

# **Realtidsuppdaterad etablering av fri station**

– ett fälttest med radioutsänd  
projektanpassad nätverks-RTK

Examensarbete av

Anders Fridén & Ann-Katrin Persson

Redigerad av Lars Jämnäs

Gävle 2009

L A N T M Ä T E R I E T





Copyright ©

2009-03-31

Författare Anders Fridén, Ann-Katrin Persson & Lars Jämtnäs

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 50

LMV-Rapport 2009:X – ISSN 280-5731

# Realtidsuppdaterad etablering av fri station

– ett fälttest med radioutsänd  
projektanpassad nätverks-RTK

L A N T M Ä T E R I E T





## Förord

Detta examensarbete utfördes på C-nivå och avslutar vår utbildning till Lantmäteringenjörer vid Högskolan Väst i Trollhättan. Examensarbetet utfördes på uppdrag av Lantmäteriet.

Vi vill tacka vår handledare på Lantmäteriet, Lars Jämnäs, för all hjälp och gott stöd. Vi vill också rikta ett tack till övrig personal på SWEPOS-driften för all hjälp vi fått.

Vi riktar också ett stort tack till Gunnar Starke, vår examinator på Högskolan Väst, för hans stöd under arbetet.

Vi vill även rikta ett tack till Leica Geosystems i Göteborg för lån av utrustning.

Trollhättan, juni 2008

Anders Fridén

Ann-Katrin Persson



## Sammanfattning

Realtidsuppdaterad etablering av fri station är en relativt ny metod som innebär att bakåtoobjekten vid totalstationsetablering koordinatsätts i realtid med GNSS-mottagare och därefter mäts in med totalstation på vanligt sätt - med längd och vinklar. För att åstadkomma detta används i normalfallet ett integrerat system bestående av en totalstation som fjärrstyrs från en RTK-rover utrustat med prisma. I vissa fall kan den etablerade stationen "uppdateras" genom att mäta in ytterligare bakåtoobjekt, vilket medför bättre precision och kontroll av etableringen.

Huvudsyftet med detta examensarbete har varit att undersöka den realtidsuppdaterade fria stationsetableringen med avseende på stationskoordinaternas noggrannhet. Noggrannheten bedömdes i första hand genom stationsetablering på ett antal punkter med välbestämda koordinater. Dessutom jämfördes resultaten med samtidigt utförda statiska mätningar på samma punkter. De statiska mätningarna efterberäknades i SWEPOS projektanpassade Beräkningstjänst, vilket idag är ett vanligt sätt att bestämma utgångspunkter för totalstationsmätning med god precision.

Undersökningen gjordes i april 2008 i ett område längs med Göta Älv, norr om Göteborg. I samband med nybyggnad av motorväg och järnväg mellan Göteborg och Trollhättan har det ordinarie SWEPOS-nätet (d.v.s. det nationella nätet av permanenta referensstationer för GNSS) där förtätats med fem ytterligare SWEPOS-stationer för att möjliggöra projektanpassade versioner av SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst och SWEPOS Beräkningstjänst.

Varje dag utfördes ca 15 fria stationsetableringar med samma totalstationsuppställning, där bakåtoobjekten mättes in med hjälp av radioutsänd projektanpassad nätverks-RTK. Totalt utfördes 159 fria stationsetableringar, och upp till tio bakåtoobjekt användes vid varje etablering. Samtidigt genomfördes statiska mätningar med GPS-antenn monterad på den etablerade totalstationen. De statiska mätningarna efterberäknades i den projektanpassade beräkningstjänsten.

Totalt fick vi ett medelfel på 7 mm i plan och 11 mm i höjd med den realtidsuppdaterade metoden när 10 bakåtoobjekt användes (d.v.s. det maximala antalet). Jämförelsevis fick vi ett medelfel på 4 mm i plan och 11 mm i höjd med den statiska mätningen, när 1-timmesintervall efterberäknades.

Resultaten visar att metoden kan bli ett alternativ till stationsetablering baserad på statisk GNSS-inmätning, beroende på vilka krav på anslutning och kontroll som föreligger. Men metoden kräver ytterligare utredning, t.ex. hur eventuella systematiska avvikelser i höjdbestämningen kan upptäckas och hanteras. Angeläget är också utveckling av ett mer användarvänligt mätförfarande och gränssnitt i roverutrustningen.

## Abstract

Real-time updated resection is a relatively new method, where GNSS RTK measurements are combined with conventional total station observations to complete a total station setup. Generally speaking, this method requires a GNSS RTK rover equipped with a prism and a total station that can be remotely operated from the rover via radio. Coordinates for the resection/target points are established in real-time with the RTK rover. The target points can then be measured with the total station as usual, but preferably simultaneously with the RTK observations. In some surveying systems the resection can be updated later on, by adding observations of new target points.

The intention of this thesis is to investigate the real-time updated resection method, primarily in terms of station coordinate accuracy. This was accomplished by repeated setups at geodetic points with well-known coordinates. The real-time resections were also compared to static GNSS observations that were post-processed in an online processing service. This is currently a common way of establishing ground control points with good precision for total station setups.

The field surveys for this thesis were performed during three weeks in April 2008, at locations close to the construction area for a new road and the railway north of Gothenburg. The SWEPOS network - i.e. the Swedish national network of permanent reference stations for GNSS - has been densified with five additional reference stations in this area to facilitate redundant high-accuracy versions of SWEPOS regular positioning services.

15 resections (in average) were performed each day of field survey, using the same tripod setup. This gave a total of 159 real-time updated resections, where radio broadcasted network RTK was used to measure all target points. Up to 10 target points were used for each resection.

Static GNSS observations were performed simultaneously, with a GNSS antenna mounted on top of the total station. The 81 hour-long observations were then post-processed in the version of SWEPOS Automated Processing Service that has been adapted for the road and railway construction area.

Given that all 10 target points were used for the resection, the real-time resection method gave a horizontal accuracy (RMS) of 7 mm and vertical accuracy of 11 mm. The static method gave corresponding values of 4 mm and 11 mm for one hour observation spans.

The real-time updated resection method could be an alternative to total station setup with static observations of target points, depending on the specific demands on controllability and user friendliness. Further improvements of the technique in these areas should be investigated.



# Realtidsuppdaterad etablering av fri station

– ett fälttest med radioutsänd  
projektanpassad nätverks-RTK

Förord		5
Sammanfattning		7
Abstract		8
<b>1</b>	<b>Inledning</b>	<b>11</b>
1.1	Bakgrund	11
1.2	Syfte	11
1.3	Avgränsningar	12
<b>2</b>	<b>Satellitpositionering</b>	<b>13</b>
2.1	GNSS	13
2.2	Positionsbestämning	13
2.2.1	Kodmätning	13
2.2.2	Bärvågsmätning	14
2.3	Felkällor	14
2.4	Metoder för positionsbestämning	15
2.4.1	Absolut mätning	15
2.4.2	Relativ mätning	15
2.4.3	Statisk mätning	15
2.4.4	RTK	16
<b>3</b>	<b>SWEPOS</b>	<b>17</b>
3.1	SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst	17
3.1.1	Projektanpassad Nätverks-RTK	18
3.2	SWEPOS Beräkningstjänst	19

3.2.1	Projektanpassad Beräkningstjänst	19
<b>4</b>	<b>Realtidsuppdaterad etablering av fri station med GNSS</b>	<b>21</b>
4.1	Känd punkt	21
4.2	Fri station	21
4.3	Realtidsuppdaterad fri stationsetablering	21
<b>5</b>	<b>Metod och genomförande</b>	<b>23</b>
5.1	Generell strategi	23
5.2	Etableringsalternativ för fri station	23
5.3	Fältmättningsområde	24
5.3.1	Referenssystem	24
5.3.2	Testpunkter	25
5.4	Fältmetodik och utrustning	26
5.4.1	Lån och test av utrustning	26
5.4.2	Förberedelser i fält	26
5.4.3	Statisk mätning	27
5.4.4	Integrerad mätning	28
<b>6</b>	<b>Kvalitetstermer</b>	<b>31</b>
6.1	Medelavvikelse (riktighet)	31
6.2	Noggrannhet (medelfel)	31
6.3	Precision (standardavvikelse)	32
<b>7</b>	<b>Resultat</b>	<b>33</b>
7.1	Omfattning	33
7.2	Kvalitetsmått för samtliga stationskoordinater	34
7.2.1	Grafisk redovisning av planavvikelser	35
7.2.2	Grafisk redovisning av höjdavvikelser	36
7.3	Kvalitetsmått för mätningar på respektive punkt	38
7.4	Uppdatering av fri station	38
7.5	Etableringsalternativ	40
<b>8</b>	<b>Diskussion</b>	<b>41</b>
<b>9</b>	<b>Slutord</b>	<b>45</b>
<b>10</b>	<b>Källförteckning</b>	<b>47</b>

# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

SWEPOS® har i samband med nybyggnad av E45 och dubbelspårig järnväg från Göteborg mot Trollhättan förtätats med ytterligare fem stationer för att möjliggöra projektanpassade versioner av SWEPOS positioneringstjänster. Detta koncept innebär bl.a. radioutsändning av RTK-data, samt en högre noggrannhet i plan och höjd vid mätning med nätverks-RTK.

För vissa tillämpningar krävs dock att man använder sig av totalstation, t.ex. vid utsättning av brokonstruktioner. Dessutom föreligger ofta krav på anslutning mot punkter i omgivande riksnät t.ex. med hjälp av ett lokalt parpunktsnät. Ett alternativ till traditionell stommätning är i detta fall att utnyttja en modifierad version av SWEPOS Beräkningstjänst som är anpassad för området kring E45, vilket kräver statisk GNSS-mätning.

Utgångspunkterna för totalstationsmätning kan med en relativt ny metod bestämmas genom att utföra fri stationsetablering med hjälp av nätverks-RTK. Detta bygger på ett nytt sätt att kombinera totalstations- och GNSS-observationer, s.k. integrerad mätning. I det här fallet sker detta med hjälp av fjärrstyrning av totalstation från en mätstång utrustad med RTK-rover och prisma. Bakåtobjekten utgörs av punkter som koordinatsätts genom att rovern först tar emot RTK-korrekationer. Därefter mäts punkterna in med totalstation på vedertaget sätt - med längder och vinklar. Det finns i vissa fall möjlighet att lägga till ytterligare inmätta punkter till sin redan etablerade station och därmed uppdatera stationens koordinater tills tillräcklig precision uppnåtts. En benämning på den här metoden är därför "realtidsuppdaterad fri stationsetablering" (Vium, 2008).

## 1.2 Syfte

Syftet med studien är att göra en utvärdering av realtidsuppdaterad fria stationsetablering inom det projektanpassade nätverks-RTK området.

I första hand gäller frågan om den realtidsuppdaterade fria stationsetableringen kan uppnå samma noggrannhet (med avseende på stationskoordinaterna) som statisk mätning med efterberäkning i SWEPOS projektanpassade Beräkningstjänst. Den sistnämnda metoden är idag ett typiskt sätt att bestämma parpunkter och utgångspunkter för totalstationsetablering med god precision.

Ett mål är även att se om metoden kan betraktas som lämplig för produktionsmätning i dagsläget.

### 1.3 Avgränsningar

Jämförelse av koordinater som erhållits från de fria stationsetableringarna respektive de statistiskt inmätta stationerna görs mot ett antal lokala stompunkter som nybestämdes med statisk GPS-mätning 2006. Dessa har kända koordinater i referenssystemet SWEREF 99 och är markerade med rör i berg.

RTK-bestämningarna för den fria etableringen har gjorts på slumpvis utvalda omarkerade punkter runt totalstationen. Oberoende kontroll av bakåtoobjekten för den fria stationsetableringen har därför ej skett i den här studien. Alla mätningarna utfördes med Leica-utrustning och den fria stationsetableringen genomfördes med den projektanpassade nätverks-RTK-tjänsten utsänd via radio.

Alla statistiska mätningar utfördes samtidigt som den fria stationsetableringen. För att möjliggöra detta användes Leicas SmartStation-lösning, med GNSS-antennen ovanpå totalstationen. De statistiska mätningarna delades in i 1-timmesintervall när de efterberäknades i den projektanpassade beräkningstjänsten. Detta ansågs som ett lämpligt intervall, för att med stor sannolikhet få en godkänd bestämning på centimeternivå i plan och höjd (Lantmäteriet, 2007).

