

# **Fältstudie av Internet- distribuerad nätverks-RTK**

Examensarbete av  
Lars Jämnäs & Linda Ahlm

Gävle 2005



Copyright ©

2005-06-30

Författare Lars Jämtnäs & Linda Ahlm

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 154

LMV-Rapport 2005:XX – ISSN 280-5731

# Fältstudie av Internet- distribuerad nätverks-RTK

Examensarbete av  
Lars Jämnäs & Linda Ahlm

Gävle 2005

L A N T M Ä T E R I E T





# FÖRORD

Denna rapport är resultatet av ett examensarbete vid Högskolan i Gävle. Den avslutar vår utbildning på Geomatikprogrammet med inriktning mot mätningsteknik. Arbetet har utförts på uppdrag av Geodetiska utvecklingsenheten på Lantmäteriet i Gävle.

Vi vill tacka våra handledare Dan Norin och Bo Jonsson på Lantmäteriet, tillsammans med alla andra på Geodesi-enheten och SWEPOS-driften för all hjälp vi fått.

Vi vill även tacka vår examinator och handledare på Högskolan i Gävle, Stig-Göran Mårtensson.

Gävle, juni 2005

Linda Ahlm

Lars Jämnäs



# Fältstudie av Internet- distribuerad nätverks-RTK

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
|            | <b>FÖRORD</b>                 | <b>5</b>  |
| <b>1</b>   | <b>SAMMANFATTNING</b>         | <b>11</b> |
| <b>2</b>   | <b>ABSTRACT</b>               | <b>13</b> |
| <b>3</b>   | <b>INLEDNING</b>              | <b>15</b> |
| 3.1        | Bakgrund                      | 15        |
| 3.2        | Syfte                         | 16        |
| 3.3        | Metod och genomförande        | 16        |
| 3.4        | Disposition                   | 17        |
| 3.5        | Tidigare studier              | 17        |
| <b>4</b>   | <b>INTRODUKTION TILL GNSS</b> | <b>19</b> |
| <b>4.1</b> | <b>GPS</b>                    | <b>19</b> |
| 4.1.1      | Rymdsegmentet                 | 19        |
| 4.1.2      | Övervakningssegmentet         | 21        |
| 4.1.3      | Användarsegmentet             | 22        |
| <b>4.2</b> | <b>GLONASS</b>                | <b>22</b> |
| <b>4.3</b> | <b>GALILEO</b>                | <b>23</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Avståndsmätning</b>        | <b>23</b> |
| 4.4.1      | Kodmätning                    | 24        |
| 4.4.2      | Bärvågsmätning                | 24        |
| <b>4.5</b> | <b>Felkällor</b>              | <b>25</b> |
| 4.5.1      | Atmosfärsstörningar           | 25        |
| 4.5.1.1    | Jonosfären                    | 25        |

|            |   |           |
|------------|---|-----------|
| 4.5.1.2    | Troposfären                                       | 26        |
| 4.5.2      | Banfel  | 27        |
| 4.5.3      | Klockfel  | 27        |
| 4.5.4      | Flervägsfel                                       | 28        |
| 4.5.5      | Antenn- och mottagarfel                           | 28        |
| 4.5.6      | Satellitkonfiguration                             | 29        |
| 4.5.7      | Signalkvalitet och sikthinder                     | 30        |
| <b>4.6</b> | <b>Positionsbestämningsmetoder</b>                | <b>30</b> |
| 4.6.1      | Absolut mätning                                   | 31        |
| 4.6.2      | Relativ mätning                                   | 31        |
| 4.6.2.1    | Statisk mätning                                   | 32        |
| 4.6.2.2    | DGPS  | 33        |
| 4.6.2.3    | RTK   | 33        |
| <b>4.7</b> | <b>Stödsystem</b>                                 | <b>34</b> |
| <b>4.8</b> | <b>Referenssystem</b>                             | <b>35</b> |
| 4.8.1      | Internationella och nationella referenssystem     | 35        |
| 4.8.1.1    | ITRF 89   | 35        |
| 4.8.1.2    | ETRS 89   | 35        |
| 4.8.1.3    | SWEREF 99   | 36        |
| 4.8.1.4    | WGS 84  | 36        |
| 4.8.2      | Modellering av jorden                             | 36        |
| 4.8.2.1    | Geoiden   | 36        |
| 4.8.2.2    | Ellipsoiden                                       | 37        |
| 4.8.3      | Höjder  | 37        |
| <b>5</b>   | <b>NÄTVERKS-RTK</b>                               | <b>39</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Referensstationsnät</b>                        | <b>40</b> |
| 5.1.1      | SWEPOS  | 40        |
| 5.1.2      | SWEPOS nätverks-RTK-tjänst                        | 42        |
| <b>5.2</b> | <b>Nätverksprocess och felmodellering</b>         | <b>43</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Principtekniker</b>                            | <b>44</b> |
| 5.3.1      | Utsändning av korrektionsmodell                   | 45        |
| 5.3.2      | VRS - virtuell referensstation                    | 45        |
| <b>5.4</b> | <b>Datakommunikation</b>                          | <b>46</b> |
| 5.4.1      | Standardformat                                    | 46        |
| 5.4.2      | Distributionskanaler                              | 47        |
| 5.4.3      | Internet och NTRIP                                | 48        |
| <b>5.5</b> | <b>Exempel på realtidstillämpningar med NTRIP</b> | <b>52</b> |
| <b>6</b>   | <b>GENOMFÖRANDE AV STUDIE</b>                     | <b>55</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Förutsättningar för test av nätverks-RTK</b>   | <b>55</b> |
| 6.1.1      | Systemfunktion                                    | 55        |
| 6.1.2      | Implementering av NTRIP                           | 57        |



