetoderna utfördes. För en mer detaljerad beskrivning av tillvägagångssättet för respektive mottagare se bilaga 3.

Varje mätning lagrades som en medeltalsbildning av 10 epoker, där en epok var en sekund. Det gjordes för att reducera ett kortvågigt brus som finns i GNSS-mätningar (Odolinski, 2010). Om initialiseringar mellan varje mätning gjordes för att få mätningar som till viss del är oberoende av varandra. Respektive mottagare har ominitialiserats på det sätt som rekommenderas av respektive leverantör. Om tiden det tog att erhålla fixlösning överskred två minuter, gjordes en ny initialisering eftersom en lång initialiseringstid kan innebära större risk att fixlösningen är felaktig (Odolinski, 2010). Vid varje lagrad mätning noterades även antalet satelliter som användes till positionsbestämningen och att korrekt masterstation användes.

Koordinatsystemet som användes var SWEREF 99 TM. Höjder sparades som höjder över ellipsoiden för att utesluta det fel som en geoidmodell för med sig (Ågren, 2009). Mätningarna utfördes med användning av minst sex satelliter, vilket krävs för en initialisering vid användning av både GPS och GLONASS (Norin, Engfeldt, Öberg & Jämtnäs, 2010). Elevationsgränsen valdes till 13 grader för att exkludera signaler som färdas lång väg till mottagaren, och därmed utsätts för mer störning (Odolinski, 2010). PDOP-värdet (Positional Dilution Of Precision) sattes till maximalt 4.0, eftersom högre värden ger indikationer på att satelliternas geometriska spridning i tre dimensioner är försämrade och därmed påverkar mätningarnas precision negativt.

Punkterna A, B och C besöktes fem gånger vardera under mätperioden och vid spridda tidpunkter under dagen. Ett mätschema planerades så att det totala antalet mätningar med varje mätmetod och mottagare blev ungefär lika många på de tre punkterna. Vid ett besök på en punkt utfördes mätningar med samtliga mottagare, tillsammans med statisk och automatisk mätmetod av nätverks-RTK-meddelande. Mätmetoden för VRS användes vid mätning med Leica-mottagaren på punkt C i Skärplinge vid fyra tillfällen.

2.5 Analys

De inmätta punkterna analyserades genom beräkningar i Microsoft Excel. Jämförelser gjordes mot kända koordinater för punkterna, för att få en kontroll av dess överensstämmelse. De statistiska mått som beräknades var:

– Medelavvikelse från kända koordinater:

$$Medel = \frac{\Sigma(x - x_{KÄND})}{n} \quad (1)$$

där x är den mätta koordinaten, $x_{KÄND}$ punktens kända koordinat och n antalet mätningar.

– Standardosäkerheten som visar mätningarnas spridning kring deras medelvärde:

$$u(x) = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}} \quad (2)$$

där \bar{x} är mätseriens medelvärde.

– Kvadratisk medelvärde (RMS, root-mean square) som visar mätningarnas spridning kring det kända värdet:

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum(x - x_{KÄND})^2}{n}} \quad (3)$$

Ju lägre medelavvikelsen är desto mer går standardosäkerheten och det kvadratiske medelvärdet mot samma värde. Dessa förhållanden tyder på att systematiska fel inte förekommer i mätningarna.

Beräkningarna ovan gjordes för koordinaterna Northing (N), Easting (E) och h . Därefter slogs värdena för N och E samman till radiella avvikelser och standardosäkerheter för plankomponenten genom ekvation (4):

$$\Delta Plan = \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2} \quad (4)$$

där $\Delta Plan$ är planavvikelser, och ΔN och ΔE är avvikelser från kända koordinater. Vid radiell standardosäkerhet används standardosäkerheterna för N och E istället för avvikelser.

Toleransgränser för att utesluta grova fel bestämdes till 50 mm i plan och 80 mm i höjd. Dessa värden gäller för avvikelser mot kända koordinater, och de bestämdes genom sammanvägningar av olika faktorer. Den förväntade mätosäkerheten i SWEPOS nätverks-RTK-tjänst (15 mm (k=1) i plan och 25 mm (k=1) i höjd) överensstämmer med resultaten från studien av Johansson och Persson (2008) och kan därmed även förväntas för nätverks-RTK-meddelande. Vidare har tidigare utförda studier i SWEPOS nätverks-RTK-tjänst använt dessa värden för toleransgränser (Jansson, 2011; Odolinski & Sunna, 2009). Värdena beräknades till k=3 och därefter gjordes en avrundning uppåt till 50 mm i plan och 80 mm i höjd.

2.6 Test av linjära samband

Regressionsanalys med hjälp av minsta kvadratmetoden utfördes i Microsoft Excel för att se om det finns ett linjärt samband mellan standardosäkerheten för en punkt och avståndet till använd masterstation. För beskrivning av linjär regression se exempelvis Montgomery, Runger och Hubele (2007). Följande formel användes för att beskriva en rät linje:

$$y = mx + b \quad (5)$$

där y och x är koordinater för en punkt på linjen, m är linjens lutning och b dess y-skärningspunkt. Ett signifikanstest utfördes därefter för att kontrollera om dessa parametrar var statistiskt signifikanta, och därmed även säkerställa att existerande linjära samband inte var slumpmässiga. Signifikanstestet utfördes på 95 % konfidensnivå enligt ekvationerna (6) och (7):

$$t_m = \frac{|m|}{u(m)} \quad (6)$$

$$t_b = \frac{|b|}{u(b)} \quad (7)$$

där t är värdet för signifikanstestet, samt $u(m)$ och $u(b)$ är standardosäkerheter för linjens lutning respektive y-skärningspunkt. Om $t > 1,96$ är standardosäkerheterna för m respektive b statistiskt signifikanta.

3 Resultat

3.1 Inmätning

Målsättningen var att lagra 50 mätningar för vardera av de båda mätmetoderna för nätverks-RTK-meddelande, samt mottagare, på punkterna A, B och C. För VRS var målsättningen 25 lagrade mätningar på punkt C. För vissa mottagare och mätmetoder har någon enstaka extra mätning lagrats. I tabell 4 nedan redovisas antalet lagrade mätningar på varje punkt med respektive mottagare och mätmetod. I samma tabell redovisas även antalet mätningar som har uteslutits på varje punkt. Uteslutningen av punkter har grundats på den toleransgräns som bestämts i avsnitt 2.5, nämligen 50 mm planavvikelse och 80 mm höjdavvikelse mot de kända koordinaterna och höjderna.

För Topcon-mottagaren har alla mätningar med statisk mätmetod på punkt B och C exkluderats från beräkningarna av mätosäkerheter, eftersom en övervägande del av mätningarna föll utanför den bestämda toleransgränsen. Se kapitel 4 för en närmare diskussion kring detta. Dessutom förekom avvikelser i storleksordningen av ett par meter. Hänvisning görs till bilaga 1 där spridningen kring kända koordinater kan ses.

Tabell 4: Antal lagrade och uteslutna mätningar på respektive mätpunkt.

| | | Antal lagrade mätningar | | | Antal uteslutna mätningar | | |
|--------|------------|-------------------------|---------|--------|---------------------------|---------|--------|
| Punkt | Mätmetod | Leica | Trimble | Topcon | Leica | Trimble | Topcon |
| A | Automatisk | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 0 |
| | Statisk | 50 | 50 | 53 | 0 | 0 | 12 |
| B | Automatisk | 50 | 50 | 52 | 0 | 0 | 1 |
| | Statisk | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 50 |
| C | Automatisk | 50 | 50 | 50 | 0 | 0 | 2 |
| | Statisk | 50 | 50 | 50 | 1 | 0 | 50 |
| | VRS | 25 | - | - | 0 | - | - |
| Totalt | | 325 | 300 | 305 | 1 | 0 | 115 |
| | | 930 | | | 116 | | |

I tabell 5 redovisas medelvärdet av initialiseringstiden för varje mottagare och mätmetod. I samma tabell redovisas även andelen

lyckade initialiseringar. Initialiseringstiden var längre för Leica-mottagaren vid mätning i det automatiska nätet än för övriga mottagare och mätmetoder. Trimble höll en jämn nivå i både det automatiska och statiska nätet. Generellt för Topcon var att de flesta initialiseringstiderna var mycket korta (4-5 sekunder), men att några var betydligt längre. Detsamma gällde för statisk mätmetod med Leica, dock förekom inte lika stora skillnader mellan långa och korta tider. Medelvärdet kan därför vara en aning missvisande, varför det i bilaga 3 redovisas antalet initialiseringar inom olika tidsintervall. Initialiseringstiden för VRS överensstämde bättre med initialiseringstiden för statisk mätmetod av nätverks-RTK-meddelande än automatisk.

Tabell 5: Initialiseringstider och andel lyckade initialiseringar för varje mottagare och mätmetod.

| Mätmetod | Initialiseringstid (medelvärde i sekunder) | | | Andel lyckade initialiseringar (%) | | |
|-------------------|---|---------|--------|---------------------------------------|---------|--------|
| | Leica | Trimble | Topcon | Leica | Trimble | Topcon |
| Automatisk | 29 | 10 | 6 | 99 | 95 | 99 |
| Statisk | 13 | 10 | 19* | 96 | 97 | 90* |
| VRS | 14 | - | - | 100 | - | - |

*) Värden för statisk mätmetod med Topcon baseras enbart på initialiseringstiderna för punkt A.

Slutligen presenteras andel mätningar där GLONASS inte användes i positionsbestämningen i tabell 6. I några fall fanns inga GLONASS-satelliter tillgängliga genom hela mätserien, och i ett fåtal fall tappades GLONASS-satelliter vid en enskild mätning. Leica-mottagaren tappade kontakten med GLONASS-satelliter flest gånger. Topcon höll en jämnare nivå i antalet satelliter som mottagaren använde genom samtliga mätningar, medan Leica och Trimble hade en större spridning.

Tabell 6: Andel mätningar för varje mottagarfabrikat och mätmetod där GLO-NASS-satelliter inte användes för positionsbestämning.

| Punkt | Mätmetod | Andel mätningar där GLONASS-satelliter föll bort (%) | | |
|-------|------------|--|---------|--------|
| | | Leica | Trimble | Topcon |
| A | Automatisk | 2 | 11 | 10 |
| | Statisk | 2 | 0 | 0 |
| B | Automatisk | 11 | 0 | 0 |
| | Statisk | 0 | 2 | 0 |
| C | Automatisk | 2 | 0 | 0 |
| | Statisk | 20 | 7 | 0 |
| | VRS | 4 | - | - |

3.2 Mätosäkerhet

I tabell 7 och 8 redovisas medelavvikelser, standardosäkerheter och RMS, i både plan och höjd, för de tre mätmetoderna på respektive punkt, för automatiskt respektive statiskt nät.

Tabell 7: Medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS för respektive mottagarfabrikat i automatiskt nät på mätpunkterna A, B och C.

| Punkt | Mottagare | Medelavvikelse (mm) | | Standardosäkerhet (mm) | | RMS (mm) | |
|-------|-----------|---------------------|------|------------------------|------|----------|------|
| | | Plan | Höjd | Plan | Höjd | Plan | Höjd |
| A | Leica | 8 | -23 | 6 | 12 | 10 | 26 |
| | Trimble | 8 | -10 | 7 | 14 | 11 | 17 |
| | Topcon | 13 | -27 | 9 | 11 | 16 | 29 |
| B | Leica | 3 | 6 | 11 | 18 | 11 | 19 |
| | Trimble | 6 | 2 | 8 | 20 | 10 | 20 |
| | Topcon | 10 | -7 | 16 | 18 | 19 | 19 |
| C | Leica | 6 | 3 | 8 | 13 | 10 | 13 |
| | Trimble | 8 | 4 | 9 | 12 | 12 | 13 |
| | Topcon | 8 | -20 | 14 | 26 | 16 | 33 |

Tabell 8: Medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS för respektive mottagarfabrikat i statistiskt nät på mätpunkterna A, B och C.

| | | Medelavvikelse (mm) | | Standardosäkerhet (mm) | | RMS (mm) | |
|-------|-----------|------------------------|------|---------------------------|------|-------------|------|
| Punkt | Mottagare | Plan | Höjd | Plan | Höjd | Plan | Höjd |
| A | Leica | 12 | 0 | 11 | 13 | 16 | 13 |
| | Trimble | 11 | -10 | 8 | 13 | 13 | 16 |
| | Topcon | 13 | 4 | 16 | 30 | 20 | 30 |
| B | Leica | 5 | 7 | 12 | 18 | 13 | 19 |
| | Trimble | 2 | 10 | 9 | 19 | 9 | 21 |
| C | Leica | 5 | 9 | 12 | 16 | 13 | 19 |
| | Trimble | 4 | 21 | 11 | 16 | 12 | 27 |

För en tydligare överblick har sammanställningar över den totala mätosäkerheten för automatiskt och statistiskt nät för samtliga tre punkter gjorts, vilket kan ses i tabell 9. För både plan- och höjdkomponenten redovisar Trimble och Leica resultat på ungefär samma nivå, något lägre mätosäkerhet för Leica i det automatiska nätet respektive Trimble i det statistiska nätet för plankomponenten, medan omvänt förhållande råder för höjdkomponenten. Topcon erhöi en högre mätosäkerhet än de övriga fabrikaten i båda näten. Mätosäkerheten var också generellt något lägre för det automatiska nätet än det statistiska.