## 2 Satellitpositionering

### 2.1 GNSS

GNSS, Global Navigation Satellite Systems, är samlingsnamnet för satellitbaserade navigations- och positioneringssystem. GNSS inkluderar bl.a. GPS och GLONASS. GPS (Global Positioning System) är det amerikanska systemet som har varit operationellt sedan 1993. GPS ger möjlighet till positionsbestämning över hela världen och garanterar minst 24 satelliter i omlopp. GLONASS är det ryska systemet som även det har global täckning. Systemet blev operationellt 1996. Eftersom systemet under lång tid hade för få satelliter för att brukas på egen hand finns idag inga rena GLONASS-mottagare på den kommersiella marknaden, men GLONASS används däremot ofta som ett komplement till GPS (Lilje et al., 2008).

### 2.2 Positionsbestämning

Principen för positionsbestämning med GNSS är att det görs en inbindning i rymden mellan mottagare och satelliter. Det sänds ut kodade radiosignaler från satelliten till mottagaren. När mottagaren tar emot signalen och gör en mätning kan man betrakta situationen som fryst. Satelliterna har då en viss position relativt mottagaren. Tidsåtgången för signalen att gå mellan satellit och mottagaren mäts med hjälp av tidsmarkeringar på koden. Eftersom signalens utbredningshastighet är känd kan man med hjälp av detta räkna ut avståndet från satellit till mottagare (Alexandersson, 2007).

Mottagarens position bestäms genom att kombinera avståndsmätning till satelliterna med information om satelliternas position som fås i satellitmeddelandet.

Avståndsmätningen mellan satellit och mottagare görs med två olika metoder – kodmätning och bärvågsmätning.

#### 2.2.1 Kodmätning

Kodmätning är avståndsmätning på signalens C/A-kod eller P-kod. Samtidigt som den kodade signalen sänds från satelliten genereras en kopia i mottagaren. Mottagaren kan då räkna ut gångtiden dvs. fördröjningen mellan koderna med hjälp av tidsmarkeringar. Avståndet kan sedan beräknas eftersom man har signalens utbredningshastighet (ljusets hastighet).

Kodmätning ger ett pseudoavstånd, ett ungefärligt avstånd, på grund av bristande synkronisering mellan mottagarklockan och satellitklockan. Precisionen på kodmätning är ca 0,1 % av våglängden. För C/A-koden ger

det en precision på ca 0,3-3m och med P-koden ca 0,06-0,6m (Starkman & Holm, 2008).

## 2.2.2 Bärvägsmätning

Bärvägsmätning innebär mätning på signalens bärväg. Avståndet satellit till mottagare kan sägas vara ett antal hela våglängder plus en del av en våglängd. Bärvägen har inga tidsmarkeringar så antalet hela våglängder, periodbekanta, måste bestämmas för att avståndet satellit till mottagare ska kunna bestämmas. I mottagaren skapas en signal med samma frekvens som satellitens bärväg. När antalet hela våglängder har fixerats till ett heltal har man fixlösning. För att komma ner till mm-noggrannhet i avståndsmätningen krävs att man bestämmer delen av våglängden. Detta görs med hjälp av fasmätning. Mätnoggrannheten med bärvägsmätning är cirka två centimeter (Alexandersson, 2007).

## 2.3 Felkällor

Det finns ett antal störningar eller felkällor som påverkar kvalitén på mätningarna. Vissa fel kan elimineras med rätt positioneringsmetod andra är det svårt att som användare göra något åt.

- Fel som orsakas av satellitklockans osäkerhet och instabilitet mot officiell GPS-tid. Satellitklockorna övervakas av en kontrollenhet som skickar ut korrektionsdata.
- Mottagarklockans osäkerhet. En oscillator genererar en intern signal som ligger till grund för kod- och bärvägsmätning. Detta kan korrigeras vid positionsberäkningen.
- Inexakta banparametrar. Information om var satelliterna befinner sig levereras i satellitmeddelandet. Satelliternas omloppsbanor övervakas av kontrollsegmentet och justeras vid behov. Även om utsända banparametrar innehåller en viss osäkerhet så kan de bestämmas mycket noggrant i efterhand.
- I jonosfären finns fria elektroner som påverkar radiosignalen så att den tar en krökt väg eller att signalen blir försvagad. Detta är ofta den största enskilda felkällan, men påverkan är frekvensberoende och kan modelleras eller elimineras (t.ex. med hjälp av olika linjärkombinationer av signalfrekvenser)
- I troposfären kan det bli viss fördröjning av signalen på grund av bl.a. vattenånga. Denna påverkan är inte lika stor som i jonosfären, men kan vara svårare att modellera bort eftersom den inte är frekvensberoende. Noggranna väderobservationer kan användas för att dämpa denna effekt.
- Flervägsfel uppstår när satellitsignalerna reflekteras mot exempelvis markytan eller en byggnad. Detta kan reduceras genom att använda en

antenn som dämpar reflekterade signaler (t.ex. en så kallad choke-ring-antenn) eller genom avancerad signalbehandling.

- Byggnader och tät vegetation kan göra att signalen uteblir helt eller försvagas. Påverkan på signalen är i detta fall beroende av objektens egenskaper.
- Satellitkonfigurationen, d.v.s. satelliternas placering i förhållande till mottagaren påverkar styrkan i "inbindningen". Satelliterna ska helst vara spridda både i bäring och i elevation. Ett vanligt mått på denna spridning är det s.k. DOP-talet. (Alexandersson, 2007; Starkman & Holm, 2008).

## 2.4 Metoder för positionsbestämning

Det finns två metoder för att bestämma mottagarens position när avstånden mellan satelliterna och mottagaren/ mottagarna bestämts.

### 2.4.1 Absolut mätning

Absolut mätning är den enklaste formen av positionsbestämning och utförs med endast en GNSS-mottagare, vanligtvis med en enkel matematisk utjämning av observationerna. Eftersom den är en enkel och snabb metod används den ofta i navigeringssammanhang. I normalfallet används kodmätning för absolut positionsbestämning.

### 2.4.2 Relativ mätning

Relativ positionsbestämning är den form som oftast används när man vill ha en hög noggrannhet.

För att genomföra relativ mätning krävs det minst två mottagare och mätning mot minst fyra gemensamma satelliter. Mottagarens läge bestäms i förhållande till en redan känd punkt, en referensstation. De båda mottagarnas positioner mäts. Genom differenserna som bildas mellan de båda punkternas mätningar kan felkällor som försämrar mätnoggrannheten reduceras eller elimineras.

Relativ positionsbestämning kan utföras med både kodmätning och bärvågsmätning och bestämningen sker både i realtid och med efterberäkning av statistisk data (Alexandersson, 2007; Starkman & Holm, 2008).

### 2.4.3 Statisk mätning

Med statisk mätning avser man relativ mätning med minst två orörliga mottagare. Mottagarna loggar samtidigt data från gemensamma satelliter, under ett par minuter eller upp till flera dygn beroende på vilken noggrannhet man vill uppnå. Statisk mätning kräver efterbehandling av

mätdata för positionsbestämningen. Den statistiska positionsbestämningen är i normalfallet den noggrannaste av GNSS-metoderna, eftersom den pågår under lång tid och ger möjlighet till bättre modellering av felkällor och komplettering av referensdata (t.ex. efterberäknade bandata).

#### 2.4.4 RTK

RTK (Real Time Kinematic) avser relativ bärvågsmätning i realtid. En referensmottagare placeras över en känd punkt. Den rörliga mottagaren och referensstationen samlar in data från samma satelliter. I den rörliga mottagaren kombineras data från referensstationen med egna samlade bärvågsmätningar. På så sätt kan den okända heltalsdelen av bärvågsmätningen (periodobekanta) bestämmas, vilket innebär att användaren får s.k. fixlösning med centimeternoggrannhet. Resultatet är en baslinje, en koordinatdifferens mellan referens och mottagare. Denna differens adderas till referensens redan kända positionskoordinater och positionen fås direkt i fält.

Tiden som krävs för att lösa periodobekanta, initialiseringstiden, är från ett tiotal sekunder upp till några minuter. Detta beror bl.a. på satellitgeometrin, antal satelliter, RTK-algoritmen och avståndet till referensstationen.

Det krävs en datalänk för överföringen av data i realtid mellan referensmottagare och rovermottagare. Det görs med till exempel radio- eller GSM-modem. RTK-mätning ger normalt ett medelfel på 10-30 mm i plan och 15-45 mm i höjd.

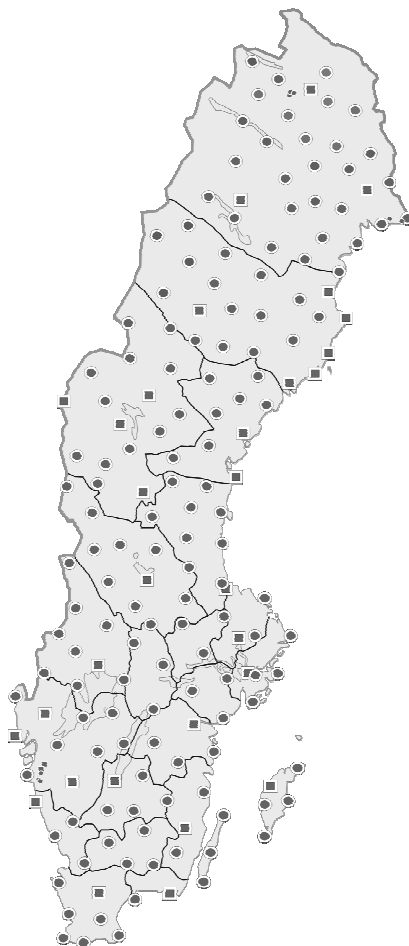
Det finns olika metoder för RTK-mätning: enkelstations-RTK och nätverks-RTK. Dessa skiljer sig åt främst genom hur många referensstationer som används för positionsbestämningen (Starkman & Holm, 2008)

Vid enkelstations-RTK, det vill säga traditionell RTK, tas data emot från *en* referensstation. I de flesta fall upprättas en tillfällig referensstation i närheten av det område där RTK-mätningen ska utföras. Detta kräver tillgång till två mottagare. Dagens teknik gör att utrustningen fungerar upp till 30–40 km från referensstationen (Starkman & Holm, 2008).



## 3 SWEPOS

SWEPOS är ett nät av fasta referensstationer för GNSS. För underhåll och drift av SWEPOS svarar Lantmäteriet. SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst har varit i drift sedan 1 januari 2004. Tjänsten har byggts ut i etapper och täcker nu i stort sett hela Sverige.



Figur 1. När återstående utbyggnad är klar under våren 2009 kommer SWEPOS-stationerna att täcka i stort sett hela Sverige. Avståndet på ca 70km mellan referensstationerna möjliggör nätverks-RTK-teknik.