|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 6.1.3      | Testområde  | 59         |
| <b>6.2</b> | <b>Utrustning och mätmetod</b>  | <b>60</b>  |
| <b>6.3</b> | <b>Databearbetning</b>  | <b>63</b>  |
| <b>6.4</b> | <b>Analysmetod</b>  | <b>63</b>  |
| 6.4.1      | Felbegreppet  | 64         |
| 6.4.2      | Definitioner av kvalitetsbegrepp  | 64         |
| 6.4.3      | Fördelningsanalys   | 66         |
| 6.4.3.1    | Normalitetstest   | 67         |
| 6.4.3.2    | Jämförelse av varianser och medelvärden                                   | 68         |
| 6.4.4      | Korrelationsanalys  | 70         |
| 6.4.4.1    | Regressionsanalys   | 70         |
| 6.4.4.2    | Autokorrelation   | 72         |
| <b>7</b>   | <b>RESULTAT</b>   | <b>75</b>  |
| <b>7.1</b> | <b>Genomförda mätningar</b>   | <b>76</b>  |
| <b>7.2</b> | <b>Avvikelse för samtliga mätningar</b>                                   | <b>76</b>  |
| 7.2.1      | Planavvikelse för samtliga mätningar                                      | 77         |
| 7.2.2      | Höjdavvikelse för samtliga mätningar                                      | 78         |
| <b>7.3</b> | <b>Kvalitetsmått för samtliga mätningar</b>                               | <b>79</b>  |
| <b>7.4</b> | <b>Initialiseringstider för samtliga mätningar</b>                        | <b>79</b>  |
| <b>7.5</b> | <b>Avvikelse och initialiseringstider för enskilda punkter</b>            | <b>80</b>  |
| 7.5.1      | Spridningsdiagram   | 80         |
| 7.5.2      | Intervalldiagram  | 82         |
| <b>7.6</b> | <b>Fördelningsanalys</b>  | <b>83</b>  |
| 7.6.1      | Sammanställning av avvikelsefördelningar                                  | 83         |
| 7.6.2      | Normalitetstest   | 84         |
| 7.6.3      | Varianser och medelvärden   | 86         |
| <b>7.7</b> | <b>Korrelationsanalys</b>   | <b>87</b>  |
| 7.7.1      | Samband mellan plan- och höjdavvikelse                                    | 87         |
| 7.7.2      | Samband mellan initialiseringstider och avvikelser i plan respektive höjd | 87         |
| 7.7.3      | Avstånd till närmaste referensstation                                     | 90         |
| 7.7.4      | Satellitförhållanden  | 92         |
| 7.7.5      | Kvalitetstal  | 95         |
| 7.7.6      | Autokorrelation   | 96         |
| <b>8</b>   | <b>DISKUSSION</b>   | <b>100</b> |
| <b>8.1</b> | <b>GPRS-täckning och tillgänglighet</b>                                   | <b>100</b> |
| <b>8.2</b> | <b>Jämförelse av mätkvalitet</b>  | <b>103</b> |
| 8.2.1      | Avvikelse i plan och höjd   | 104        |
| 8.2.2      | Initialiseringstider  | 106        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>8.3</b> | <b>Problematiske mätserier och autokorrelation</b> | <b>107</b> |
| 8.3.1      | Två exempel  | 107        |
| 8.3.2      | Autokorrelationen - orsaker och konsekvenser       | 112        |
| <b>8.4</b> | <b>Begränsande faktorer vid VRS-tillämpningar</b>  | <b>116</b> |
| 8.4.1      | Nätverksmodellering                                | 116        |
| 8.4.2      | Nätverkets utformning                              | 118        |
| 8.4.3      | Rovermottagare                                     | 119        |
| <b>8.5</b> | <b>Kvalitetstal och fältkontroll</b>               | <b>121</b> |
| <b>8.6</b> | <b>Kostnadsanalys</b>                              | <b>125</b> |
| <b>8.7</b> | <b>Internet och användandet av NTRIP</b>           | <b>126</b> |
| <b>9</b>   | <b>REFERENSER</b>                                  | <b>129</b> |