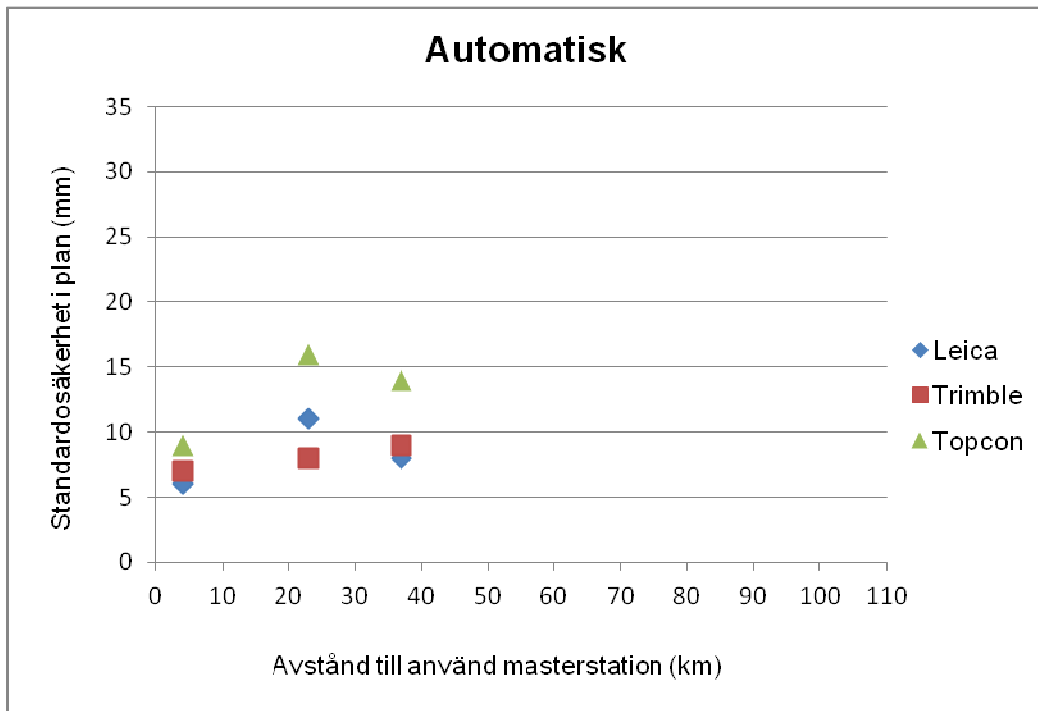
Tabell 9: Medelavvikelse, standardosäkerhet och RMS för respektive mottagarfabrikat och mätmetod för nätverks-RTK-meddelande.

| | | Medelavvikelse (mm) | | Standardosäkerhet (mm) | | RMS (mm) | |
|------------|-----------|------------------------|------|---------------------------|------|-------------|------|
| Mätmetod | Mottagare | Plan | Höjd | Plan | Höjd | Plan | Höjd |
| Automatisk | Leica | 5 | -5 | 9 | 20 | 10 | 20 |
| | Trimble | 6 | -1 | 9 | 17 | 11 | 17 |
| | Topcon | 10 | -18 | 14 | 21 | 17 | 27 |
| Statisk | Leica | 7 | 5 | 12 | 16 | 14 | 17 |
| | Trimble | 5 | 7 | 10 | 20 | 12 | 22 |
| | Topcon* | 13 | 4 | 16 | 30 | 20 | 30 |

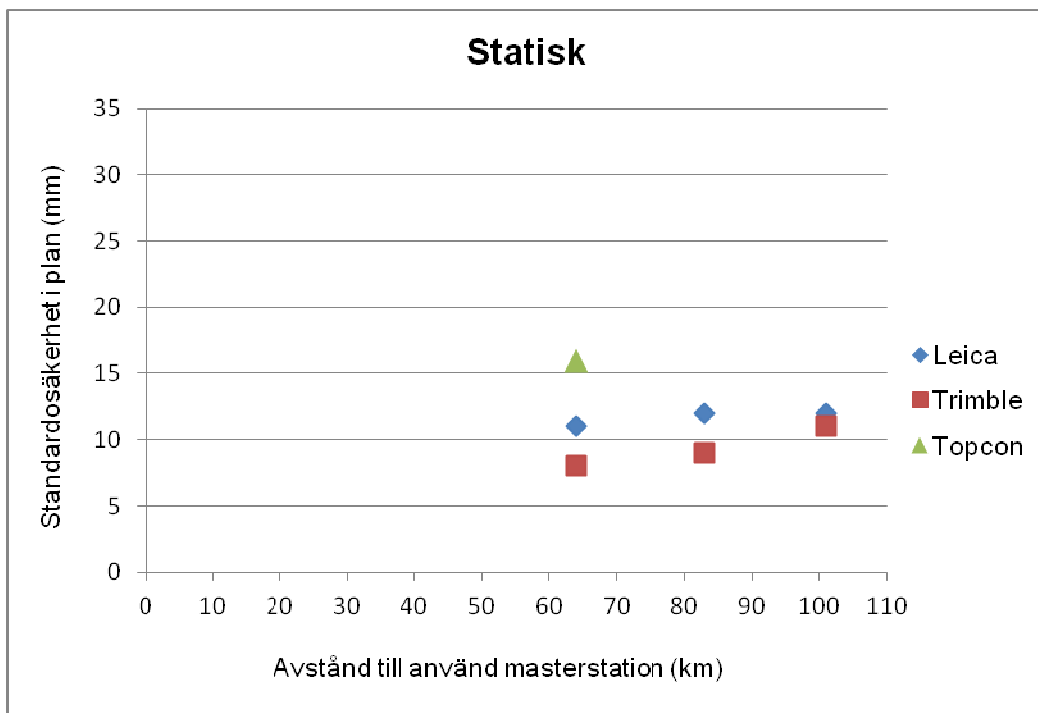
*) Resultaten för Topcon i det statiska nätet grundas enbart på mätningarna utförda på punkt A.

Mätningarna med VRS på punkt C med Leica-mottagaren gav en medelavvikelse på 6 mm, en standardosäkerhet på 7 mm och RMS på 9 mm i plan. För höjdkomponenten blev resultatet -2 mm i medelavvikelse samt 11 mm i standardosäkerhet och RMS.

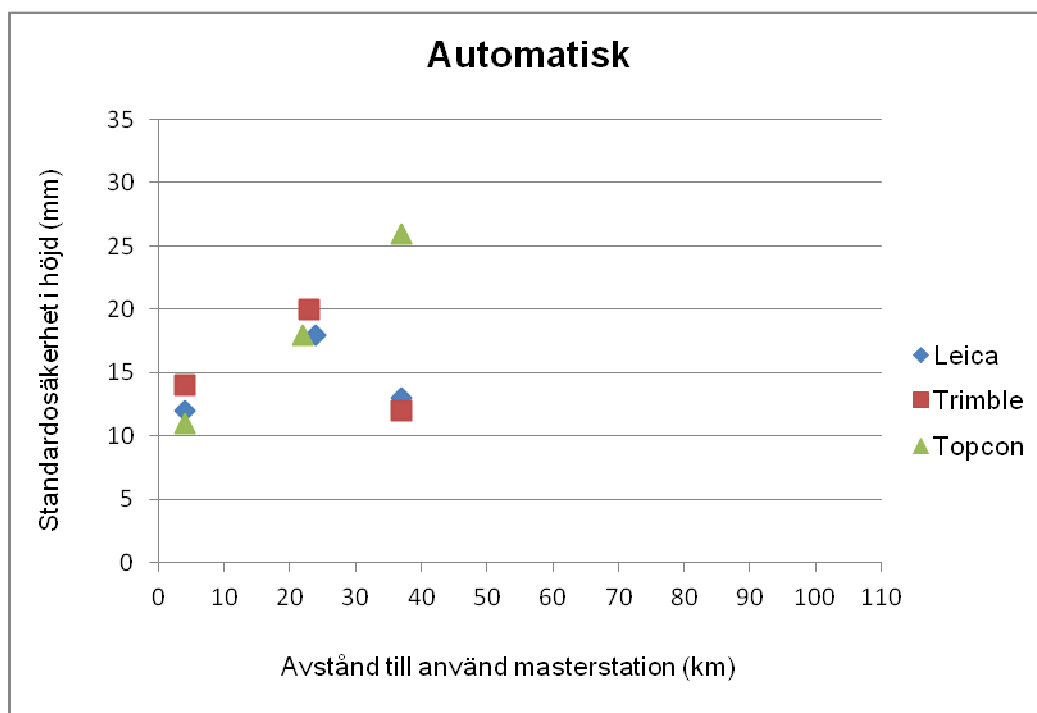
För en redogörelse av hur standardosäkerheten i plan påverkades, när avståndet till använd masterstation ökades, se figur 4 och 5. Generellt ökade standardosäkerheten i plan när avståndet blev längre. Detta var tydligast för Trimble, för vilken det förekom i både automatiskt och statiskt nät. För Leica-mottagaren syntes detta i det statiska nätet. För höjdkomponenten redovisas resultatet i figur 6 och 7. För Leica- och Trimble-mottagarna ökade först standardosäkerheten med avståndet, men sjönk sedan på det längsta avståndet. För Topcon förekom en jämt stigande trend i det automatiska nätet.



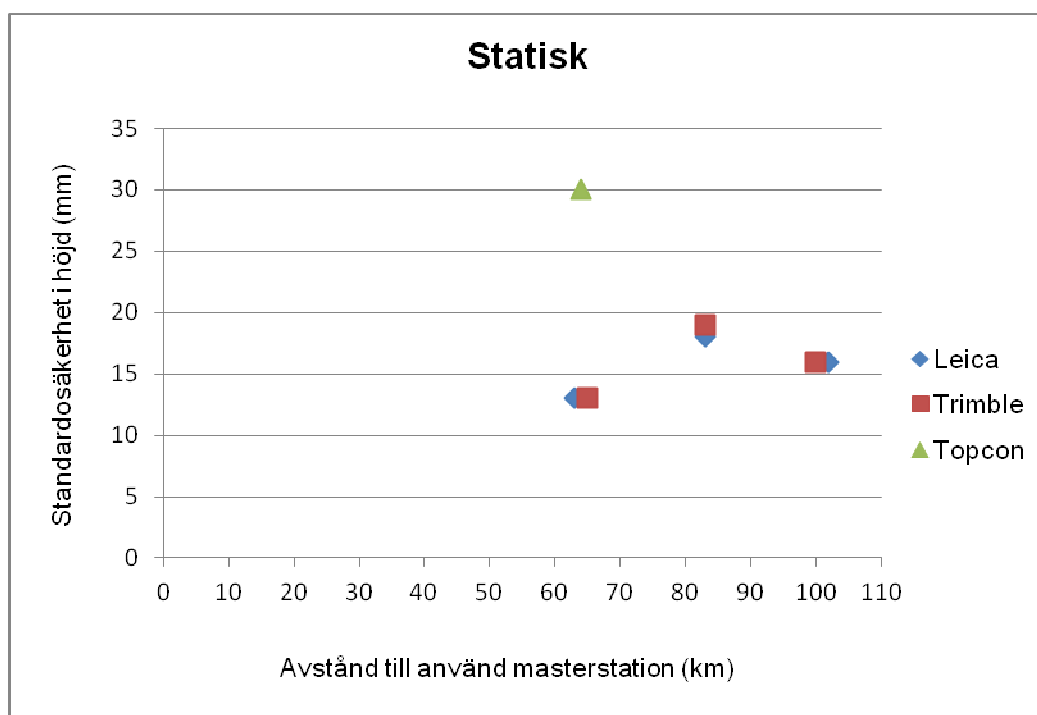
Figur 4: Standardosäkerheten i plan för automatisk mätmetod, i förhållande till avstånd till använd masterstation.