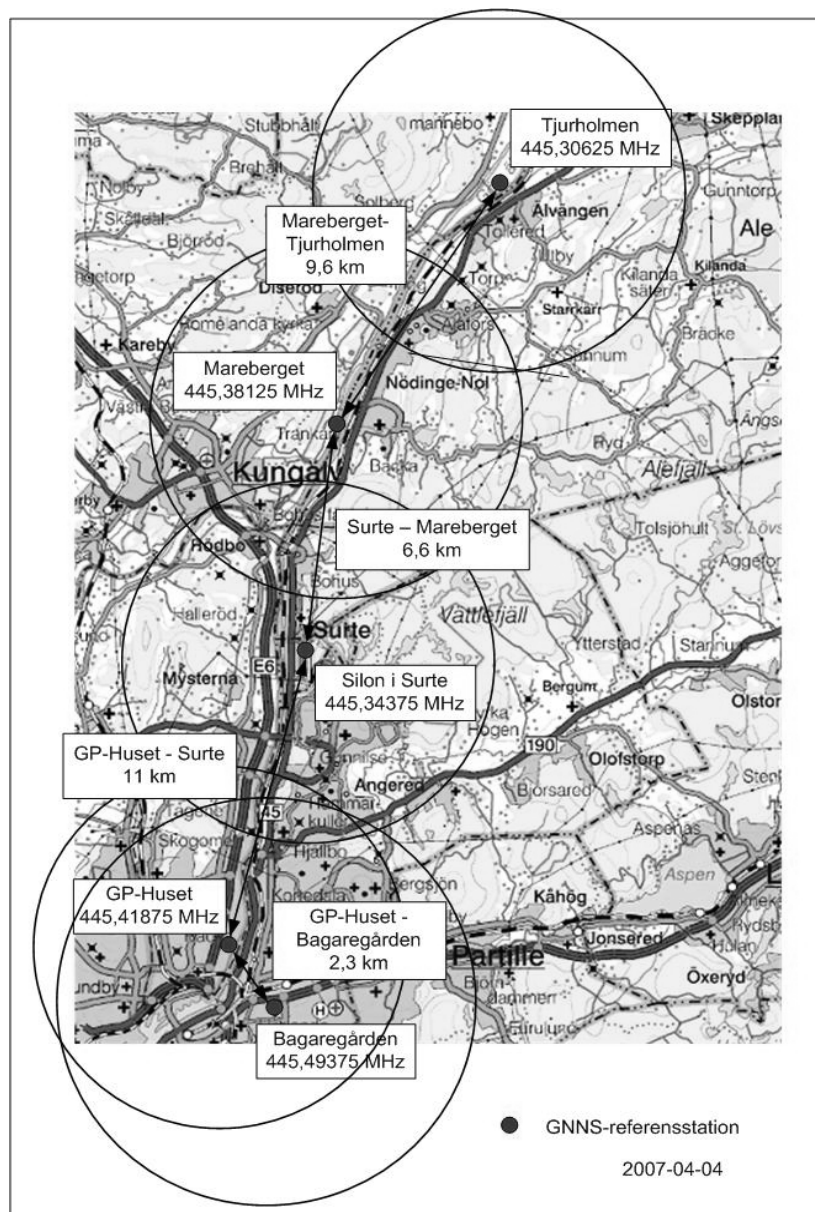
### 3.1 SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst

Vid mätning med nätverks-RTK så används data från flera referensstationer samtidigt. På så sätt fås en bättre och mer yttäckande information om GNSS-signalens påverkan genom atmosfären. Fördelen med nätverks-RTK är att endast en RTK-rover behövs. Från rovern skickas en ungefärlig position till SWEPOS driftcentral. Där skapas en modell över felkällorna med hjälp av insamlad data från omkringliggande referensstationer. En virtuell referensstation (VRS) skapas i närheten av rovern, utifrån den position som tidigare skickats in. Beräknade korrekationer för felkällorna skickas därefter till rovern. Rovern hanterar

korrektionerna som om de kom från en vanlig referensstation och med hjälp av dessa korrektioner och egna observationer löses periodobekanta. Distribution av korrektionsdata sker vanligen med GSM eller GPRS. Avståndet mellan referensstationerna brukar normalt vara ca 70 km.

### 3.1.1 Projektanpassad Nätverks-RTK

SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst har förtätats med 5 GNSS-referensstationer för att uppfylla de krav på noggrannhet i plan och höjd som krävs för maskinguidning och mätning i samband med nybyggnad av E45 och järnvägen från Göteborg till Trollhättan. Dessutom används ett projektanpassat koncept, som bl.a. innebär möjlighet till radioutsändning av korrektionsdata via radiomodem (d.v.s. envägskommunikation).



Figur 2. Täckningsområdet samt frekvenser för radioutsändning från SWEPOS-stationerna. (Lantmäteriet, 2007)

De 5 GNSS-referensstationerna är Surte, Marberget, Tjurholmen, Bagaregården och Hisingsbacka. Korrektioner sänds ut i standardformatet RTCM 3.0 via radiomodem från respektive station, där varje station har en egen frekvens. Frekvensen för radioutsändningen väljs efter vilket område som användaren befinner sig i. Varje sändare har en centralpunkt (virtuell referensstation) för vilket RTK-korrektionerna beräknas. Centralpunkten behöver inte vara identisk med referensstationen där sändaren är stationerad. Användaren kan även få korrektioner via GSM eller GPRS.

Tillsammans med omkringliggande nätverks-RTK stationer är projektstationerna anslutna till SWEPOS driftcentral i Gävle.

Vid användning av GPS/GLONASS-utrustning och den projektanpassade nätverks-RTK-tjänsten förväntas medelfelet vara 11 mm i plan och 13 mm i höjd (Lantmäteriet, 2007).

## **3.2 SWEPOS Beräkningstjänst**

SWEPOS Beräkningstjänst tillhandahålls av Lantmäteriet.

Beräkningstjänsten fungerar i hela Sverige. Användaren mäter statisk tvåfrekvens GNSS-data, som konverteras till fabriksberoende formatet RINEX och skickas till Beräkningstjänsten via ett webbgränssnitt. Med hjälp av data från omkringliggande referensstationer beräknas positionen med Bernese GPS Software, som är "motor" i beräkningstjänsten. Koordinaterna levereras automatiskt via e-post till användaren i SWEREF 99 samt transformeras även till RT90 med restfelsinterpolation. Höjderna fås i RH 2000 och RH 70.

### **3.2.1 Projektanpassad Beräkningstjänst**

I SWEPOS ingår även en projektanpassad Beräkningstjänst för E45 som kan användas när det ställs höga krav på noggrannhet, framför allt vid kortare mättider än som normalt rekommenderas för den ordinarie tjänsten. Statisk tvåfrekvens GNSS-data loggas och observationsfilen skickas i RINEX-format till en webbaserad automatisk Beräkningstjänst, på samma sätt som i den ordinarie tjänsten. Skillnaden är att nätet med förtätade referensstationer i projektområdet kan använda en beräkningsstrategi som godtar kortare mättider, under 30 min. Med den här beräkningsmetoden kan man förvänta sig att en 60 minuter lång mätning har 95% sannolikhet att bli godkänd enligt föreslagna utvärderingskriterier, samt få ett medelfel i plan på 8 mm och 11 mm i höjd (Lantmäteriet, 2007).



## 4 Realtidsuppdaterad etablering av fri station med GNSS

En stationsetablering innebär att totalstationens orientering och läge bestäms i förhållande till kända koordinater. Totalstationsetablering utförs i huvudsak enligt två metoder.

### 4.1 Känd punkt

Totalstationen centreras och horisonteras över känd markerad punkt. Orienteringen av instrumentet fås genom att rikta mot minst en annan känd punkt (bakåtoobjekt). Siktlängden mot bakåtoobjekt bör vara så lång som möjligt för att minimera centrerings- och koordinatfelets inverkan på orienteringen.

Om längden mäts till bakåtoobjektet fås en kontroll av stationen genom att jämföra mätt längd och beräknad längd.

### 4.2 Fri station

Totalstationen ställs upp på valfri plats, men företrädesvis med fri sikt i flera riktningar. Stationens läge och orientering bestäms med hjälp av mätningar mot minst två kända punkter. De kända punkterna bör vara jämt fördelade runt stationspunkten. För att få en bra kontroll av stationsetableringen bör man ha en överbestämning per obekant. Används minst tre bakåtoobjekt får man dels en kontroll av bakåtoobjekten dels utjämnas avvikelser mellan dessa. En fördel med fri station jämfört med uppställning över känd punkt är att centreringsfelet kan minskas eller elimineras.

Bakåtoobjekten vid en fri stationsetablering kan utgöras av redan kända punkter eller punkter som mäts in med hjälp av t.ex. statistisk mätning. I det sistnämnda fallet krävs efterberäkning av statistiska data.

### 4.3 Realtidsuppdaterad fri stationsetablering

Realtidsuppdaterad etablering av fri station skiljer sig från de traditionella metoderna i avsnitten 4.1 och 4.2 genom att GNSS-mätning integreras med konventionell mätning. Bakåtoobjekten utgörs i detta fall av punkter som koordinatsätts i realtid med RTK-rover. Från totalstationen mäts sedan vinklar och längd mot prismet på RTK-stången. Prismat har en specifik höjdoffset gentemot RTK-antennens refererenspunkt, vilket måste hanteras direkt i fältprogramvaran eller vid efterbearbetning.

Efter att minst två gemensamma punkter (bakåtoobjekt) har mätts in kan totalstationens koordinater beräknas. Mäts sedan ytterligare punkter in med både GNSS och totalstation möjliggörs en precisionsbedömning av stationens koordinater p.g.a. överbestämningen. Koordinaterna räknas ut

med hjälp av minsta kvadratmetoden eller motsvarande utjämning. Varje ytterligare inmätt punkt, av god kvalitet, bör medföra en precisionsförbättring av stationens koordinater (Horemuz, 2008)

I normalsituationen saknas ofta tillräckligt med kända bakåtojekt i siktlinje för att etablera en station med god precision och kontroll. För att koordinatsätta bakåtojekt för totalstationsmätning behövs då normalt statisk GNSS-mätning(ar) med efterbearbetning, vilket ställer krav på resurser i form av tid och kompetens. Att direkt kunna mäta in sina "kända" punkter kan förenkla den totala mätinsatsen.

Valmöjligheterna blir också större med den realtidsuppdaterade metoden. Totalstationen kan placeras direkt på den plats där mätningarna ska utföras. Förutsättningen är att sikten är fri mellan totalstation och bakåtojekt samt att satellitsignaler för GNSS-mätning kan erhållas. Det behövs ingen tillgång till stompunkter om inte särskilda krav på kontroll och anslutning föreligger. Dessutom kan antalet bakåtojekt uppdateras fortlöpande beroende på vilken noggrannhet som behöver uppnås.

Förutsättningen för att kunna göra en stationsetablering direkt i fält är alltså att mätstången är försedd med både mätprisma och GNSS-mottagare. Fältprogramvaran måste dessutom kunna hantera integrerad mätning, d.v.s. att GNSS- och totalstationsobservationer kan kombineras. Detta finns i produkter från flera leverantörer. Våra mätningar utfördes med mätutrustning från Leica.

Rovermottagaren bör helst kunna hantera korrektionsdata från ett nätverks-RTK-system. Fördelarna med att använda ett nätverks-RTK-system är att observationerna från de virtuella referensstationerna är kontrollerade och korrigerade för påverkan från atmosfär och satellitbanfel. Genom att använda en anpassad antenn med jordplan som hindrar reflekterade satellitsignaler kan dessutom inverkan av flervägsfel minimeras (Vium, 2008).

## 5 Metod och genomförande

### 5.1 Generell strategi

Det bestämdes att fältmätningarna skulle innehålla två olika moment:

- Realtidsuppdaterad fri stationsetablering. Integrerad mätning med totalstation och projektanpassad nätverks-RTK via radioutsändning. Bakåtobjekten utgörs av punkter som koordinatsätts i realtid med GNSS-mottagare istället för kända stomnätspunkter. Stationens koordinater kan fås direkt i fält efter minst två inmätta bakåtobjekt.
- Statisk GNSS-mätning på samma totalstationsuppställning som ovan. Efter mätning delas observationerna in i 60 minuters intervall med efterberäkning i SWEPOS projektanpassade Beräkningstjänst för E45. Stationskoordinaterna fås alltså i efterhand.

Metoderna skulle användas simultant, för att säkerställa så lika förhållanden som möjligt. Likaså bestämdes att samma uppställning med stativ och trefot skulle behållas under en hel dag, för att minimera skillnader i centrerings.

Ett fåtal punkter med flera återbesök ansågs vara en bättre strategi för utvärdering i ett senare skede, än många punkter med få återbesök. Lokalberoende faktorer bör lättare kunna urskiljas, samtidigt som temporära effekter (t.ex. väder och vind) minimeras.

### 5.2 Etableringsalternativ för fri station

Ett rimligt antagande är att valet av bakåtobjekt direkt påverkar den förväntade precisionen i stationsetableringen. Just detta har undersökts av Horemuz (2008) i en teoretisk precisionsanalys av realtidsmetoden.

Sammanfattade resultat från denna analys är att noggrannheten i GNSS-mätningarna är en avgörande faktor för precisionen överlag, både i plan och höjd (till skillnad från totalstationsmätningarna). Utöver detta beror precisionen i plan i första hand på antalet bakåtobjekt inmätta med GNSS och deras spridning runt totalstationen. Planprecisionen förbättras endast marginellt om man ökar antalet bakåtobjekt över 15 st. Motsvarande gäller om cirkelsektorn och därmed spridningen av de gemensamma punkterna ökas över 200 gon. Ju mindre cirkelsektor, desto viktigare är dock den radiella spridningen.