**BILAGOR:**

|   |            |
|---|------------|
| <b>I. KVALITETSVÄRDEN, SPRIDNINGSDIAGRAM OCH FÖRDELNINGAR</b> | <b>137</b> |
| <b>II. POSITIONSFÖRÄNDRINGAR</b>                              | <b>144</b> |

# Fältstudie av Internet-distribuerad nätverks-RTK

## 1 SAMMANFATTNING

Nätverks-RTK är en etablerad positionsbestämningsmetod med centimeternoggrannhet. Genom att utnyttja styrkan hos ett helt nät av fasta GNSS-referensstationer undviker man många av de problem som är förknippade med traditionell RTK-mätning. En viktig fördel är att de uppskattade felkällorna blir relevanta för hela nätverkets geografiska område och att avståndet mellan rovermottagare och närmaste referensstation därigenom kan ökas.

En vanlig standard för nätverks-RTK bygger på tvåvägskommunikation mellan rover och nätverkets driftcentral - där användaren i fält kopplar upp mot driftcentralen, som svarar med att sända korrektionsdata som modelleras fram för rovers ungefärliga position.

Sedan januari 2004 driver SWEPOS en nätverks-RTK-tjänst med GSM som distributionsteknik. Ett tänkbart alternativ skulle vara att istället förmedla nätverks-RTK-data via trådlöst Internet, t.ex. GPRS (*General Packet Radio Service*). Vinsten skulle uppnås genom lägre avgifter för användaren i och med att kostnaden bygger på överförd mängd data och inte uppkopplingstid som i fallet med GSM.

Syftet med det här examensarbetet var att inom ramen för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst jämföra de två distributionsteknikerna GSM och GPRS, framför allt med avseende på mätkvalitet, t.ex. noggrannhet och initialiseringstider. Fältstudien genomfördes i form av mätningar på sju välbestämda punkter i nätverkstriangeln Gävle-Söderboda-Östervåla, under varierande förhållanden. Totalt gjordes ca 600 mätningar med de båda teknikerna.

För att sköta kommunikationen av nätverks-RTK-data via GPRS/Internet användes det populära http-baserade protokollet NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*). Detta finns idag implementerat i SWEPOS-systemet och i flera GPS-mottagarfabrikat.

Resultaten visar att datadistribution med GPRS inte medför någon sämre positionskvalitet än befintlig GSM-distribution.

Noggrannheten uppskattades till 3 cm i plan och 5 cm i höjd på 95 %-nivån för båda distributionsteknikerna. Fältstudien gav dock en signifikant skillnad avseende initialiseringstider för de båda teknikerna. GPRS-mätningarna uppvisar större spridning än GSM-mätningarna på samtliga punkter, dvs. både kortare och längre tid till fixlösning, huvudsakligen beroende på lokala förhållanden, framför allt GPS-signalkvalitet och mobil täckning.

I områden med dålig mobil täckning var fördröjningen av korrektionsdata påtaglig, framför allt för GPRS-distributionen. Detta tros bero på att vissa Internet-protokoll för dataöverföring (TCP/IP) ibland fungerar bristfälligt över GPRS-nätverk, trots teoretiskt snabbare hastigheter än vid GSM-överföring.

Internet-distribution kan dock på sikt bli ett realistiskt alternativ till GSM för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst, förutsatt att vidare utveckling och utbyggnad av trådlösa nätverk sker i tjänstens täckningsområde. NTRIP-protokollet är särskilt flexibelt och kan utnyttjas över alla fasta eller trådlösa Internet-förbindelser. Andra fördelar med NTRIP är att standarden tillåter potentiellt många samtidiga användare och olika typer av GNSS-dataflöden.