Figur 5: Standardosäkerheten i plan för statisk mätmetod, i förhållande till avstånd till använd masterstation.



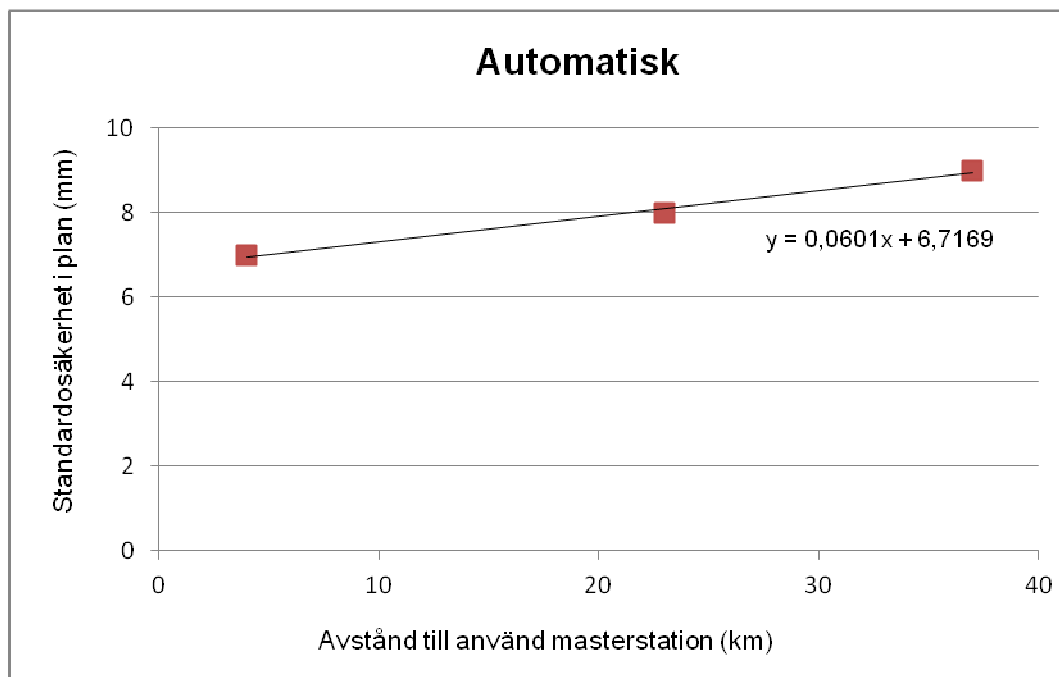
Figur 6: Standardosäkerheten i höjd för automatisk mätmetod, i förhållande till avstånd till använd masterstation.



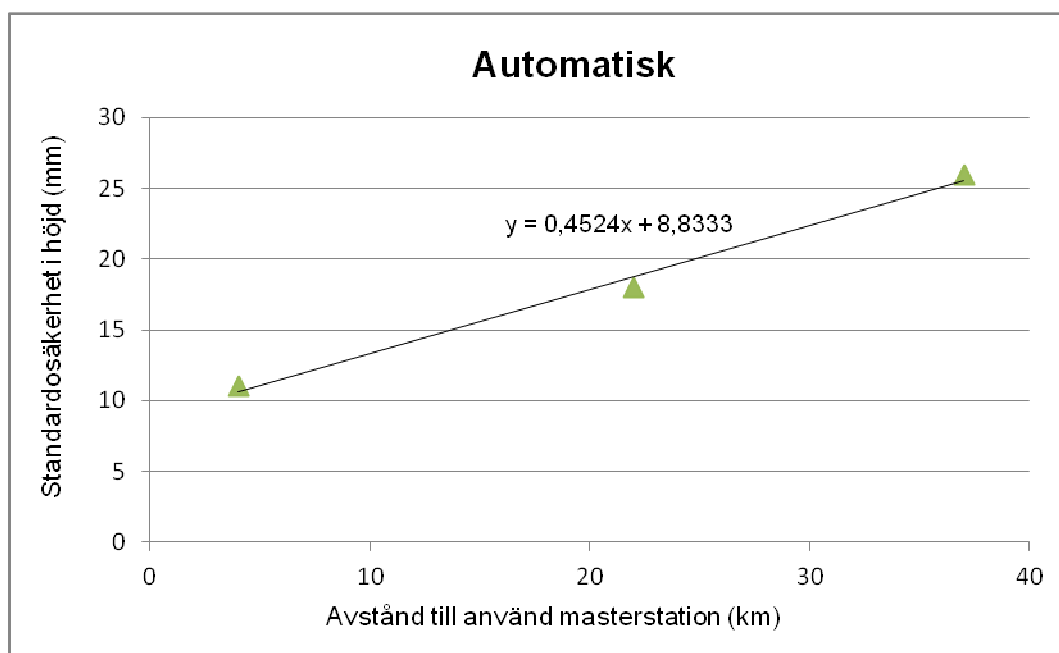
Figur 7: Standardosäkerheten i höjd för statisk mätmetod, i förhållande till avstånd till använd masterstation.

3.3 Linjära samband

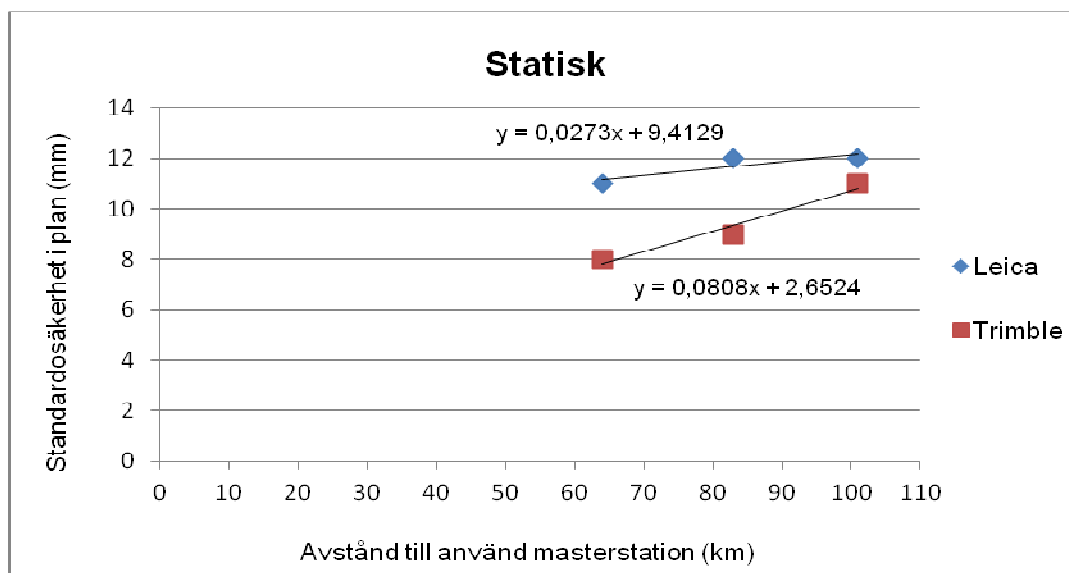
De punktserier som i figur 4 till 7 framstår som linjära testades utifrån vad som beskrivs i avsnitt 2.6. I nästkommande tre figurer, 8 till 10, har en rät linje anpassats till punkterna, och linjens ekvation presenteras.



Figur 8: Regressionslinje för planosäkerheter för Trimble i automatiskt nät.



Figur 9: Regressionslinje för höjdosäkerheter för Topcon i automatiskt nät.



Figur 10: Regressionslinjer för planosäkerheter för Leica och Trimble i statistiskt nät, gäller enbart avståndsintervallet 60-110 km.

Resultaten från signifikanstesten redovisas i tabell 10. För Trimble-mottagaren i automatiskt nät och plankomponent, samt för Topcon-mottagaren i automatiskt nät och höjdkomponent, är t-värdena högre än 1,96, vilket därmed innebär att m och b är statistiskt signifikanta i dessa fall. Således går det att konstatera att det finns ett linjärt samband mellan standardosäkerheten och avståndet till använd masterstation i dessa fall. För de båda andra fallen, Trimble och Leica i statistiskt nät och plan, utfördes signifikanstest enbart för m , eftersom y-skärningspunkten, b , ligger långt från mätningarna i statistiskt nät. Resultatet visade att det finns en linjär trend för Trimble, vars t-värde är större än 1,96, medan det för Leica inte finns någon trend. Dessa resultat gäller bara för det undersökta avståndsintervallet, 60–110 km.

Tabell 10: Standardosäkerheter för m och b samt respektive t-värden.

| Mätsituation | Standardosäkerhet | | t-värde | |
|-------------------------|-------------------|--------|---------|---------|
| | $u(m)$ | $u(b)$ | t_m | t_b |
| Trimble plan automatisk | 0,0053 | 0,1329 | 11,4315 | 50,5425 |
| Topcon höjd automatisk | 0,0412 | 1,0293 | 10,9697 | 8,5816 |
| Trimble plan statistisk | 0,0169 | 1,4173 | 4,7920 | - |
| Leica plan statistisk | 0,0152 | 1,2755 | 1,7962 | - |

4 Diskussion

Vid bestämningen av toleransgränserna sattes dessa till 50 mm (3 σ) i plan och 80 mm (3 σ) i höjd, trots att det finns studier som visar på att lägre mätosäkerheter är möjligt att uppnå vid nätverks-RTK-mätning i SWEPOS (Mårtensson m.fl., 2012). Detta beslut berodde på att de insamlade mätningarna i den här studien är gjorda i standardnät. Alltså gäller avvikelserna för standardnät, och de överensstämmer med vad till exempel Johansson och Persson (2008) presenterar i sin studie. Dessutom utförde Mårtensson m.fl. (2012) sin studie med VRS som, vilket den här studien visar, erhåller lägre mätosäkerhet än nätverks-RTK-meddelande i de fall där mätningar med VRS gjordes, alltså med Leica-mottagaren på punkt C.

Som nämnts tidigare i avsnitt 3.1 har samtliga mätningar i statistiskt nät med Topcon-mottagaren på mätpunkterna B och C exkluderats på grund av att en övervägande del av de mätningarna hamnade utanför uppsatta toleransgränser. Anledningar till detta har inte närmare kunnat utredas inom ramen för den här studien, men tänkbart är att de långa avstånden i det statistiska nätet är en förklaring.

4.1 Analys och jämförelse

Vid en närmare analys av mätresultatet syns en förekomst av systematiska avvikelser från de koordinater som har använts som kända i den här studien. Kontrolleras värdena för mätosäkerheten uppdelad på de tre mätpunkterna A, B och C, upptäcks systematiska avvikelser för samtliga fabrikat för höjdkomponenten på punkt A i det automatiska nätet, mätningarna ligger lägre än de kända koordinaterna. Liknande avvikelser på punkt A förekommer enbart för Trimble i det statistiska nätet. Det finns också systematiska avvikelser på punkt C i det automatiska nätet för Topcon. Eftersom inte samma systematik förekommer i båda näten kan avvikelserna inte förklaras med att det finns fel i de koordinater som använts som kända. Inte heller borde avvikelserna i det automatiska nätet vara relaterade till att sikten är något skymd vid framförallt punkt A, eftersom samma avvikelser inte förekommer i det statistiska nätet. Istället kan tänkbara förklaringar vara skillnader i nätens uppbyggnad och funktion.

Vad gäller spridningar i plan förefaller mätningarna för punkt A vara förskjutna i östlig riktning (bilaga 1) för samtliga mottagare i det automatiska nätet. Liknande förskjutningar i östlig riktning kan hittas på punkt B och C för Leica och Trimble i automatiskt nät samt för punkt B med Topcon, men inte i statistiskt nät. För punkt B och C med Topcon i det statistiska nätet finns istället avvikelser i västlig riktning. I det statistiska nätet kan däremot ses en förskjutning i nordlig riktning, som inte förekommer i det automatiska nätet. Dessa olika systema-

tiska avvikelser mellan automatiskt och statistiskt nät styrker förklaringen om att näten påverkar mätningarna olika.