En allmän rekommendation kan därför vara att bakåtobjekt mäts in i en sektor på minst 200 gon, med god radiell spridning i förhållande till totalstationen (t.ex. med inmätta punkter på 10 och 20 meters avstånd).



Vi valde att genomföra följande etableringsalternativ i fält:

- 100: d.v.s. bakåtoobjekten i en cirkelsektor på 100 gon och på en radie av 10 meter i förhållande till totalstationen.
- 200: som "100", men med 200 gons cirkelsektor.
- 200S: som "200", men med en varierande radiell spridning på 10 och 20 meter från totalstationen.

Vid etablering mättes bakåtoobjekten in så att cirkelsektorn successivt ökades till 100 eller 200 gon (se exempel i figur 4, avsnitt 5.4.4). För alternativet med radiell spridning var avsikten att mäta in varannan punkt på 10 respektive 20 meters avstånd.

100 gons spridning av bakåtoobjekten kan ibland vara det enda möjliga alternativet, med tanke på hur den omgivande terrängen ser ut. Genom att genomföra ungefär samma antal etableringar av varje alternativ, kan man utvärdera vilken betydelse denna faktor har vid praktisk mätning.

## 5.3 Fältmätningssområde

### 5.3.1 Referenssystem

Den projektanpassade nätverks-RTK-tjänsten ger en position direkt i SWEREF 99. I arbetsområdet används en projektanpassad variant av RT 90 7.5 gon V 60:- 1 i plan och RHB 70 i höjd (med tillhörande projektanpassad geoidmodell).

Ett officiellt transformations samband mellan referenssystemen har beräknats från koordinater för 21 punkter som är gemensamma i de två systemen. Parametrar för detta samband (tabell 1) kan definieras direkt i en RTK-mottagare för presentation av koordinater direkt i RT 90 7.5 gon V 60:- 1.

Tabell 1. Transformationsparametrar SWEREF 99 → RT 90 7.5 gon V 60:- 1 (Lantmäteriet, 2007):

Referensellipsoid	GRS 1980
Projektionstyp	Transversal Mercator
Medelmeridian	11° 18' 22.716000"
Skalreduktionsfaktor	1.00000642
Tillägg i X	-6000699.8396
Tillägg i Y	100028.7149



### 5.3.2 Testpunkter

Fältmätningarna utfördes på fyra kända punkter i det projektanpassade området kring utbyggnaden av E45 och järnvägen mellan Göteborg och Trollhättan. Samtliga punkter är s.k. RIX95-punkter och markerade med rör i berg. Koordinaterna (se tabell 2) som användes i vår jämförelse kommer från en statisk GNSS-stommätning utförd 2006, där ursprungs koordinaterna i SWEREF 99 har transformerats till RT 90 7,5 gon V 60:-1 via direktprojektion (se parametrar tabell 1). Eftersom samma samband användes i utrustningen så skedde i praktiken jämförelsen av plankoordinater i SWEREF 99-geometri. Höjden för de etablerade stationerna bestämdes direkt med ellipsoidhöjder för att inte införa eventuella fel från den projektanpassade geoidmodellen.

Testpunkterna valdes för att få en bra spridning i området och för att få en så skiftande terräng som möjligt. Alla punkterna har bedömts som lämpliga för GNSS-mätning. Punkterna i Kungälv och Stinneröd ligger i öppen terräng. Vid punkten i Honeröd är terrängen lite svårare, med en del lägre vegetation. Testpunkterna är utmärkta i figur 2, tillsammans med de SWEPOS-stationer som utnyttjats för utsändning av nätverks-RTK-korrekationer i testet. Arbetsområdet för pågående etapp av E45 ligger längs öster sida om Göta älv, mellan Surte och Älvängen. Testpunkterna ligger alltså snarare i periferin än i centrum av täckningsområdet för de projektanpassade tjänsterna



Figur 3. Testpunkter (svarta) och SWEPOS-stationer med lokal radioutsändning (röda). (Lantmäteriet, 2007 [bearbetad])

Tabell 2. Punktförteckning med "facitkoordinater", transformerade från SWEREF99 till projektets referenssystem (se tabell 1)

Punktnummer	Ort	X	Y	Ellipsoidhöjd
7714490	Kungälv	416956,074	138843,566	54,959
7714690	Relsbo	416616,656	147528,884	109,301
7715590	Honeröd	423819,896	143942,465	101,943
7716590	Stinneröd	429032,317	145936,097	99,640

## 5.4 Fältmetodik och utrustning

### 5.4.1 Lån och test av utrustning

I princip finns flera fabrikat tillgängliga för integrerad mätning, men förutsättningarna för den här studien var att den fria stationen skulle kunna uppdateras i realtid och att statisk mätning på totalstation skulle kunna ske samtidigt. Detta var vid tidpunkten endast möjligt med Leica-systemet.

Totalstation och GNSS-mottagare (med tillhörande utrustning för statisk mätning och realtidsmätning) lånades därför från Leica-kontoret i Göteborg. Stativ och radiomodem lånades från Lantmäteriet. Under två veckor utfördes provmätningar och mätutrustningen konfigurerades för de olika mätmetoderna.

### 5.4.2 Förberedelser i fält

Fältmätningarna genomfördes under tre veckors tid i april 2008. Varje punkt återbesöktes alltså ett flertal gånger, jämnt fördelat över mätperioden (se kap. 7). Satellitprediktioner togs fram för tänkta mättillfällen.

Varje dag gjordes centrering och horisontering av totalstationen över punkt med känd position (tabell 1) med hjälp av stativ och trefot med optiskt lod. Totalstationshöjden mättes före och efter varje mätdag och noterades.

Utrustningen var tvungen att anpassas för att klara båda mätmetoderna samtidigt. Handtaget på totalstationen byttes mot en specialadapter för GNSS-mottagare. På adaptern sattes en GNSS-mottagare för loggning av statisk data. Totalstationens kommunikation till GNSS-antennen var tvungen att brytas p.g.a. att totalstationen inte klarade av att hantera mätning av statisk data samtidigt som den integrerade mätningen pågick. Detta gjordes genom att rotera adaptern ett halvt varv så kontaktblecken mellan adaptern och antennen inte hade någon förbindelse. Statisk data

lagrades på en separat handenhet. Kommunikation mellan GNSS-antenn och handenhet skedde med bluetooth.

På stativet sattes ett externt batteri för försörjning av totalstationen. Totalstationen fjärrstyrdes ifrån handenheten på mätstången via ett radiomodem som satt på stativet.

Radiomodemet (för mottagning av projektanpassad nätverks-RTK-data) fastsattes på mätstången. Modemet fick sin strömförsörjning från ett batteri fastsatt under handenhetens hållare.

### 5.4.3 Statisk mätning

Följande utrustning användes för den statiska mätningen (se figur 4):

- GNSS-antenn/mottagare Leica ATX1230
- Handenhet Leica RX1250X
- Smart Antenna Adapter GAD104



Figur 4. Utrustning för statisk GNSS-mätning med Leica SmartStation.

Som nämndes ovan byttes först totalstationens handtag ut mot en specialadapter och på denna placerades en GNSS-antenn/mottagare (det s.k. SmartStation-konceptet). Korrekt antennhöjd erhöles genom att ett på förhand inställt offsetvärde adderades till den uppmätta totalstationshöjden i mätkonfigurationen.

Mottagaren ställdes in på loggning av mätdata var 15:e sekund. Elevationsmask sattes till 15°. Mätdata lagrades i en extern handenhet.

Start- och sluttider med orörlig antenn (se nedan) noterades. Endast GPS-data loggades eftersom beräkningstjänsten inte hanterar GLONASS-data.

Den statistiska mätningen genomfördes oavbrutet under dagen. När den integrerade mätningen utfördes roterade GNSS-antennen runt sin egen axel, ihop med totalstationen. För att se om detta påverkade resultatet fick antennen (d.v.s. totalstationen) vara orörlig under två 60-minuters intervall per dag. Slutsatsen blev att rotationen hade obetydlig inverkan på resultatet.

Data från de statistiska mätningarna överfördes till Leica Geo Office och konverterades till RINEX-format. Med hjälp av ett skript och programmet TEQC delades RINEX-filerna upp i 60 minuters intervall. Dessa skickades sedan till SWEPOS projektanpassade Beräkningstjänst för beräkning.

Vi valde 60 minuters intervall, där sannolikheten att beräkningen kan godkännas enligt kriterierna nedan är minst 95 %. Medelfelet vid detta observationsintervall blir 8 mm i plan och 11 mm i höjd, vilket ungefär motsvarar de krav man har på utgångspunkter för totalstationsmätning i samband med anläggningsprojekt.

Resultatet från den projektanpassade beräkningstjänsten kvalitetskontrollerades med avseende på följande kriterier (Lantmäteriet, 2007):

- Data-screening: Borttagna L1-observationer < 65 %
- Andel lösta periodobekanta: > 80 % för minst två baslinjer
- RMS i slutlig fixlösning: < 3mm
- Grundmedelfel i Helmerttransformation till SWEREF 99: < 32 mm.

Alla de 81 statistiska beräkningarna kunde godkännas enligt de föreslagna utvärderingskriterierna. Resultaten bearbetades sedan i Excel och kvalitetstal beräknades (enl. kap 6).

#### **5.4.4 Integrerad mätning**

Följande utrustning användes för den integrerade mätningen (se figur 5):

- Totalstation: Leica TCRP1203+1000
- GNSS-antenn/mottagare: Leica ATX1230GG
- Handenhet: Leica RX1250TC
- Handenhetshållare: GHT56
- Radiomodem för fjärrstyrning: Leica TCPS27B
- Prisma: 360° Leica GRZ122
- Mätstång: GLS12
- Radiomodem: Sateline 3ASd



Först fastsattes handenheten på en mätstång med höjd på två meter. På mätstången satt dessutom prisma för längd- och vinkelmätning mot totalstationen, och ovanför prismet en integrerad GNSS-mottagare/antenn. Offset-värde mellan prisma- och antennhöjd hanterades i en mätkonfiguration speciellt anpassad för integrerad mätning. Kommunikation mellan handenhet och GNSS-antenn skedde med bluetooth.



Figur 5. Utrustning för integrerad mätning med Leica SmartPole och totalstation.

Den externa fjärrstyrningsutrustningen monterades på stativet. Radiomodemet sattes på mätstången och ställdes in på aktuell frekvens, beroende på i vilket område mätningarna utfördes. Frekvensen för Tjurholmen är 445,30625 Hz som användes vid mätning av punkterna 7714490 och 7714690. Frekvensen för Mareberget är 445,38125 Hz för mätningar av punkt 7716590 och för punkt 7715590.

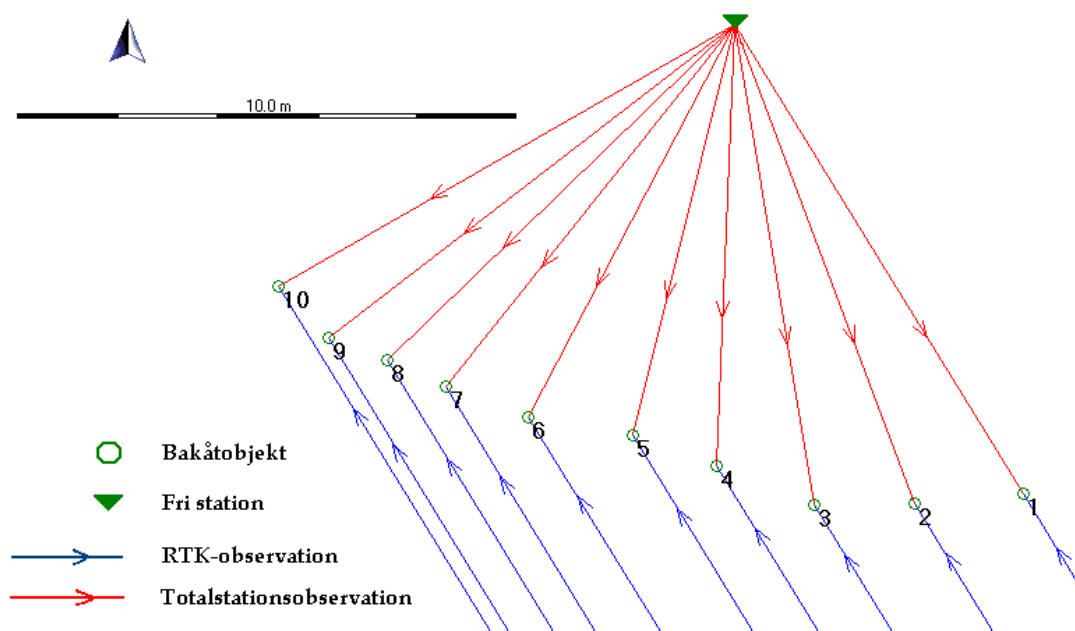
Den integrerade mätningen påbörjades efter det att statistisk data hade loggats i en timme. Ca 15 stycken fria stationsetableringar utfördes per dag. Alla dessa etableringar utfördes med samma stativuppställning. Elevationsvinkel sattes till 13° och PDOP-gränsen sattes till 4. Registrering av mätningarna skedde som medeltalsbildning av 5 RTK-positioner. Totalstationen ställdes in på "standardmätning", med låsning på prismet. Mätförfarandet var sedan enligt följande:

- 1) RTK-utrustningen startades.