Från de presenterade mätosäkerheterna syns att Leica och Trimble redovisar ett likvärdigt resultat, där de båda fabrikaten ligger på ungefär samma osäkerhetsnivå. Skillnaderna är några millimeter, och det är inte genomgående en av dem som presterar bättre eller sämre. Topcon har generellt högre mätosäkerheter, och skillnaderna mot kända koordinater är större i det statistiska nätet, där avstånden också är längre.

Generellt för samtliga mottagare syns en något större spridning kring kända koordinater (bilaga 1) för den statistiska mätmetoden, än vad som görs för den automatiska mätmetoden. För Leica- och Trimble-mottagarna syns en större spridning i norrsydlig riktning än vad som görs i östvästlig riktning, detta gäller både automatiskt och statistiskt nät. Det här spridningsmönstret beror troligen på att tillgången på satelliter är större i östvästlig riktning än i norrsydlig. Topcon har ett mer varierande resultat, där spridningarna för punkt A är störst i norrsydlig riktning, men att i övriga fall är spridningarna övervägande i östvästlig riktning. Detta hänger troligen också samman med att avstånden blir för långa för Topcon-mottagaren.

De här spridningsmönstren i norrsydlig riktning förekommer även i studien av Johansson och Persson (2008). En jämförelse med resultaten från den studien visar att mätosäkerheterna för Leica överensstämmer förutom standardosäkerheten för höjdkomponenten i det statistiska nätet som är cirka 5 mm lägre i den här studien. För Trimble-mottagaren är mätosäkerheterna lägre i den här studien i princip samtliga fall. Skillnaderna för standardosäkerheten är 4 mm i plan respektive 6 mm i höjd i det automatiska nätet, och 3 mm i plan respektive 5 mm i höjd i det statistiska nätet. En förklaring kan vara att GLONASS har använts i den här studien. Övriga studier (Brown m.fl., 2006; Garrido m.fl., 2011; Wang m.fl., 2010) som presenterades i avsnitt 1.3 redovisar mätosäkerheter som är högre än de som presenteras här.

Görs en jämförelse av standardosäkerhet för VRS med densamma för automatiskt nät med Leica-mottagaren, går det att se att skillnaderna är upp till 2 mm i plan och 9 mm i höjd, till fördel för VRS. Mellan VRS och statistiskt nät är skillnaden 5 mm i plan och i höjd, där VRS har de lägre värdena. Värdena för mätosäkerheten för VRS ligger även lägre än de som presenterats av Johansson och Persson (2008), framförallt standardosäkerheten i höjdkomponenten som skiljer 7 mm. Generellt är skillnaderna mellan VRS och nätverks-RTK-meddelande större i den här studien, dock ska beaktande tas till att få mätningar har utförts med VRS och enbart på en mätpunkt. Även för mätningarna med VRS förekommer det en systematisk trend, här i

östlig riktning. Dessa avvikelser bekräftas också av Mårtensson m.fl. (2012).

De tre GNSS-mottagarna använder olika metoder för initialisering, vilket har påverkat de registrerade initialiseringstiderna. Det är framförallt i vilket lösningsläge som initieringen påbörjas som skiljer mellan fabrikaten. Ett förslag kan vara att stänga av mottagarna mellan varje individuell mätning för att vara säker på att det inte finns någon lösning när en initiering startar. Hur lång tid det tar att initialisera kan bero på storleken på det nät av referensstationer som används, enligt Norin, Hedling, Johansson, Persson och Lilje (2009). I deras studie gav ett test med ett delnät om fem SWEPOS-stationer ett medelvärde för initialisering på 24 s. Det kan jämföras med Johansson och Persson (2008) som med ett delnät om 14 SWEPOS-stationer fick ett medelvärde på ca 40 s. De testmätningar som har utförts i den här studien visar kortare initialiseringstider än 40 s, vilket i sådana fall kan förklaras med att färre referensstationer har använts: nio för det statiska nätet och sju för det automatiska. Tidsskillnader näten emellan uppkommer för Leica- och Topcon-mottagarna, för vilka omvänd situation råder: längst tider får Leica med det automatiska nätet medan Topcon får det med statiska nätet. Tidsskillnaderna näten emellan är dock ganska stora, i storleksordningen 10-15 sekunder. Eftersom det bara är två referensstationer mer i det statiska nätet beror skillnaderna troligtvis även på något mer än det som Norin m.fl. (2009) har påvisat, en förklaring är olika initialiseringssätt. Inga liknande tidsskillnader mellan näten finns för Trimble-mottagaren.

Att initialiseringstiderna skiljer sig mot det som Johansson och Persson (2008) presenterar i sin rapport kan till viss del förklaras med att oinitialiseringarna har utförts på olika vis. Författarna tillämpade en metod där mottagaren stängdes av mellan varje mätning, vilket inte har gjorts vid testmätningarna i den här studien. Andra tänkbara förklaringar till skillnaderna jämfört med studien av Johansson och Persson (2008) är att näten skiljer sig vad gäller antal referensstationer och avstånd till dem, samt att GLONASS har använts i den här studien, vilket innebär att fler satelliter används. Författarna tillämpade även fler initialiseringsförsök, 150 mot cirka 50 i det här fallet.

Andelen lyckade initialiseringar överensstämmer med de värden som tidigare studier presenterar och skiljer inte nämnvärt mellan fabrikat eller mätmetod förutom för Topcon i det statiska nätet. I detta fall var andelen lyckade initialiseringar något lägre än för övriga mottagarfabrikat och mätmetoder. En anledning är att ett krav på två minuter för initialisering först tillämpades, vilket Topcon i flera fall inte klarade. Detta krav sänktes sedan och initialiseringar på upp mot fem minuter kunde behövas för att erhålla fixlösning. Detta kan även vara en bidragande faktor till att Topcon redovisar högre mätosäkerheter än de båda andra fabrikaten.

Att standardosäkerheten påverkas av avstånd till använd masterstation är tydligt i avsnitt 3.2. Det är också något som bekräftas i studien av Wang m.fl. (2010), där liknande trender för standardosäkerheterna i plan och höjd redovisas. I studien av Johansson och Persson (2008) kan inte detta avståndsberoende påvisas.

4.2 Framtida studier

En utredning kring vilka algoritmer som används i de olika mottagarna skulle vara intressant för att förtydliga hur mottagarna använder MAX-korrektioner. De olika mottagarfabrikaten använder olika namn för den inställning som syftar till nätverks-RTK-meddelande, och det kan då vara av intresse att undersöka om mottagarna använder likvärdiga metoder och att de följer konceptet med nätverks-RTK-meddelande. Detta gäller särskilt för Topcon-mottagaren som hade problem på de längre avstånden. Ytterligare undersökningar kring hur användning av automatiskt och statiskt nät påverkar mätningar bör också göras, speciellt eftersom det i den här studien förekommer olika systematiska avvikelser i automatiskt och statiskt nät.

I resultatet som presenteras i den här studien finns det en tydlig indikation på att mätosäkerheten för nätverks-RTK-meddelande är beroende av avståndet till använd masterstation. Ytterligare undersökningar borde göras angående avstånd som en kritisk gräns för mätosäkerheten nås på. En sådan utredning kan leda till effektivare planering av referensstationsnät för statisk användning av nätverks-RTK-meddelande, samt säkerställande av att en godkänd osäkerhetsnivå kan uppnås. Ett annat sätt att minska avståndets påverkan på ett mätresultat kan vara att användaren har möjlighet att välja vilken referensstation i ett statiskt nät som den befinner sig närmast, istället för att master stationen är fördefinierad oavsett avstånd.

Som nämndes i avsnitt 1.2 kan nätverks-RTK-meddelande vara ett steg i utvecklingen mot kontinuerlig mätning under förflyttningar, där inga avbrott på grund av byte av referensstation sker. Rörliga tester bör genomföras för att undersöka hur nätverks-RTK-meddelande fungerar i sådana situationer. Det som är intressant att utreda är hur bytet av masterstation och hjälpstationer går till för både automatisk och statisk mätmetod. Även vid vilket avstånd som bytet sker och om fixlösningen bibehålls, är intressant att undersöka.

5 Slutsatser

Syftet med detta examensarbete var att undersöka hur olika GNSS-mottagare presterar tillsammans med automatisk och statisk mätmetod av nätverks-RTK-meddelande, genom att utföra nätverks-RTK-mätning mot referensstationer i SWEPOS nät. De tre mottagare som användes var Leica, Trimble och Topcon. Resultatet visar att Leica och Trimble uppnår ungefär samma mätosäkerhetsnivå med de respektive mätmetoderna. Topcon hade ett generellt problem för det statiska nätet, och erhöll där något högre värden. Standardosäkerheterna är generellt även högre för statiskt än automatiskt nät, dock visar resultatet på systematiska skillnader näten emellan. VRS erhåller lägre osäkerheter än statisk och automatisk mätmetod av nätverks-RTK-meddelande. Initialiseringstiden skiljer mycket mellan mottagarna, både vad gäller tidslängd och vilken av mätmetoderna som har längst respektive kortast tid. Det beror delvis på att mottagarna oinitialiserades på olika sätt. Standardosäkerheterna i både plan och höjd är till viss del beroende av avståndet till använd masterstation för samtliga mottagarfabrikat. Det var enbart i ett fåtal fall som GLONASS inte användes i positionsbestämningen.

Referenser

Alves, D. B. M. & Monico, J. F. G. (2011). GPS/VRS positioning using atmospheric modeling. *GPS Solutions*, 15(3), 253-261. doi: 10.1007/s10291-010-0187-3

Brown, N., Geisler, I. & Troyer, L. (2006). RTK Rover Performance using the Master-Auxiliary Concept. *Journal of Global Positioning Systems*, 5(1-2), 135-144. Från <http://www.gmat.unsw.edu.au/wang/jgps/v5n12/v5n12p21.pdf>

Emardson, R., Jarlemark, P., Bergstrand, S., Nilsson, T. & Johansson, J. (2009). *Measurement accuracy in Network-RTK* (SP Report, 2009:23). Från <http://www.sp.se/en/publications/Sidor/Publikationer.aspx>

Garrido, S., Giménez, E., de Lacy, C. & Gil, A. J. (2011). Testing precise positioning using RTK and NRTK corrections provided by MAC and VRS approaches in SE Spain. *Journal of Spatial Science*, 56(2), 169-184. doi: 10.1080/14498596.2011.623341

Hofmann-Wallenhof, B., Lichtenegger, H. & Collins, J. (2001). *Global Positioning Systems: Theory and Practice* (5th ed.). Wien: Springer.

Janssen, V. (2009, 1-3 december). *A comparison of the VRS and MAC principles for network RTK*. In Proceedings of International Global Navigation Satellite Systems Society, Symposium, Queensland, Australien. Från <http://eprints.utas.edu.au/9530/>

Jansson, J. (2011). *Undersökning av mätosäkerheten i det förtätade SWE-POS-nätet i Stockholmsområdet: vid mätning med nätverks-RTK* (LMV-rapport, 2011:2). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

JCGM 100. (2008). Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG 1).