- 2) Mätstången hölls i lod med hjälp av två stakkäppar vid vald punkt i terrängen.
- 3) Vid fixlösning mättes ett bakåto objekt in med nätverks-RTK-mätning. Antalet GPS/GLONASS-satelliter antecknades.
- 4) Mätutrustningen växlade över till totalstationsläge. Horisontal- och vertikalvinkel samt avstånd mot samma punkt mättes in.
- 5) När minst två punkter mätts in med både nätverks-RTK och totalstation beräknades de nya stationskoordinaterna och antecknades.
- 6) Steg 2-5 upprepades tills det att tio punkter var inmätta.
- 7) Den totala tiden för stationsetableringen noterades.

Det maximala antalet inmätta bakåto objekt som kunde användas vid fri stationsetablering med aktuell Leica-utrustning var 10 stycken. Efter fyra inmätta bakåto objekt fanns möjlighet att välja mellan "robust" utjämning och "vanlig" minsta-kvadratutjämning (med "robust" som default). Det "robusta" alternativet innebär att observationer som avviker mycket från det skattade värdet, d.v.s. med höga residualer, viktas ner i förhållande till övriga observationer. Detta alternativ kallades i det svenska gränssnittet för "sträng utjämning".<sup>1</sup>

Efterbehandling och analys av mätdata skedde i Leica Geo Office version 6.0 (se figur 6) och Excel.



Figur 6. Exempel på fri stationsetablering (observationer importerade till Leica Geo Office). Numreringen av bakåto objekt visar i vilken ordning inmätningen skedde.

<sup>1</sup> Begreppet "sträng utjämning" motsvarar dock snarast en samtidig minsta-kvadratutjämning av alla observationer enligt HMK-Ge:S. Med andra ord är detta en bättre beskrivning av det "vanliga" alternativet!

## 6 Kvalitetstermer

I alla mätningar förekommer det fel. Ett fel kan definieras som skillnaden mellan mätt värde och "sant" värde. Fel kan i sin tur delas in i följande kategorier:

- *Grova fel.* Orsakas av misstag eller slarv. De kan inte bearbetas med statistiska metoder. För att upptäcka grova fel bör upprepade mätningar göras.
- *Systematiska fel.* Exempel är dåligt kalibrerade instrument. Systematiska fel kan reduceras genom korrektioner eller anpassade mätmetoder.
- *Tillfälliga fel.* Slumpmässiga fel som antas vara normalfördelade. Effekten av dessa kan beräknas och reduceras med hjälp av upprepade mätningar eller lämpliga beräkningsmetoder.

Tillfälliga och systematiska fel kan utvärderas med ett antal kvalitetsmått enligt nedan.

### 6.1 Medelavvikelse (riktighet)

Det är mätvärdenas överensstämmelse med det sanna värdet. Medelavvikelsen bör vara så liten som möjligt och när tillräckligt många mätningar gjorts bör den gå mot noll. Om medelavvikelsen avviker från noll tyder det på att mätningarna har systematiska fel. Medelavvikelsen har beräknats enligt (Jämtnäs & Ahlm, 2005):

$$\frac{\sum \varepsilon}{n}$$

$\varepsilon$  = skillnaden mellan mätt värde och sant värde

$n$  = antal mätningar

### 6.2 Noggrannhet (medelfel)

Beskriver de mätta värdenas spridning kring ett sant värde. God noggrannhet innebär att mätningarna är väl samlade och har god överensstämmelse med korrekt värde. Noggrannheten har beräknats enligt (Jämtnäs & Ahlm, 2005):

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

$\varepsilon$  = skillnaden mellan mätt värde och sant värde

n = antal mätningar

### 6.3 Precision (standardavvikelse)

Beskriver mätningarnas spridning kring en mättnings medelvärde. God precision medför små slumpmässiga fel. Hög precision och låg noggrannhet kan förekomma och då har mätningarna systematiska fel. Precisionen har beräknats enligt (Jämtnäs & Ahlm, 2005):

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

$\bar{x}$  = mätningarnas medelvärde

n = antal mätningar



## 7 Resultat

### 7.1 Omfattning

I detta kapitel presenteras resultaten av den realtidsuppdaterade fria stationsetableringen och den statistiska mätningen som beräknats i den projektanpassade beräkningstjänsten. Alla avvikelser - som ligger till grund för kvalitetsmåten - har beräknats som

$$\text{Avvikelse} = \text{mätt värde} - \text{sant värde}$$

där "sant värde" finns i tabell 2 (se 5.3.2).

Mätningarna utfördes på fyra olika punkter under tre veckors tid i april 2008. Totalt genomfördes 159 mätserier med realtidsuppdaterade fria stationsetableringar. Varje sådan mätserie bestod av maximalt 10 inmätta bakåtojekt. Om den första koordinatbestämningen (med två bakåtojekt) räknas som den första "uppdateringen", så innebär det alltså att en mätserie i normalfallet omfattar nio uppdateringar av den fria stationens koordinater. Inmätningarna av bakåtojekten under en uppdaterad etablering utfördes enligt ett av alternativen i tabell 3 (se även avsnitt 5.2), med successivt ökande cirkelsektor för varje inmätt gemensam punkt.

Tabell 3. Antal mätserier per etableringsalternativ och punkt

	"100"	"200"	"200S"
7714490	19	18	14
7714690	16	16	16
7715590	12	---	---
7716590	16	16	16

Totalt beräknades 81 timmars statistiska observationer, uppdelade i 60 minuters intervall. Eftersom ingen noterbar skillnad kunde påvisas mellan rörlig antenn (roterande, under totalstationsmätning) respektive orörlig antenn har samtliga statistiska mätningar utvärderats tillsammans.

Avvikande mätningar har undersökts innan den statistiska sammanställningen gjorts för att kunna avgöra om grova fel föreligger. I första hand har detta skett utifrån fältprotokoll/anteckningar. Detta medförde att två mätserier togs bort från beräkningen av kvalitetsmått:

- En mätserie från 16 april (punkt 7714490) togs bort på grund av handhavandefel.

- En mätserie från 23 april (7714689) bort på grund av att flera bakåtojekt mättes in under träd.

Övriga avvikande mätningar (t.ex. på punkt 7715590) har dock fått kvarstå, med kommentarer i resultaten, eftersom vi inte kunde hitta någon direkt orsak att utesluta dessa. Sex stycken fria stationsetableringar hade färre än tio bakåtojekt. Detta ansågs dock inte påverka sammanställningen nämnvärt, eftersom stationskoordinaterna som regel stabiliserade sig efter ca 6 uppdateringar.

Etableringsalternativen "200" och "200S" visade sig svåra att utföra på punkt 7715590 p.g.a. oväntat svåra terrängförhållanden och vegetation. Där användes genomgående alternativet "100", dock med radien för inmätta bakåtojekt minskad till ca 5 meter (av samma skäl).

## 7.2 Kvalitetsmått för samtliga stationskoordinater

Kvalitetsmått med avseende på det projektanpassade referenssystemet redovisas här för samtliga beräknade stationskoordinater (på alla fyra punkter) med respektive metod – fri etablering med nätverks-RTK respektive efterberäkning av statisk GNSS. Observera att endast de sista uppdateringarna från de fria stationsetableringarna användes för dessa beräkningar.

Tabell 4. Medelavvikelse relativt känd punkt i mm.

	Fri	Statisk
Norr	2	2
Öst	1	-2
Höjd	8	-7

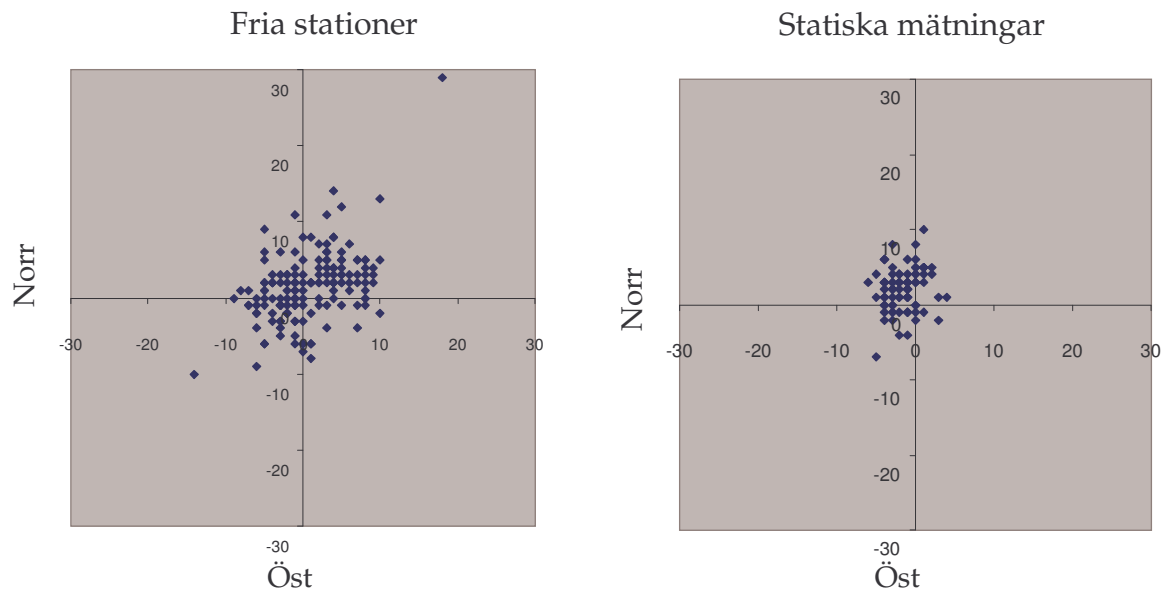
Tabell 5. Precision (spridning kring mätningarnas medelvärde) i mm.

	Fri	Statisk
Norr	5	3
Öst	5	2
Höjd	7	9

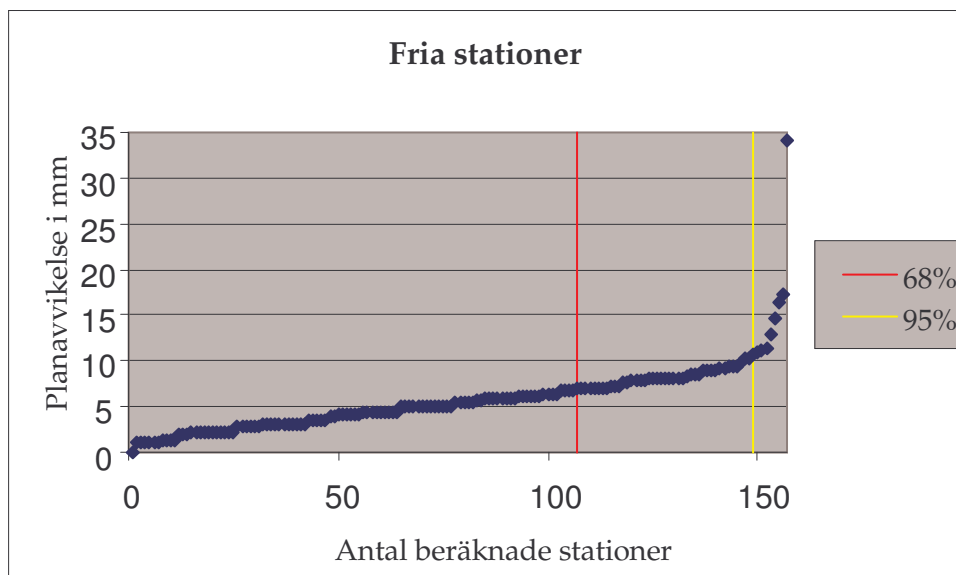
Tabell 6. Noggrannhet kring känd punkt i mm.

	Fri	Statisk
Plan	7	4
Höjd	11	11

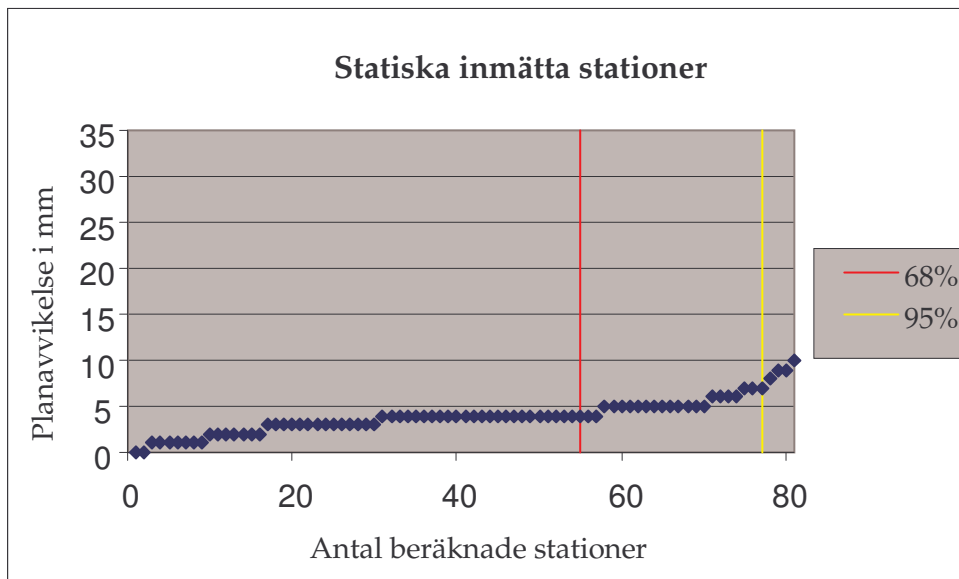
## 7.2.1 Grafisk redovisning av planavvikelser



Figur 7. Planavvikelser för fria stationer (sista uppdateringarna) respektive statiska inmätta stationer.



Figur 8. Planavvikelser för fria stationer (sista uppdateringarna) sorterade från lägsta till högsta värdet.

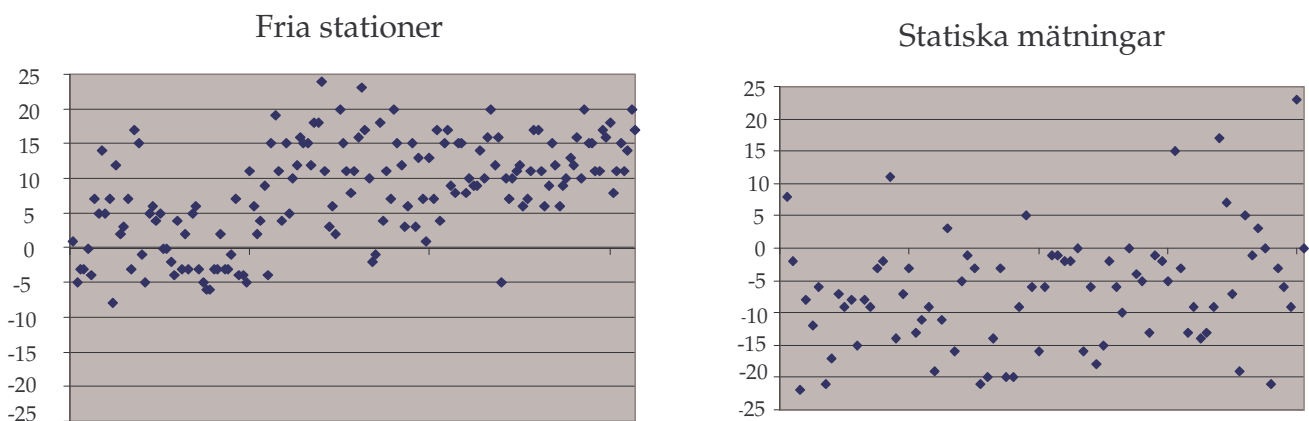


Figur 9. Planavvikelser för statiska inmätta stationer sorterade från lägsta till högsta värdet.

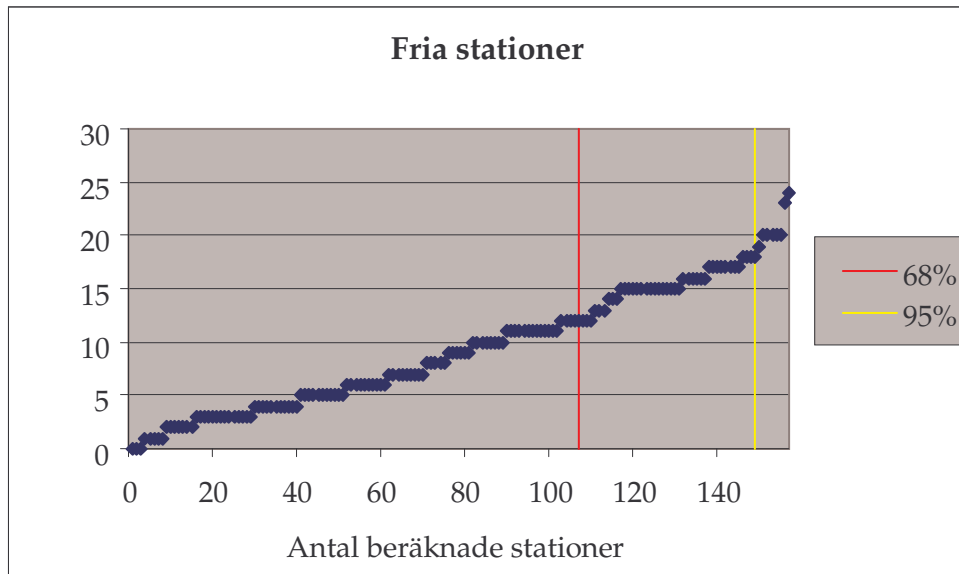
Tabell 7. Planavvikelser på 68%- och 95%-nivåerna, även markerade i figur 8 och 9

	Fria	Statisk
68%	7	4
95%	11	8

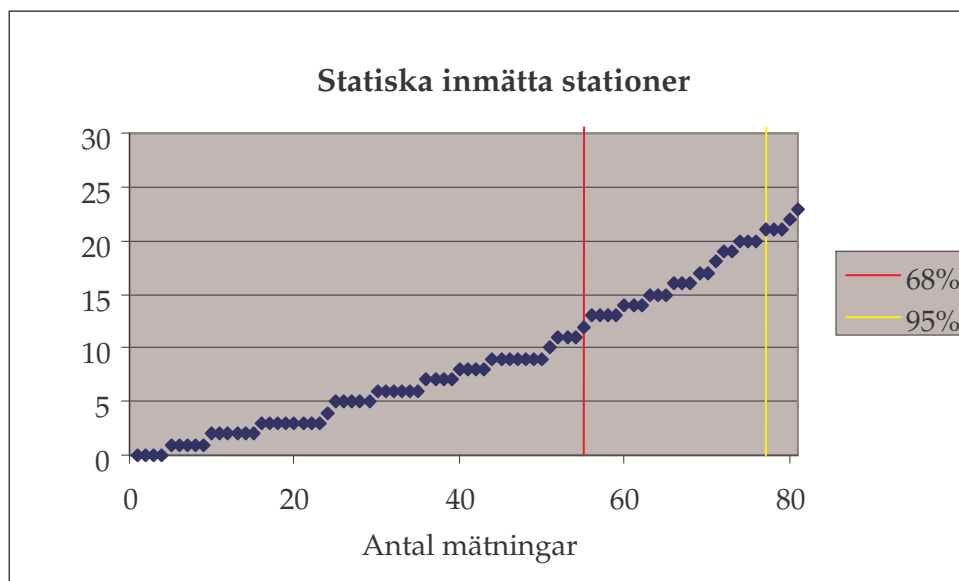
## 7.2.2 Grafisk redovisning av höjdavvikelser



Figur 10. Höjdavvikelser för fria stationer (sista uppdateringarna) respektive statiska inmätta stationer.



Figur 11. Höjdavvikelser för fria stationer (sista uppdateringarna) sorterade från lägsta till högsta värdet.



Figur 12. Höjdavvikelser för statistiska inmätta stationer sorterade från lägsta till högsta värdet

Tabell 8. Höjdavvikelser (absolutvärden) på 68%- och 95%-nivåerna, även markerade i figur 11 och 12.

	Fri	Statisk
68%	12	12
95%	18	21

## 7.3 Kvalitetsmått för mätningar på respektive punkt

Kvalitetsmått redovisas här för respektive punkt, för de två etableringsmetoderna – fri etablering med nätverks-RTK respektive efterberäkning av statisk GNSS. Observera att endast de sista uppdateringarna från de fria stationsetableringarna användes för dessa beräkningar.

Tabell 7. Medelavvikelse (relativt känd punkt) i mm.

	7714490		7714690		7715590		7716590	
	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk
Norr	0	1	0	-1	8	3	3	5
Öst	-2	-2	-1	-2	5	-3	5	0
Höjd	1	-8	11	-3	11	-14	12	-6

Tabell 8. Precision (relativt mätningarnas medelvärde) i mm.

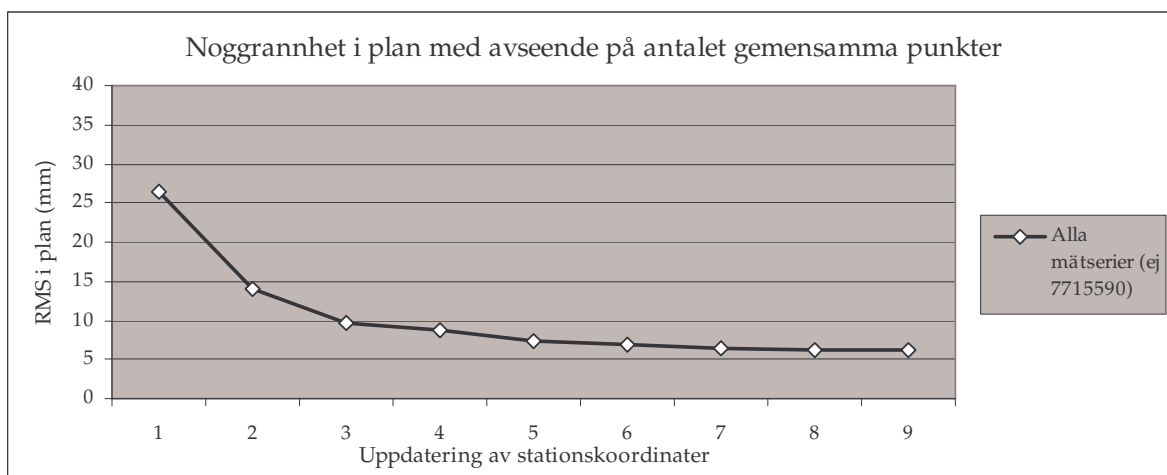
	7714490		7714690		7715590		7716590	
	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk
Norr	4	3	4	2	8	2	3	2
Öst	4	2	3	2	5	1	3	1
Höjd	6	8	7	11	5	8	5	6

Tabell 9. Noggrannhet (relativt känd punkt) i mm.