Johansson, D. & Persson, S. (2008). *Kommunikationsalternativ för nätverks-RTK: virtuell referensstation kontra nätverksmeddelande* (LMV-rapport, 2008:4). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Landau, H., Vollath, U. & Chen, X. (2002). Virtual Reference Station Systems. *Journal of Global Positioning Systems*, 1(2), 137-143. Från http://www.scirp.org/fileOperation/download.aspx?path=nav20090200008_97580842.pdf&type=journal

Lilje, C., Engfeldt, A. & Jivall, L. (2007). *Introduktion till GNSS* (LMV-rapport, 2007:11). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Montgomery, D. C., Runger, G. C. & Hubele, N. F. (2007). *Engineering statistics* (4th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

Mårtensson, S.-G., Reshetyuk, Y. & Jivall, L. (2012). Measurement uncertainty in network RTK GNSS-based positioning of a terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Geodesy*, 6(1), 25-32. doi: 10.1515/jag-2011-0013

Norin, D., Engfeldt, A., Öberg, S. & Jämtnäs, L. (2010). *Kortmanual för mätning med SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst* (LMV-rapport, 2006:2). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Norin, D., Hedling, G., Johansson, D., Persson, S. & Lilje, M. (2009, 26-28 januari). *Practical Evaluation of RTCM Network RTK Messages in the SWEPOS Network*. In Proceedings of ION ITM 2009, Anaheim, USA. Från http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=8318

Norin, D., Jonsson, B. & Wiklund, P. (2008, 14-19 juni). *SWEPOSTTM and its GNSS-Based Positioning Services*. In Proceedings of FIG Working Week 2008, Stockholm, Sverige. Från <http://www.fig.net/pub/fig2008/techprog.htm>

Odolinski, R. (2010). *Checklista för nätverks-RTK* (LMV-rapport, 2010:3). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Odolinski, R. & Sunna, J. (2009). *Detalj mätning med nätverks-RTK: en noggrannhetsundersökning* (LMV-rapport, 2009:2). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Schofield, W. & Breach, M. (2007). *Engineering Surveying* (6th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

Takac, F. & Zelzer, O. (2008, 16-19 september). *The Relationship Between Network RTK Solutions MAC, VRSTTM, PRS, FKP and i-MAX*. In Proceedings of ION GNSS 21st. International Technical Meeting of the Satellite Division, Savannah, GA. Från http://www.ion.org/search/view_abstract.cfm?jp=p&idno=7964

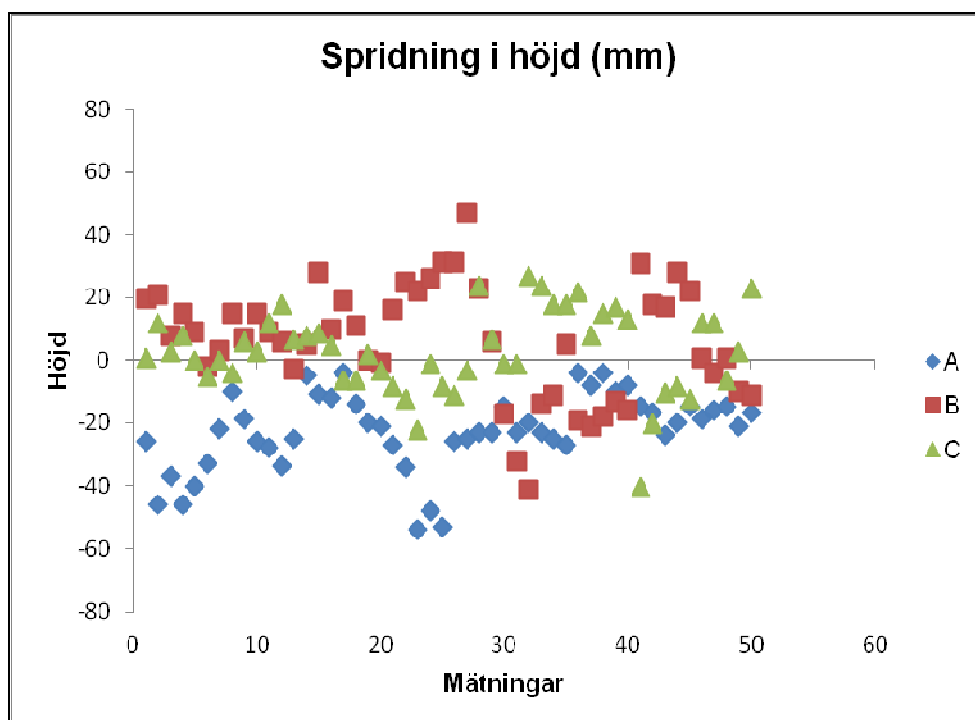
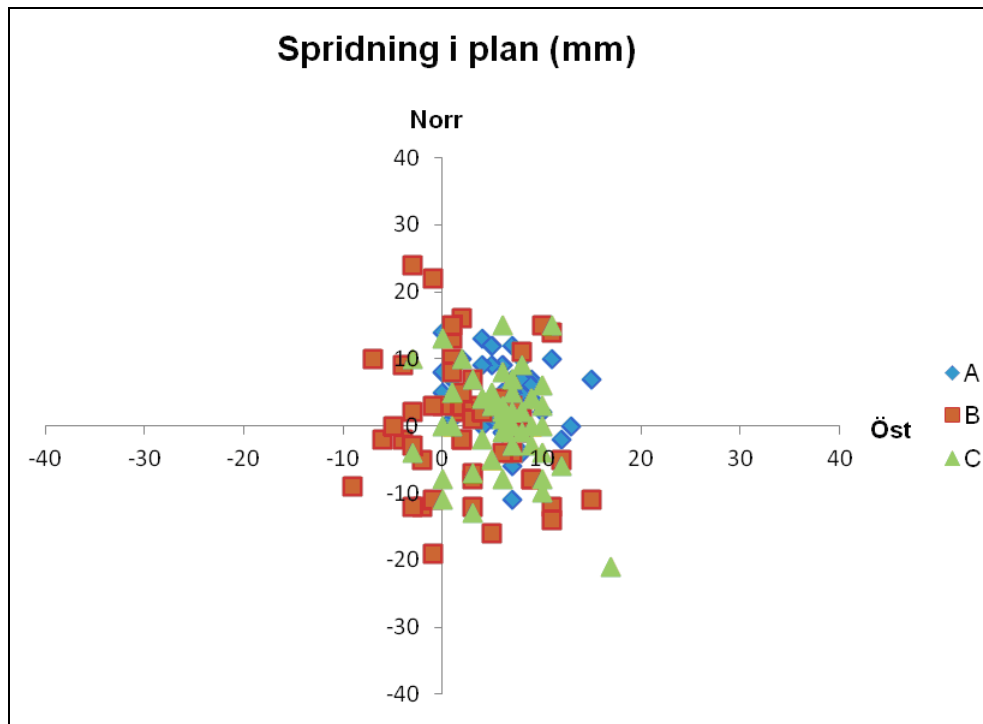
Wang, C., Feng, Y., Higgins, M. & Cowie, B. (2010). *Assesment of Commercial Network RTK User Positioning Performance over Long*

Inter-Station Distances. *Journal of Global Positioning Systems*, 9(1), 78-89. doi: 10.5081/jgps.9.1.78

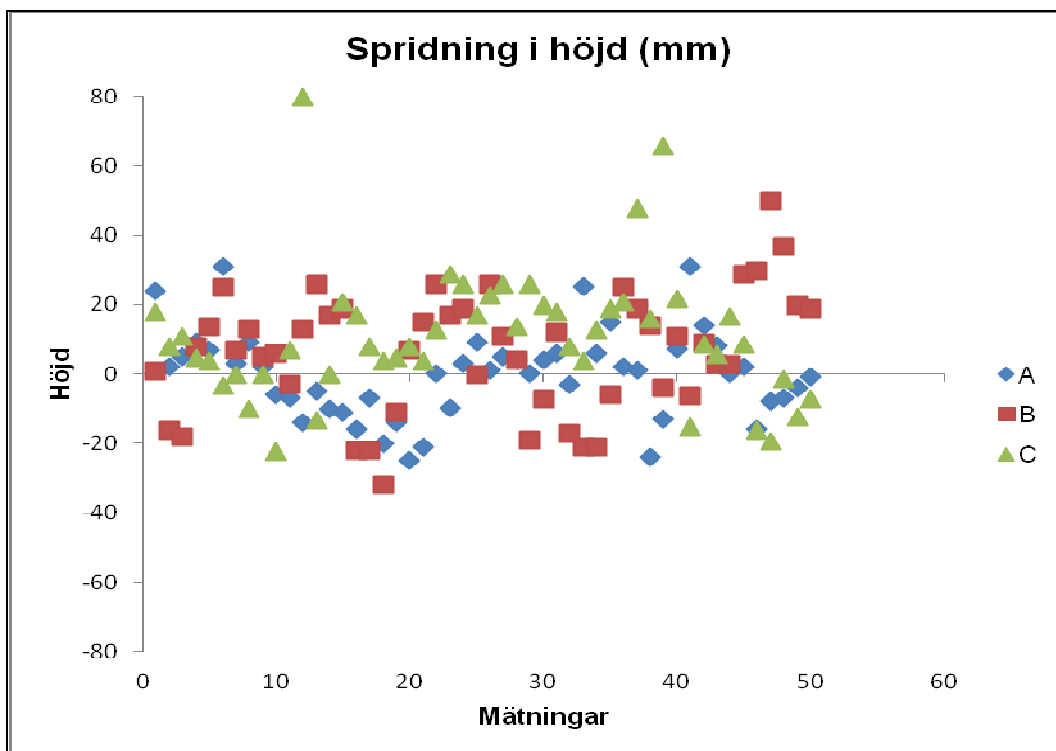
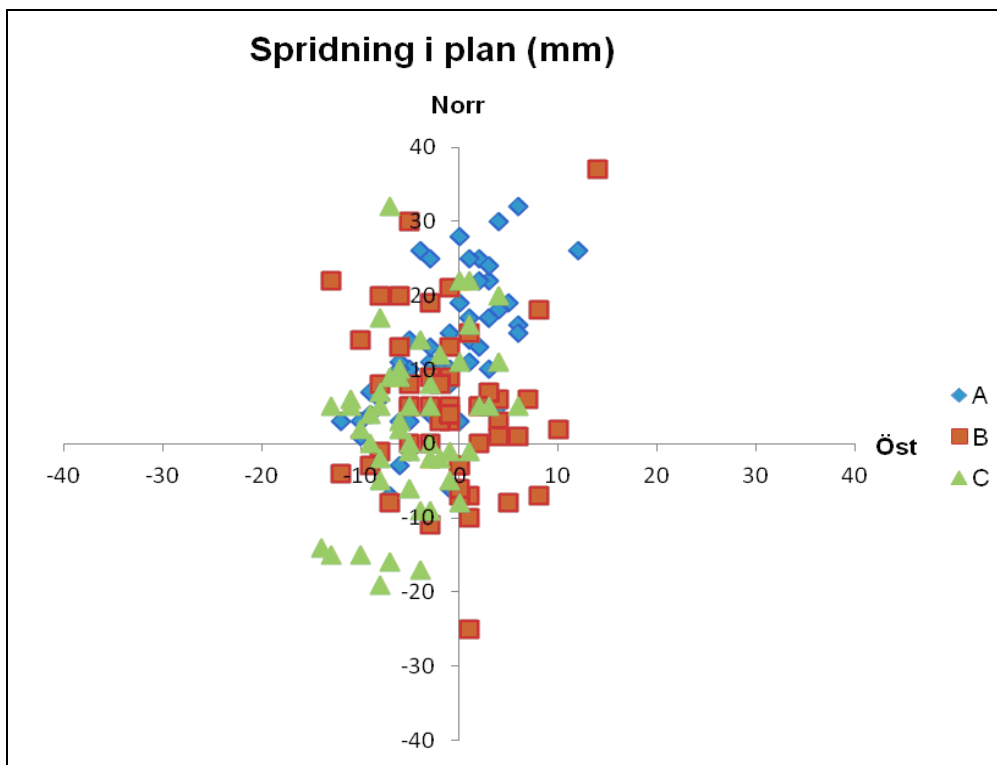
Ågren, J. (2009). *Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70* (LMV-rapport, 2009:1). Gävle: Lantmäteriet. Från http://www.lantmateriet.se/templates/LMV_Page.aspx?id=2688

Bilaga 1. Mätningarnas spridning i plan och höjd kring kända koordinater på mätpunkterna A, B och C