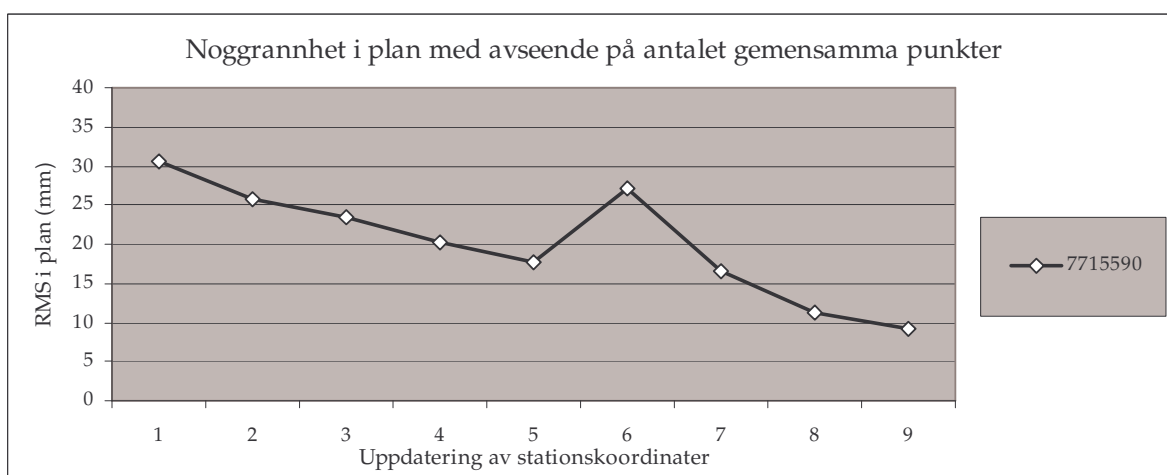
	7714490		7714690		7715590		7716590	
	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk	Fri	Statisk
Plan	6	4	5	4	13	5	7	5
Höjd	6	11	13	11	12	16	13	8

## 7.4 Uppdatering av fri station

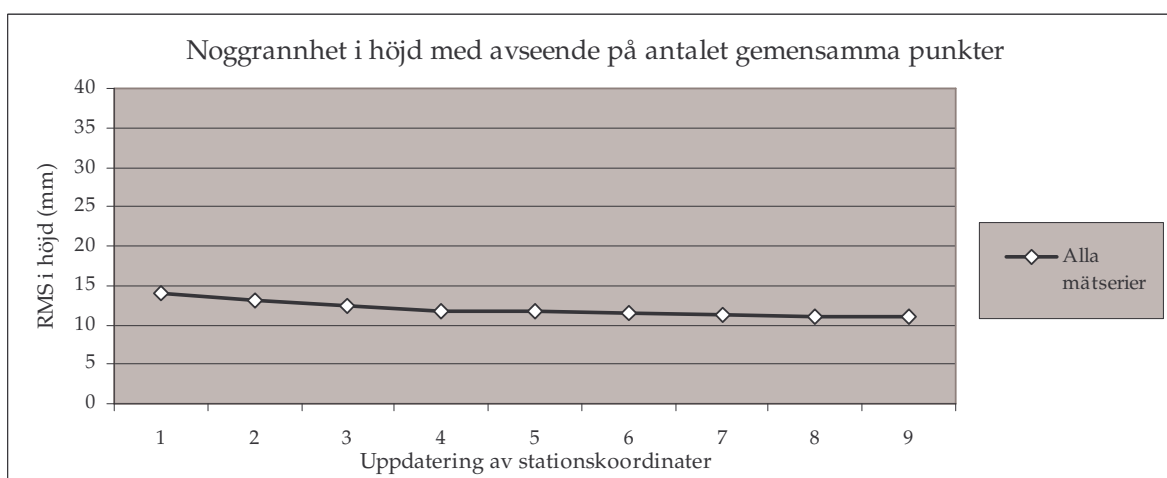
I diagrammen nedan visas hur stationskoordinaternas noggrannhet i plan och höjd (beräknat som RMS) varierar med antalet uppdateringar, d.v.s. för varje ytterligare inmätt bakåtojekt vid fri stationsetablering. Alla mätserier har använts. Mätserier från punkt 7715590 har dock redovisats separat i figur 14, eftersom dessa avviker signifikant från de övriga i plan.



Figur 13. Förbättring av noggrannheten i plan för varje uppdatering, d.v.s. ytterligare inmätta bakåtoobjekt (RTK-punkter). Mätserier från punkterna 7714490, 7714690 och 7716590.



Figur 14. Förbättring av noggrannheten i plan för varje uppdatering, d.v.s. ytterligare inmätta bakåtoobjekt (RTK-punkter). Mätserier från punkt 7715590.

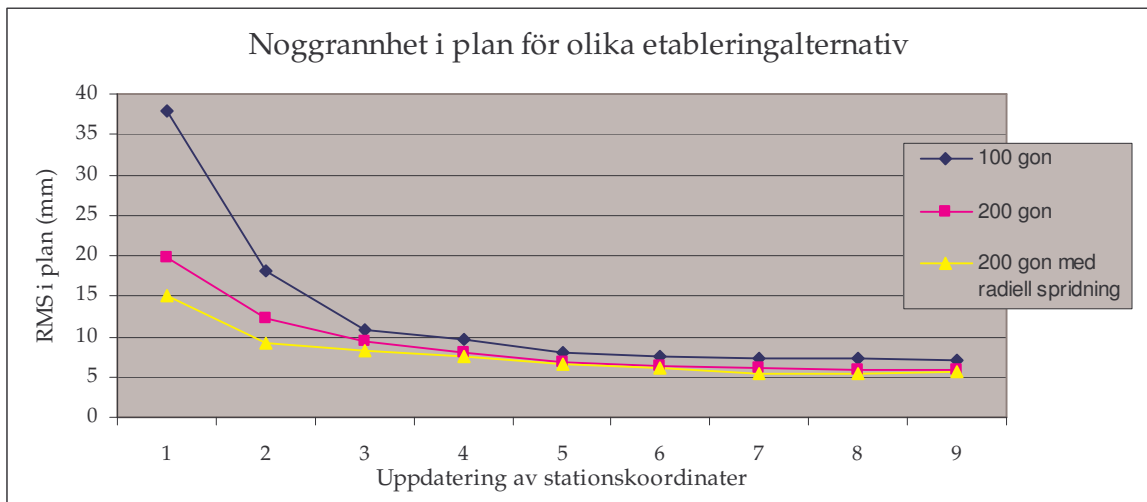


Figur 15. Förbättring av noggrannheten i höjd för varje uppdatering, d.v.s. ytterligare inmätta bakåtoobjekt (RTK-punkter). Mätserier från samtliga punkter.

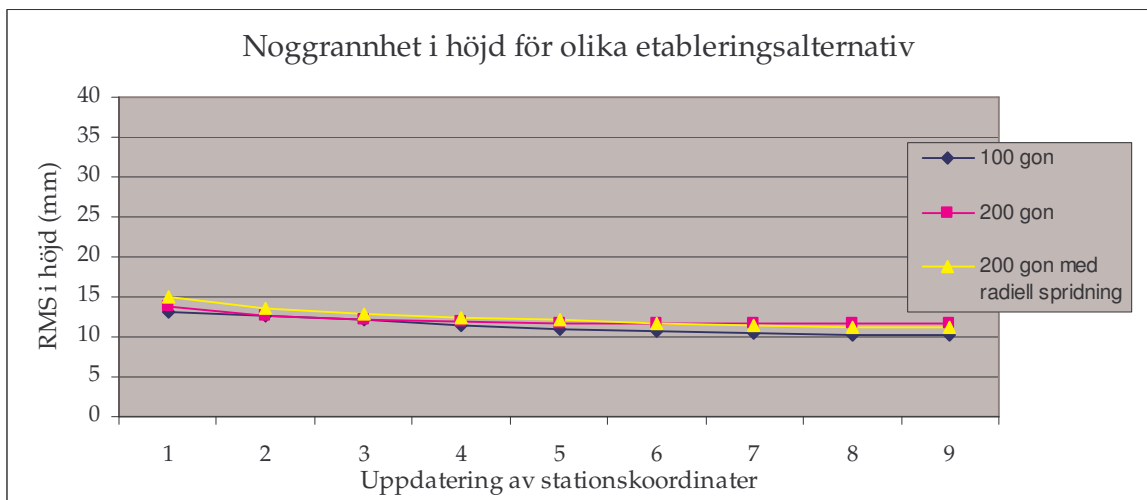
## 7.5 Etableringsalternativ

I diagrammen nedan visas stationskoordinaternas noggrannhet i plan och höjd beroende på vilket etableringsalternativ (se avsnitt 5.2 och 7.1) som valts för den fria stationen, samt hur många inmätta bakåtoobjekt som använts. Även i detta fall togs punkt 7715590 bort ur redovisningen eftersom endast etableringar med 100 gons spridning av bakåtoobjekt genomfördes på den punkten. Sammanställningen här omfattar alltså punkterna 7714490, 7714690 och 7716590, med totalt

- 51 mätserier med alt. "100"
- 50 mätserier med alt. "200"
- 46 mätserier med alt. "200s"



Figur 16. Noggrannheten i plan för olika etableringsalternativ som funktion av antal inmätta bakåtoobjekt (RTK-punkter). Mätserier från punkterna 7714490, 7714690 och 7716590.



Figur 17. Noggrannheten i höjd för olika etableringsalternativ som funktion av antal inmätta bakåtoobjekt (RTK-punkter). Mätserier från punkterna 7714490, 7714690 och 7716590.



## 8 Diskussion

En viktig fråga är förstås hur väl realtidsuppdaterad fri stationsetablering med nätverks-RTK fungerar i praktiken, under produktionsförhållanden. Är den noggrann, pålitlig och lättanvänd?

Om man ser till koordinaternas precision (d.v.s. standardavvikelsen) så verkar den realtidsuppdaterade metoden ge resultat på motsvarande nivå som vid statisk mätning över längre tid – ca 5 mm i plan och 7 mm i höjd. Detta är t.ex. betydligt lägre än det medelfel som är specificerat vid användning av den projektanpassade beräkningstjänsten med minst 15 minuters mättid – 8 mm i plan och 21 mm i höjd (Lantmäteriet, 2007). Systematiska och tillfälliga fel försämrar dock den faktiska noggrannheten vid fri stationsetablering, exempelvis:

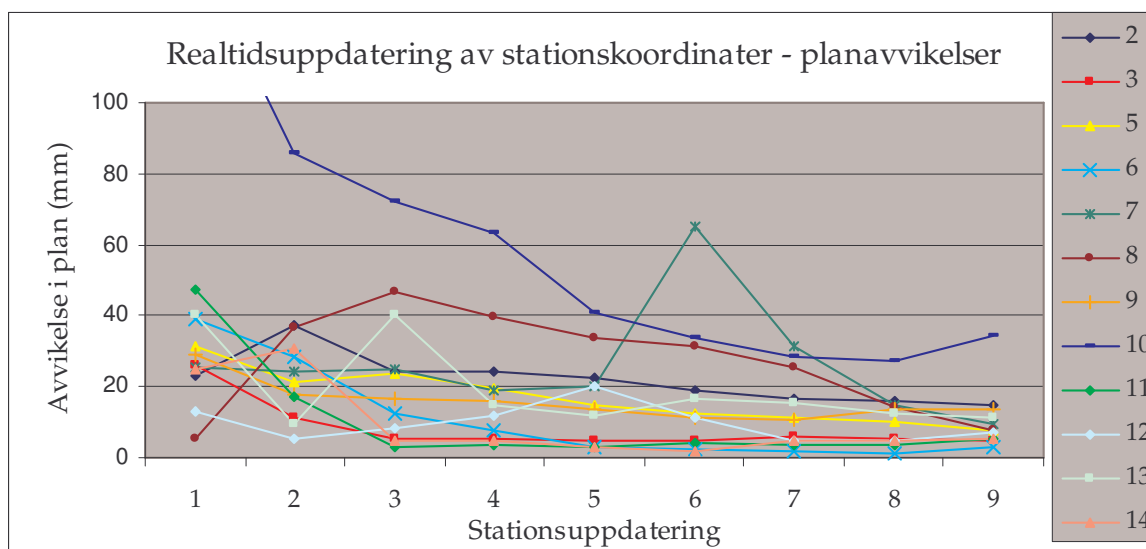
- Osäkerhet i bestämning av instrumenthöjder (offset mellan prisma och GNSS-antenn får antas vara felfritt)
- Osäkerhet i RTK-mätning, på grund av t.ex. atmosfärförhållanden, flervägsfel, GNSS-antenn, RTK-algoritm och RTK-korrektionsdata. Detta inkluderar även systematik p.g.a. osäkerhet i bestämningen av SWEPOS-koordinater.
- Indirekt centreringfel p.g.a. bristande synkronisering mellan RTK- och totalstationsmätning

Effekten av de två sista felkällorna kan i regel reduceras genom fler inmätta punkter, såvida inte t.ex. höjdsystematik för närmaste SWEPOS-station slår igenom vid RTK-bestämning av bakåtojekt. En felaktigt bestämd instrumenthöjd ger dock en systematisk höjdavvikelse som inte kan minskas med fler mätningar.