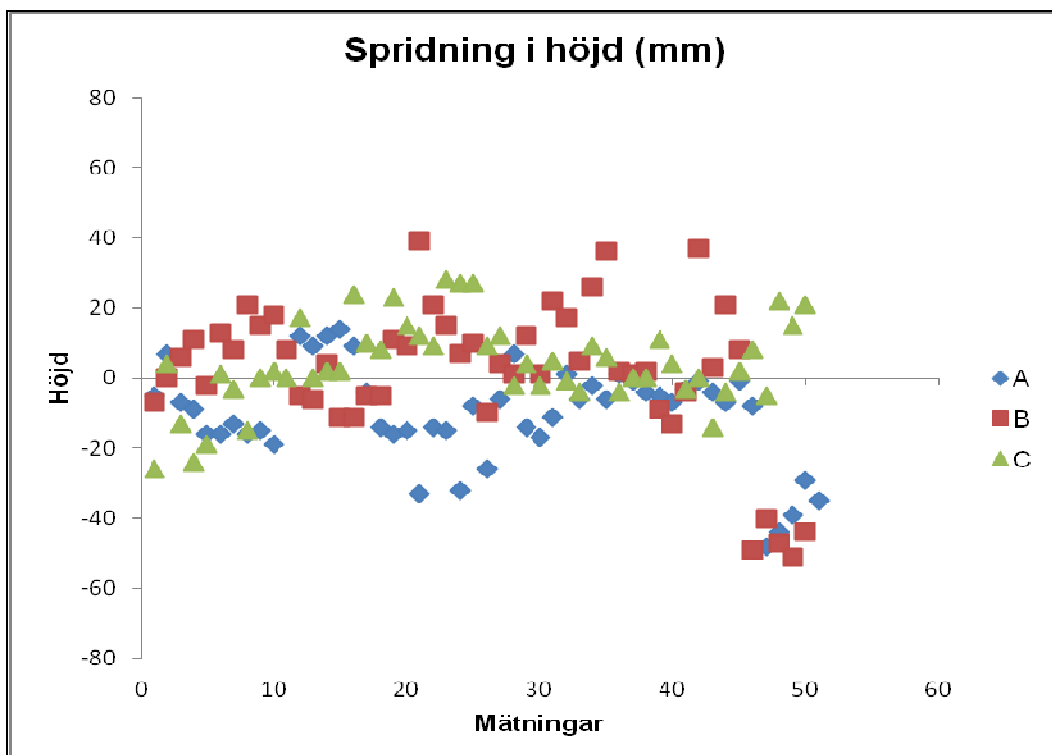
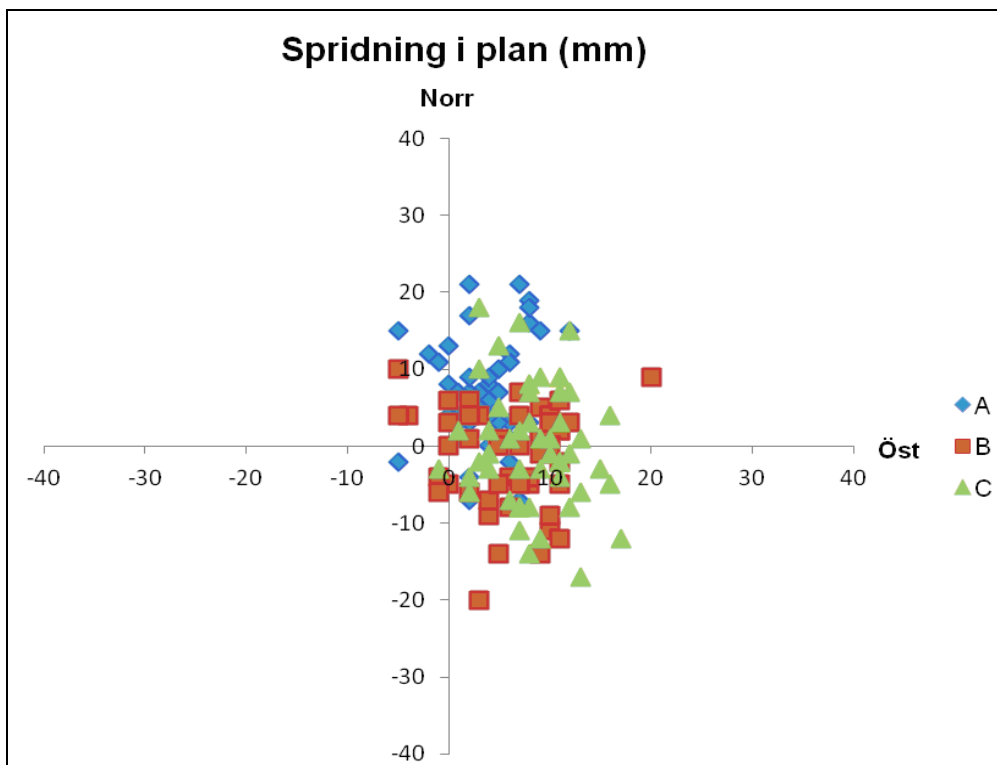
Automatisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Leica



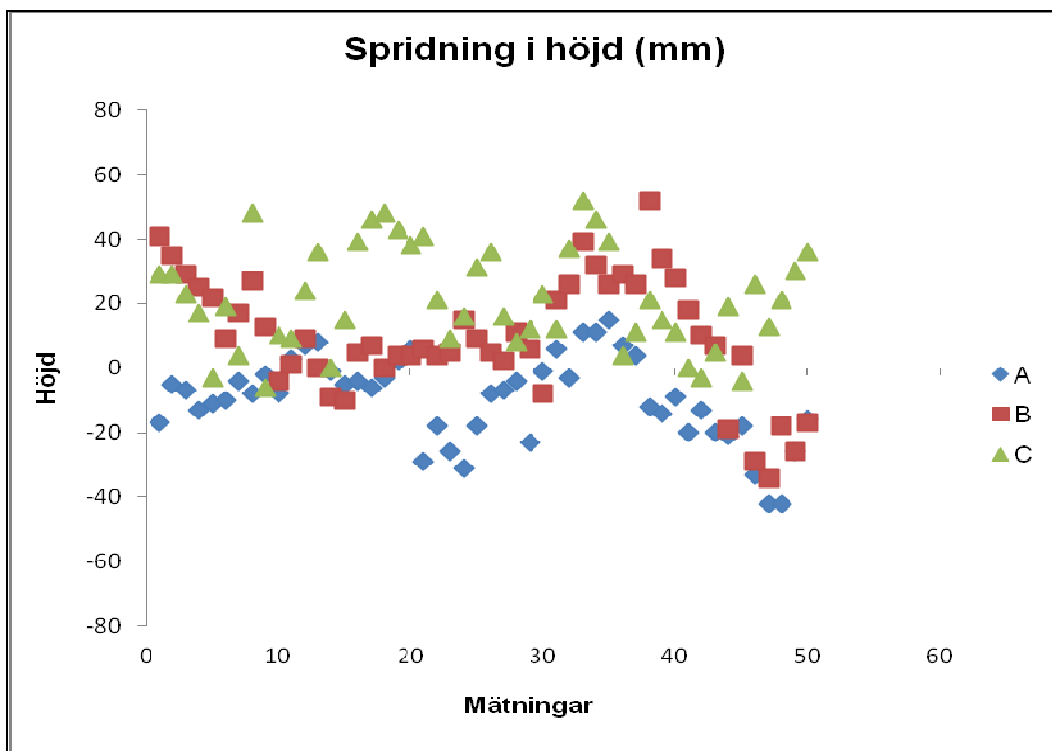
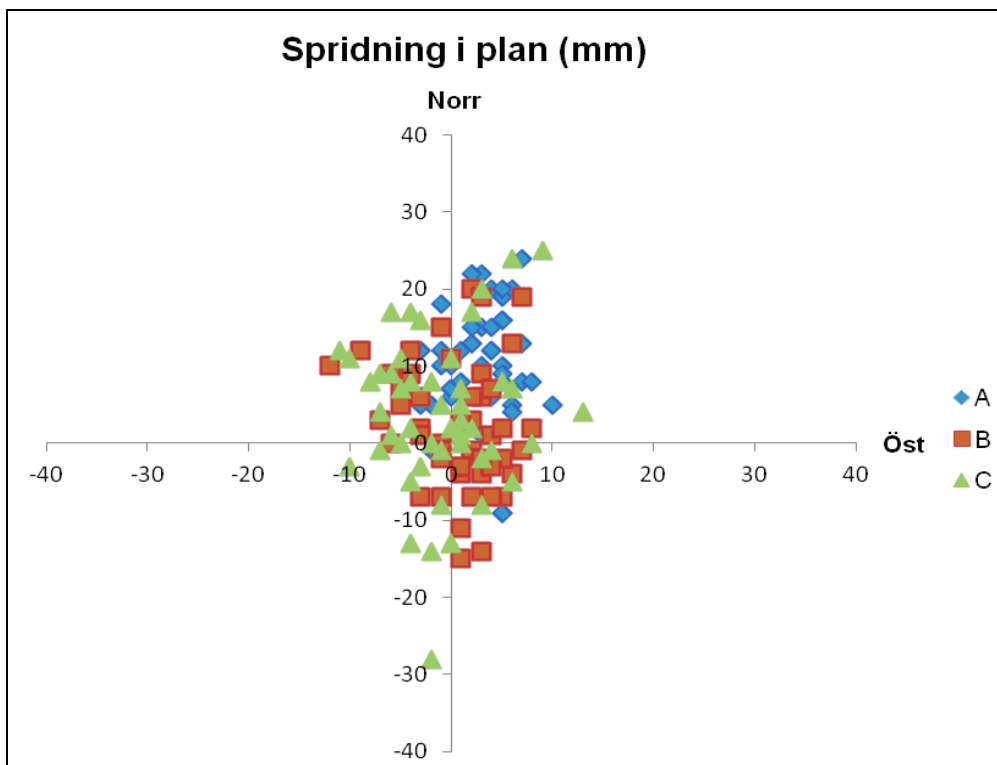
Statisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Leica



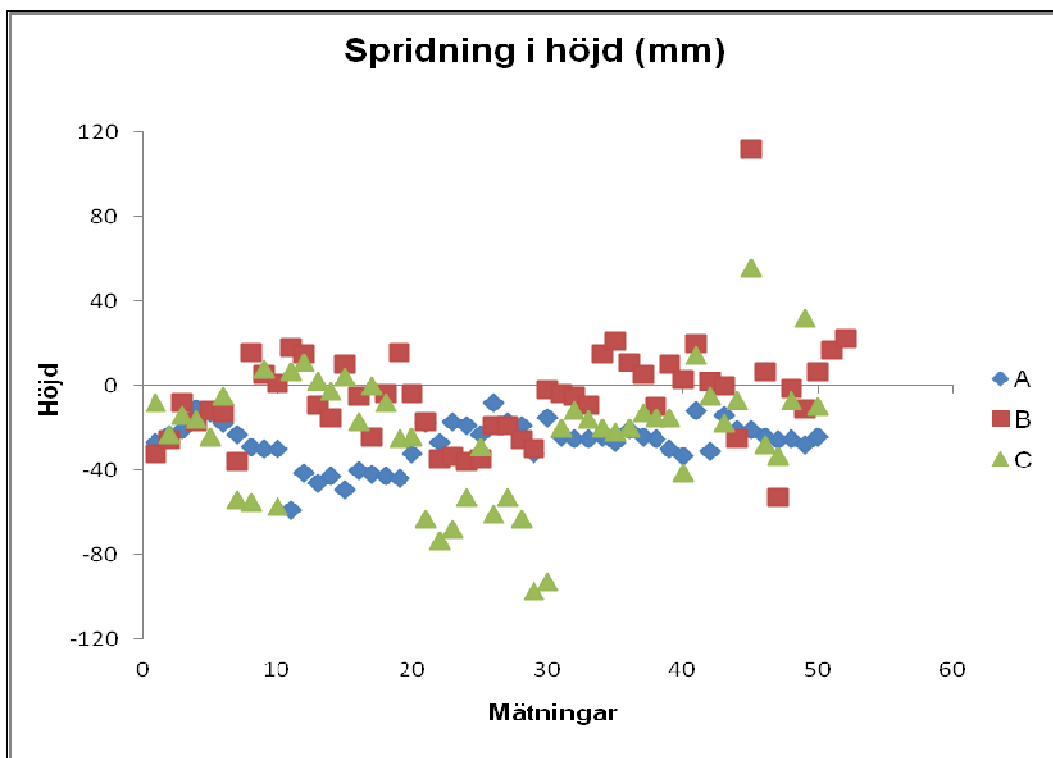
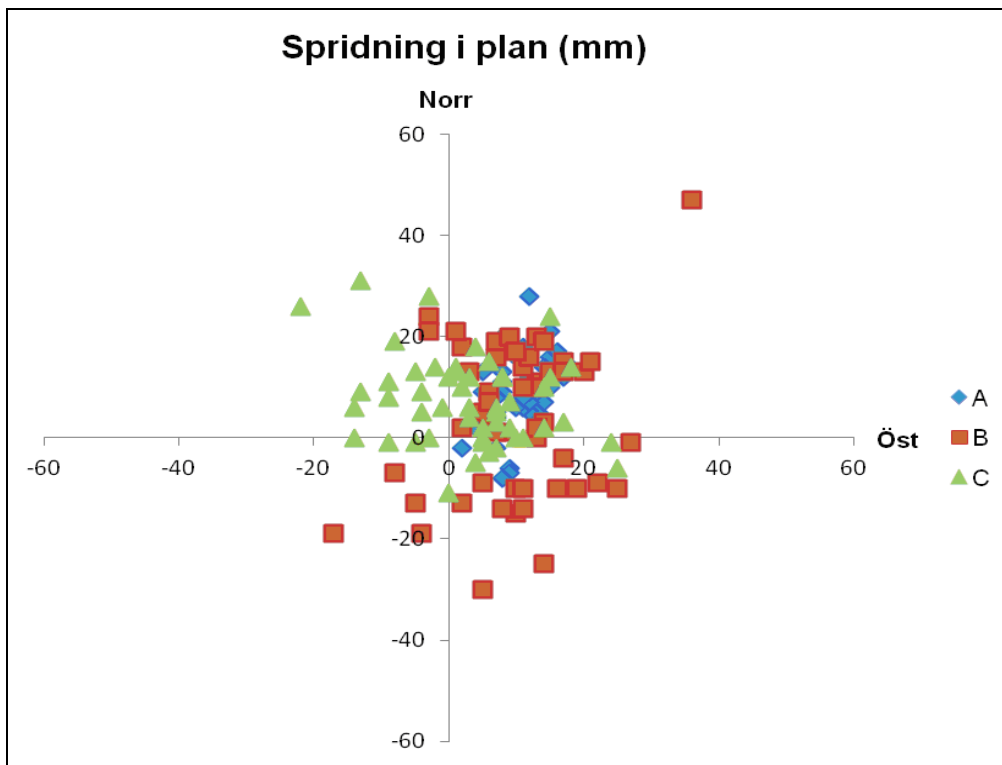
Automatisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Trimble



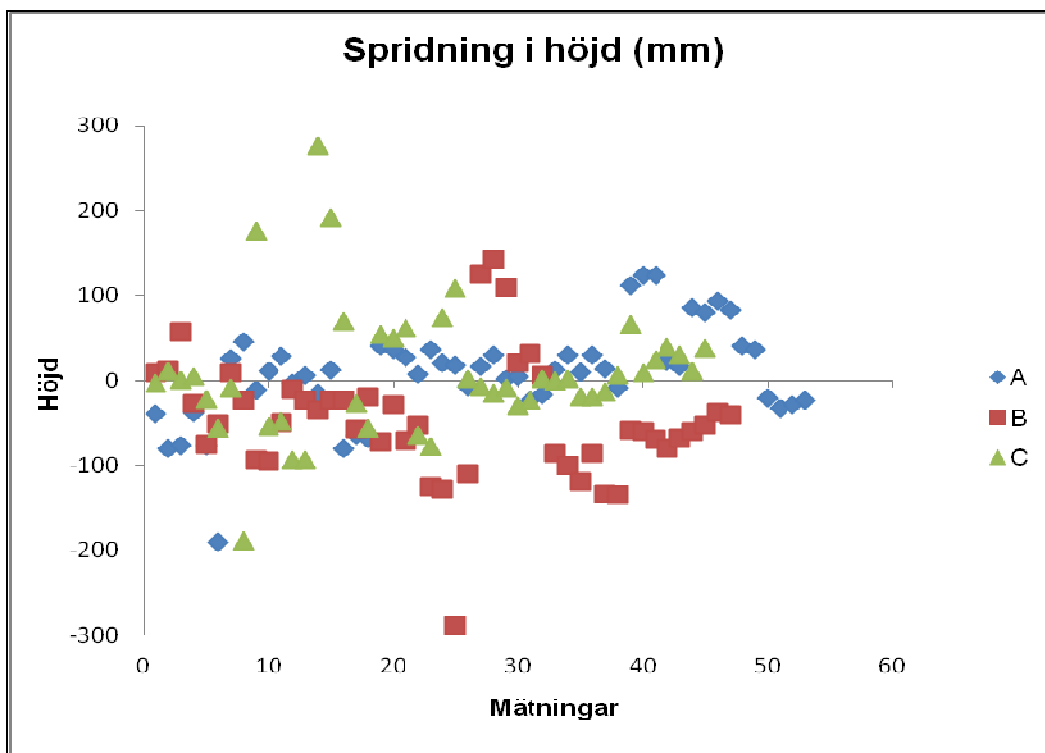
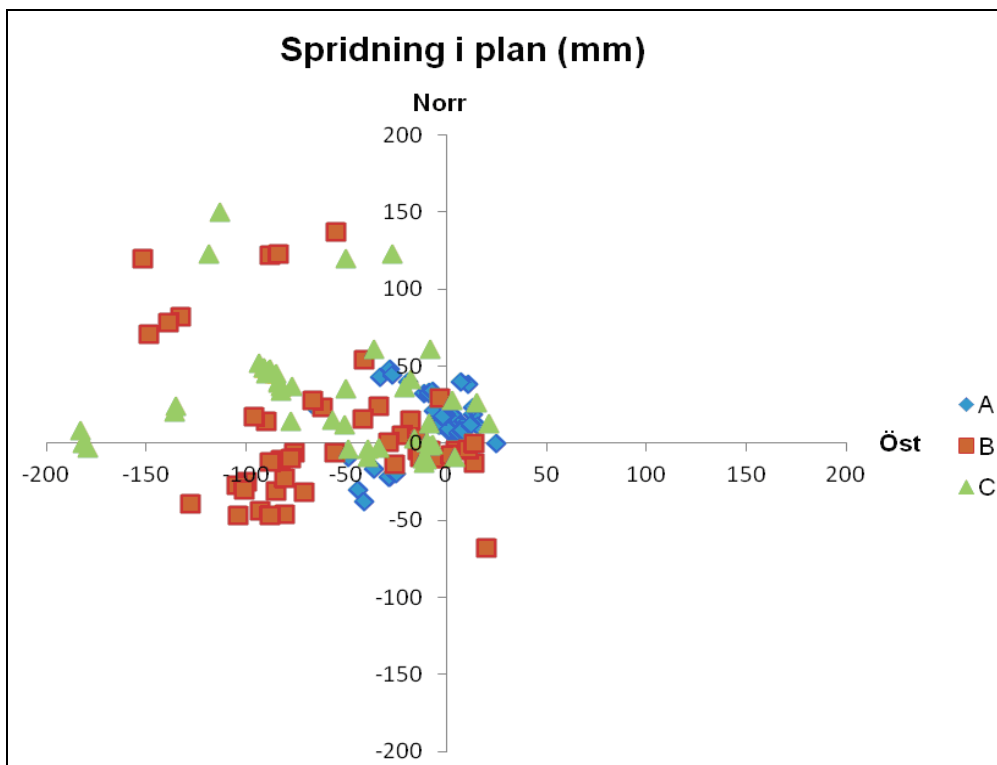
Statisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Trimble



Automatisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Topcon



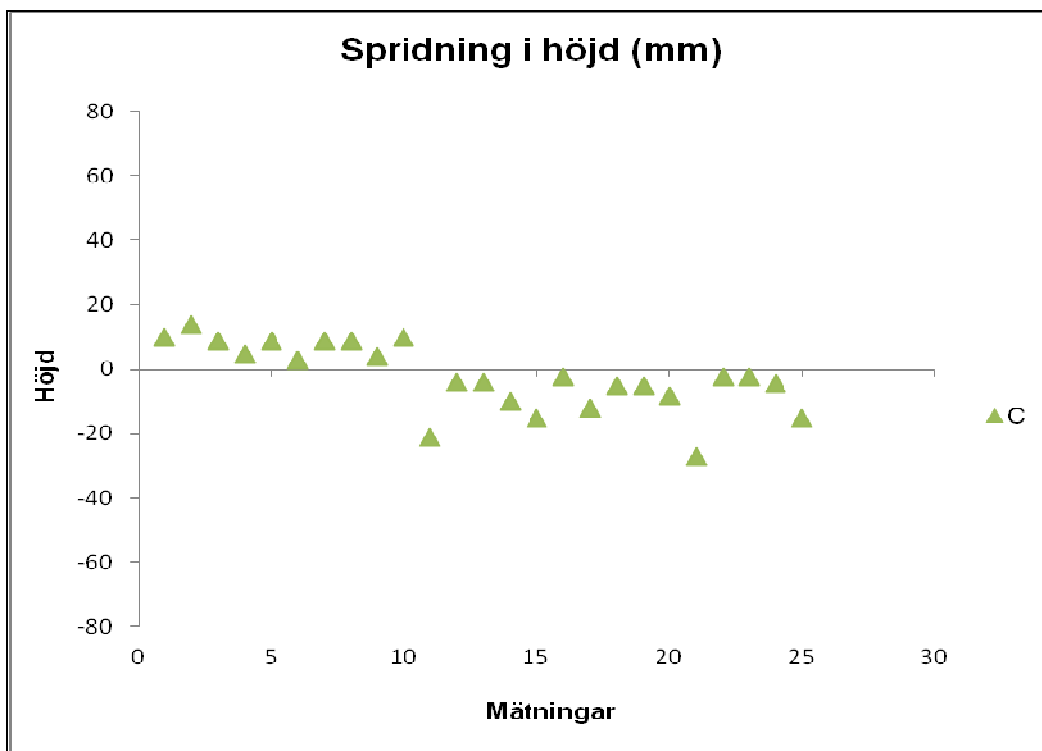
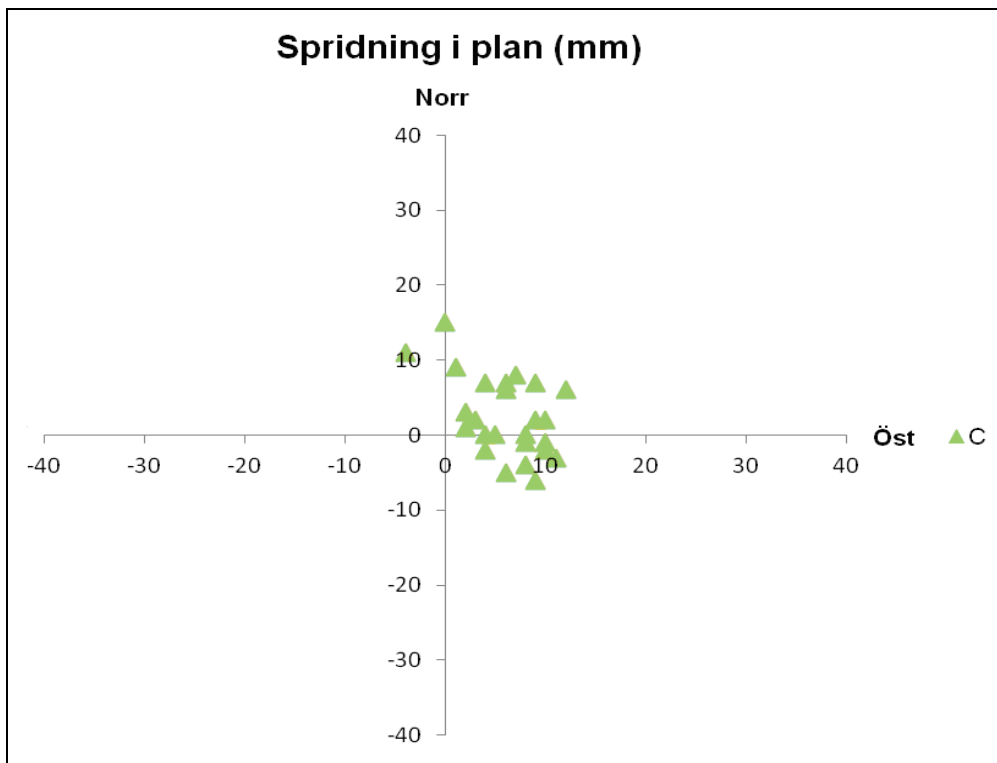
Statisk mätmetod för nätverks-RTK-meddelande med Topcon