Om vi tittar på enskilda punkter så avviker 7715590 tydligt från övriga punkter i plan, både om man tittar på kvalitetsmåten (tabell 10) och på enskilda mätserier (figur 18). Punkt 7715590 bedömdes på förhand som lite svårare, p.g.a. kuperad terräng med en hel del vegetation som skärmade av sikten. Det var ändå något överraskande att färre än hälften av mätserierna hade konvergerat till under 20 mm avvikelse i plan efter tre uppdateringar (d.v.s. fyra bakåtojekt).

Tabell 10. Kvalitetsmått för punkt 7715590 och 7716590. RTK-korrektionsdata från Tjurholmen har tagits emot vid båda dessa testpunkter.

	Meddelavvikelse		Standardavvikelse	
	7715590	7716590	7715590	7716590
Norr	8	3	8	3
Öst	5	5	5	3
Höjd	11	12	5	5



Figur 18. Planavvikelser som funktion av uppdatering. 13 mätserier från punkt 7715590.

Man kan alltså konstatera att lokalförhållanden verkar ha större inverkan på den realtidsuppdaterade metoden än vid statisk mätning över längre tid. Flervägsfel är antagligen den enskilt största lokala felkällan och den reduceras på samma sätt genom många inmätningar av bakåtojekt, helst väl spridda i tid och rum. Ett bra exempel på detta är mätserierna i figur 18, som alla har konvergerat till rimliga värden efter åtta-nio uppdateringar (utom en serie, som innehåller ett eller flera grova fel).

Om man ser till vad som kan förväntas teoretiskt så har Horemuz (2008) uppskattat att medelfelet i plan vid fri stationsetablering med hjälp av projektanpassad nätverks-RTK kan komma ner i 3,5 mm och i höjd 2,4 mm. Det bör observeras att detta gäller ett idealfall, med minst trettio bakåtojekt som är jämnt spridda i en sektor på 200 gon och med en radie på minst 10 meter i förhållande totalstationen. Vid en sektor på 100 gon så blir medelfelet i plan 5,4 mm och i höjd 2,4 mm. Dessutom förutsätts det i Horemuz (2008) att totalstationsmätningen och GNSS-mätningen sker i samma moment mot bakåtojekt, vilket inte var möjligt med den utrustning som användes i det här testet. Med Leicas SmartPole-lösning sker istället inmätningen av bakåtojekten i två moment:

- 1) Först en mätning med GNSS för att erhålla bakåtojektets koordinater.
- 2) Därefter måste man växla över i totalstationsläge för att kunna mäta längd och vinklar mot samma bakåtojekt.

Momentet med växling mellan GNSS och totalstation tar ett antal sekunder (och knapptryckningar!). Under den tiden krävs att användaren håller stängen med antenn och prisma så stilla som möjligt, för att inte införa ett indirekt centeringsfel för bakåtojekten. Dessutom krävdes ny sökning mot prisma eftersom prisma-låsningen släpptes under GNSS-läge. Det vore önskvärt om mätningen med GNSS och totalstation kan ske

i ett och samma moment. Detta är t.ex. möjligt i Trimble integrerade koncept "I.S. Rover".

Resultaten av testmätningar med olika etableringalternativ för fria station visar ungefär motsvarande som i Horemuz (2008), med snabbare konvergens i plan för inmätning med 200 gon jämfört med 100 gon – särskilt för alternativet med radiell spridning. I höjd däremot verkar skillnaden mellan alternativen vara försumbar.

Ett annat och möjligen mer fältmässigt etableringsalternativ till dem som redovisas i denna rapport (se avsnitt 5.2) kan vara att mäta in det andra bakåtojektet med större vinkel från det första bakåtojektet, t.ex. 100 gon. Därefter nästa bakåtojekt mellan de två första o.s.v. Våra tester av detta gav indikationer på att stationskoordinaterna stabiliserades sig efter ett färre antal bakåtojekt i jämförelse med de etableringsalternativ som redovisas i denna rapport, även om slutkoordinaterna blev ungefär de samma.

Jämfört med bestämning med statisk GNSS så går den realtidsuppdaterade etableringen snabbare, ca 15-20 minuter om tio RTK-punkter mäts in. Dessutom kan man få koordinaterna direkt i fält, och ser alltså direkt om etableringen lyckats eller misslyckats.

En nackdel kan möjligen vara kontrollerbarheten. Vid statisk inmätning av totalstationens koordinater kan exempelvis en kontrollmätning göras mot den punkt som används för orientering (som kanske också bestäms i beräkningstjänsten). Om möjligt bör förstås kontrollmätning mot känd punkt göras från den fria stationen, men i avsaknad av stabila markeringar i närheten kan ett bra alternativ vara att använda en kompletterande oberoende teknik, t.ex. som i vårt fall där samtidig statisk GNSS-mätning gjordes med SmartStation-lösningen. För att kunna göra detta i produktionsmätning bör dock problemet med samtidig dataloggning lösas (se avsnitt 5.4.2). Ett annat möjligt alternativ är kontroll av dubbelinmätta detaljer, d.v.s. att samma punkt mäts in från (minst) två oberoende fria stationsuppställningar.

En annan fråga kring kontrollerbarhet gäller själva uppdateringen av stationskoordinaterna. Kan man vara säker på att ytterligare inmätta RTK-punkter tillför något, och inte t.o.m. försämrar etableringen? För att kunna utföra kontroll i fält - under fortlöpande uppdatering av den fria stationen – kan man rekommendera följande procedur (Leica, 2006):

- 1) Efter att minst två bakåtojekt har mätts in så beräknas stationens koordinater.
- 2) När fyra bakåtojekt har mätts in så kan en kvalitetskontroll göras genom att kontrollera standardavvikelserna för resultaten (d.v.s. norr, öst, höjd och horisontalvinkel för orientering). Dessutom kan man växla mellan robust utjämning och "vanlig" minsta kvadratutjämning vid uträkningen av stationskoordinaterna.

- 3) Om det syns en tydlig skillnad på standardavvikelser och/eller stationskoordinater vid växling bör en kontroll av residualer göras. Om däremot skillnaden mellan koordinaterna är små så kan resultaten godkännas.

En sådan kvalitetskontroll låg utanför ramen för det här fälttestet, men flera stationskoordinater hade säkert kunnat förbättras (exempelvis flera mätserier för punkt 7715590) – liksom de uppskattade måtten på noggrannhet!

Inte heller orienteringen av den fria stationen beaktades i den här studien, men vid inmätning och utsättning bör man tänka på att detta i högsta grad påverkar slutprecisionen. Liksom i andra fall av stationsetablering är långa sikter att föredra vid orientering. Horemuz (2008) rekommenderar minst 50 m avstånd mellan totalstation och RTK-punkter, i avsaknad av kända bakåtbodyekt. Vid liten sektorspridning av RTK-punkter (<100 gon) har avståndet större betydelse.

Till slut kan man nämna en aspekt av den realtidsuppdaterade tekniken som både kan vara en fördel och en nackdel – nätverks-RTK-systemet. Med nätverks-RTK är korrektionsdata kvalitetskontrollerade och skräddarsydda för användaren. Men den realtidsuppdaterade tekniken är helt beroende av ett fungerande RTK-system, med intakta referensstationer, nätverks-RTK-mjukvara och distribution av korrektioner, t.ex. via radio. I SWEPOS-systemet finns dock bra redundans för att hantera eventuella bortfall av hårdvara, mjukvara eller dataförbindelser.

## 9 Slutord

I den här studien undersöktes vilken noggrannhet som kan uppnås när totalstationskoordinater bestäms med metoden realtidsuppdaterad fri etablering med hjälp av projektanpassad nätverks-RTK. Resultaten jämfördes även med statisk inmätta stationskoordinater som efterberäknats i SWEPOS projektanpassade Beräkningstjänst (med 60 minuters observationstid).

Totalt fick vi ett medelfel i plan på 7 mm och i höjd 11 mm med den realtidsuppdaterade metoden, när det maximala antalet bakåtojekt användes. Motsvarande värden för den statiska mätningen var 4 mm i plan och 11 mm i höjd.

För att tillgodose de krav på anslutning och kontroll som ofta föreligger vid anläggningsprojekt så krävs att god mätpraxis tillämpas. Utifrån våra fälttester rekommenderas följande vid etablering av fri station med hjälp av RTK-teknik:

- Använd så många bakåtojekt (RTK-punkter) som möjligt för varje uppställning, gärna väl spridda i tid och rum.
- Använd "robust" utjämningsmetod om detta finns tillgängligt och kontrollera residualer vid uppdatering för att upptäcka avvikande observationer.
- Kontrollera instrumenthöjd före och efter utförd inmätning eller utsättning.
- För kontroll: kombinera realtidsuppdaterad etablering av fri station med oberoende mätmetod (t.ex. statisk GNSS-mätning ovanpå totalstation) eller utför dubbelinmätning av detaljer från oberoende fria stationsuppställningar.

Tekniken har mycket utvecklingspotential. Om realtidsuppdatering av stationsetablering (i likhet med Leica) kan kombineras med användarvänlig integrerad mätning (i likhet med Trimble) så kan detta bli ett mycket gångbart alternativ vid produktionsmätning. Detta kräver översyn av fältprogramvara och gränssnitt för styrning av totalstation från RTK-rover.



## 10 Källförteckning

Alexandersson, Jan (2007): Föreläsningsmaterial i kursen Geomatik III vid Högskolan Väst.

Horemuz, Milan (2008): *Realtidsuppdaterad fristation*. Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm.

Jämtnäs, Lars & Ahlm, Linda (2005). *Fältstudie av Internetdistribuerad nätverks-RTK. LMV-rapport 2005:4*. Lantmäteriet, Gävle.

Lantmäteriet (2007): *Projektanpassad Nätverks-RTK-tjänst för V45 - kortfattad beskrivning, version 2.0*. Lantmäteriet, Gävle.

Leica (2006). *System 1200 Newsletter – No.29*. [pdf]. Leica. Tillgänglig: <[http://www.leicageosystems.com/corporate/en/downloads/lgs\\_page\\_catalog.htm?cid=4660&page=2](http://www.leicageosystems.com/corporate/en/downloads/lgs_page_catalog.htm?cid=4660&page=2)> [2008-06-15]

Lilje, Christina, Andreas Engfeldt & Lotti Jivall (2008): *Introduktion till GNSS*. LMV-rapport 2007:11. Lantmäteriet, Gävle.

Starkman, Stefan & Holm, Hans (2008). Föreläsningsmaterial i kursen Geomatik V vid Högskolan Väst.

Vium Andersson, Johan (2008): *Realtidsuppdaterad fristation - förslag till ny mätmetod*. Opublicerat PM daterat 2008-10-10.





## Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriet

- 2006:2 Norin Dan, Engfeldt Andreas, Johansson Daniel, Lilje Christina: Kortmanual för mätning med SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst.
- 2006:3 Klang Dan & Burman Helén: En ny svensk höjdmodell laserskanning, Testprojekt Falun.
- 2006:4 Klang Dan: KRIS-GIS® projekt i Eskilstuna. Kvalitet i höjdmodeller.
- 2006:5 von Malmborg Helena: Jämförelse av Epos och nätverks-DGPS.
- 2006:8 Wennström Hans-Fredrik (ed.): Struve Geodetic Arc 2006 International Conference – the Struve arc and extension in space and time.
- 2006:9 Shah Assad: Systematiska effekter inom den tredje riksavvägningen.
- 2007:1 Johansson Fredrik & Wallerström Mattias: En nätverks-RTK-jämförelse mellan GPS och GPS/GLONASS.
- 2007:4 Ågren Jonas & Svensson Runar: Postglacial land uplift model and system definition for the new Swedish height system RH 2000.
- 2007:8 Halvardsson Daniel & Johansson Joakim: Jämförelse av distributionskanaler för projektanpassad nätverks-RTK.
- 2007:10 Lidberg Martin & Lilje Mikael: Evaluation of monument stability in the SWEPOS GNSS network using terrestrial geodetic methods - up to 2003.
- 2007:11 Lilje Christina, Engfeldt Andreas, Jivall Lotti: Introduktion till GNSS.
- 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 riksavvägningen.
- 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

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](http://www.lantmateriet.se)