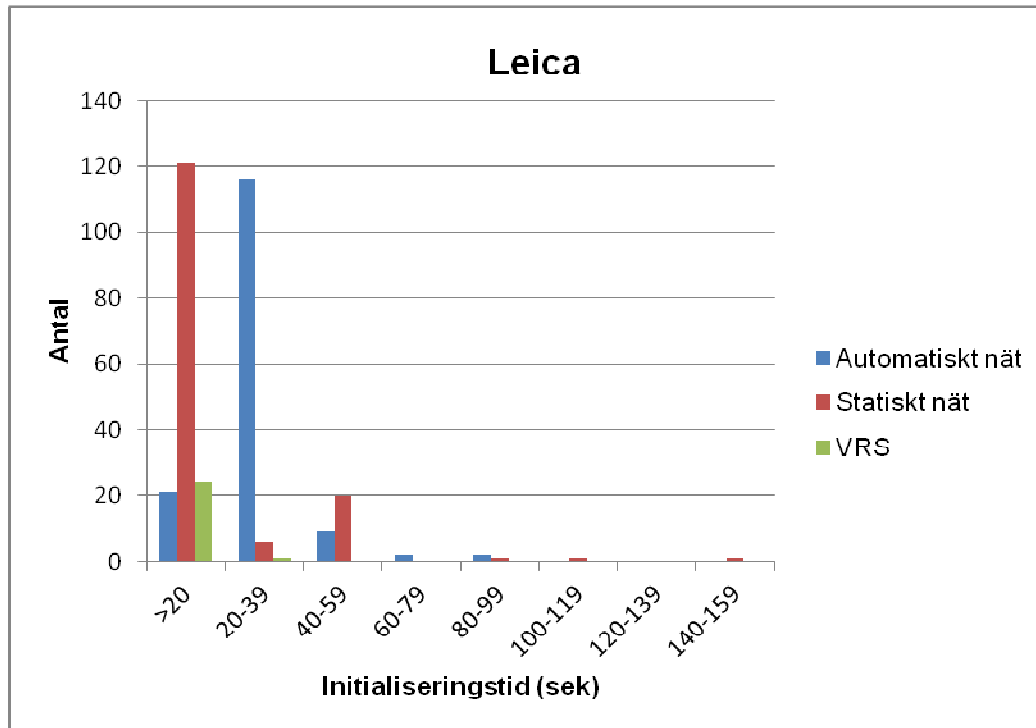
Avvikelser för mätningar med statistiskt nät och Topcon, utanför diagrammens områden (se föregående sida), som inte har presenterats på grund av platsbegränsningar. Samtliga av dessa avvikelser uppkom vid mätning på punkt B och C.

| Punkt | Avvikelse i nordlig riktning (mm) | Avvikelse i östlig riktning (mm) | Avvikelse i höjddled (mm) |
|--------------|--|---|----------------------------------|
| B | 716 | - 838 | - 1956 |
| | 729 | - 837 | - 1958 |
| | - 155 | - 1044 | 1348 |
| C | - 596 | - 656 | 1628 |
| | 587 | 469 | 2897 |
| | 579 | 475 | 2906 |
| | 820 | - 164 | - 2495 |
| | 587 | - 2127 | - 176 |

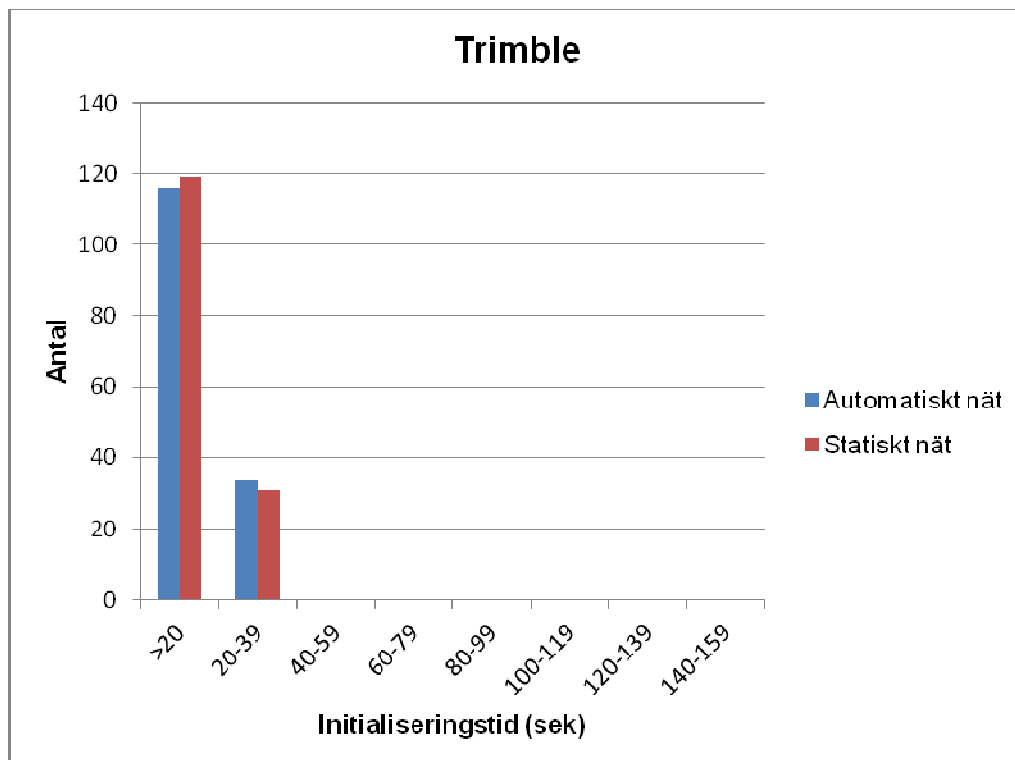
VRS med Leica

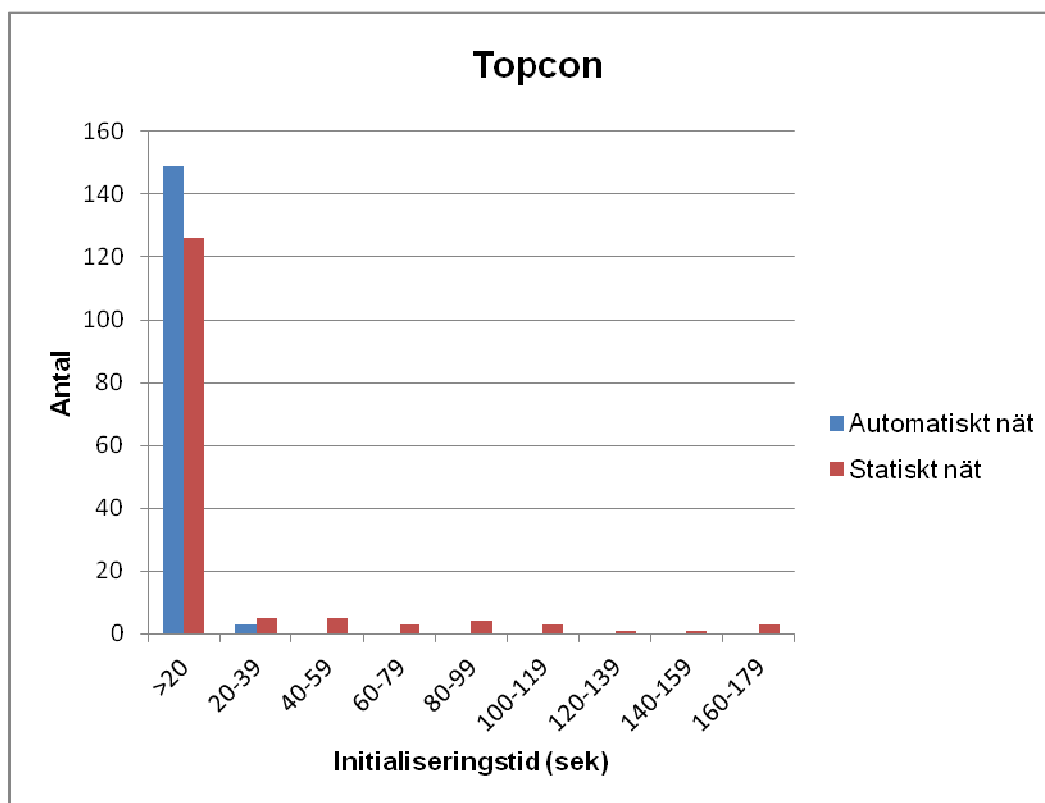


Bilaga 2. Initialiseringstider och andel lyckade initialiseringar med varje mätmetod



Observera att enbart 25 mätningar utfördes med VRS.





Två initialiseringar med Topcon och det statiska nätet uppmättes till 292 sek respektive 307 sek. De har av platsbegränsningar inte tagits med i diagrammet.

| | | Initialiseringstid (medelvärde i sekunder) | | | Andel lyckade initialiseringar (procent) | | |
|-------|-------------|--|---------|--------|--|---------|--------|
| Punkt | Mätmetod | Leica | Trimble | Topcon | Leica | Trimble | Topcon |
| A | Automatiskt | 26 | 10 | 5 | 100 | 96 | 100 |
| | Statiskt | 13 | 10 | 19 | 94 | 100 | 90 |
| B | Automatiskt | 32 | 10 | 6 | 98 | 94 | 100 |
| | Statiskt | 15 | 10 | 21 | 94 | 94 | 70 |
| C | Automatiskt | 28 | 9 | 6 | 100 | 98 | 96 |
| | Statiskt | 13 | 9 | 28 | 98 | 98 | 74 |
| | VRS | 14 | - | - | 100 | - | - |
| Medel | | 20 | 10 | 9 | | | |

Bilaga 3. Mätprocedur för respektive mottagare

Leica

1. En mätmetod, i vilken korrekt anslutningspunkt redan var bestämd, valdes och kontrollerades.
2. Internetanslutning samt satellitkontakt och absolutposition inväntades.
3. Uppkoppling mot anslutningspunkten gjordes genom att trycka på *koppl* i inmätningläget. Samtidigt mättes tiden från knapptrycket till dess att symbolen för fixlösning syntes på skärmen.
4. Mätning lagrades.
5. Uppkopplingen avslutades genom att trycka på *kpla ur*, och symbolen för absolutposition inväntades.
6. Steg 3-5 upprepades ytterligare fyra gånger innan mätning med nästa mätmetod genomfördes enligt steg 1-6.

Trimble

1. En mätmetod kontrollerades först och valdes sedan i samband med uppstarten av inmätningläget (*Starta mätning*).
2. Internetanslutning erhöles och efter kontakt med SWEPOS-servern visades en lista med tillgängliga anslutningspunkter. Korrekt anslutningspunkt valdes utifrån mätmetoden, och tidtagaruret, för att mäta initialiseringstiden, startades. När meddelandet *Initialisering klar* syntes, avslutades tidmätningen.
3. Mätning lagrades.
4. En oinitialisering gjordes genom att lämna inmätningfönstret och göra valet *Initiering* under mätningmenyn. En *On-the-fly-initiering*, även kallad automatisk initiering, gjordes.
5. Steg 4-5 upprepades ytterligare fyra gånger innan mätning med nästa mätmetod genomfördes enligt steg 1-5.

Topcon

1. En mätmetod valdes efter uppstarten av mottagaren och kontrollerades.
2. Internetanslutning erhöles samt uppkoppling till anslutningspunkten, som automatiskt valdes till den korrekta.
3. En initialisering gjordes genom att välja *Återställ RTK* i statusfönstret och tidmätning gjordes till ordet *Fix* syntes i fönstret.
4. Mätning lagrades.
5. En oinitialisering gjordes på samma sätt som ovan (*Återställ RTK*).

6. Steg 4-5 upprepades ytterligare fyra gånger innan mätning med nästa mätmetod genomfördes enligt steg 1-6.

Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriet

- 2007:12 Ivarsson Jesper: Test and evaluation of SWEPOS Automated Processing Service.
- 2007:14 Lilje Mikael, Eriksson Per-Ola, Olsson Per-Anders, Svensson Runar, Ågren Jonas: RH 2000 och riksavvängningen.
- 2008:4 Johansson S Daniel & Persson Sören: Kommunikationsalternativ för nätverks-RTK – virtuell referensstation kontra nätverksmeddelande.
- 2009:1 Ågren Jonas: Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70.
- 2009:2 Odolinski Robert & Sunna Johan: Detaljmätning med nätverks-RTK – en noggrannhetsundersökning.
- 2009:4 Fridén Anders & Persson Ann-Katrin: Realtidsuppdaterad etablering av fri station – ett fälttest med radioutsänd projektanpassad nätverks-RTK.
- 2009:5 Bosrup Susanna & Illerstam Jenny: Restfelshantering med Natural Neighbour och TRIAD vid byte av koordinatsystem i plan och höjd.
- 2010:1 Reit Bo-Gunnar: Om geodetiska transformationer (finns även på engelska med titeln *On geodetic transformations*).
- 2010:2 Odolinski Robert: Studie av noggrannhet och tidskorrelationer vid mätning med nätverks-RTK.
- 2010:3 Odolinski Robert: Checklista för nätverks-RTK.
- 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.

L A N T M Ä T E R I E T



Vaktmästeriet 801 82 GÄVLE Tfn 026 - 65 29 15 Fax 026 - 68 75 94
Internet: www.lantmateriet.se