## 2 ABSTRACT

Network RTK is an established method for real-time differential GNSS positioning with high accuracy. It avoids some of the problems with traditional single-station RTK, e.g. the decorrelation of systematic errors with increasing baseline length. A common strategy for network RTK applications is to use a VRS (*Virtual Reference Station*), which applies network corrections to a real set of reference station data and thereby mimics a reference station close to the rover receiver. This can be accomplished by two-way communication where the rover sends its approximate position to the control centre, which runs the network RTK service, and in return receives correction data, usually in the common RTCM format. The distribution method for VRS-based network RTK is usually GSM but other means of communication have been explored as well.

The continuing growth of the Internet, both in terms of size and applications, has led to an increasing interest from the GNSS-using community. This includes the pilot project EUREF-IP, which has spurred the development of an international infrastructure for distribution of real-time GNSS data via Internet. An important feature of this is the newly developed standard NTRIP (*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*) which supports the distribution of correction data via wireless Internet links using TCP/IP, for instance in GPRS (*General Radio Packet Service*) networks. The NTRIP concept includes different components: NtripSources (i.e. GPS reference stations) which delivers data via NtripServers to a NtripCaster (i.e. an Internet server/splitter), for further distribution in real-time to NtripClients (i.e. the RTK rover equipment).

Previous studies of Internet-distributed network RTK with NTRIP have largely focused on methodology. This work is mainly from an end-users perspective. It presents results from field tests conducted in SWEPOS<sup>TM</sup>, a permanent network of reference stations in Sweden that routinely distributes GNSS data for various commercial and scientific applications. This includes a network RTK service, which has been in full operation since January 2004 and was used during the tests.

The field measurements were done under various conditions in a sparse test net of seven points with well-known coordinates. The so called NtripClient in the field computer software was used to establish contact with the NtripCaster at the SWEPOS control centre. This was done via an external GPRS cell phone, with wireless Bluetooth communication between field computer and cell phone. After receiving VRS corrections the rover was able to fix the ambiguities and calculate a centimetre-level position.

The results show no obvious degradation in position quality for the NTRIP/GPRS option in comparison with the standard distribution via GSM. A horizontal accuracy of 3 cm and a vertical accuracy of 5 cm at the 95 % level were possible with both methods. A significant difference could however be seen in initialisation performance, due to local conditions. The Swedish GSM network (in which GPRS is implemented) covers large parts of the county, but with very uneven distribution of base stations, especially in rural areas. The countryside is also largely forested which further degrades GSM signal quality. The combination of these factors was found to cause rather large variations in latencies for the delivery of RTCM corrections to the rover, but most notably for GPRS. Hence we often experienced significantly longer initialisation times with GPRS distribution, and at some locations no fix solutions were obtained at all. This difference between GSM and GPRS performance is probably due to insufficient interaction between the TCP and the GPRS network characteristics, a notion which has not received much attention in previous studies of NTRIP-distributed network RTK via GPRS links.

The high flexibility of the NTRIP protocol in terms of possible data and distribution options nevertheless strengthens the argument for real-time Internet distribution of network RTK in the SWEPOS network. However, in order to be considered as a reliable alternative to current distribution forms, this will require better implementation of the TCP/IP protocols and further expansion of the national GPRS networks. Since GPRS is billed per data volume this could be beneficial for time-consuming applications (e.g. machine guidance), especially after the introduction of the more compact RTCM 3.0 format.

The problem of highly correlated measurements with large deviations from true positions was highlighted. Autocorrelated measurements are a somewhat disturbing feature of positioning in VRS-mode, which can make quality estimations quite difficult and will require further work to remedy. We make some preliminary suggestions for a quality parameter that could be used during field measurements with network RTK. Furthermore, NTRIP components could be modified for this purpose, e.g. to make redundant data links and quality parameters available via the NTRIP source table.

## 3 INLEDNING

### 3.1 Bakgrund

RTK (Real Time Kinematic) används för att göra noggranna GPS-mätningar i realtid. Tekniken kräver minst två GPS-mottagare som mäter på GPS-signalens bärvåg. Vanligtvis är den ena mottagaren (referensstationen) placerad på en punkt med känd position, medan den andra mottagaren (rovern) är rörlig och används för själva inmätningen. Om detta ska kunna utföras i realtid krävs en datalänk mellan mottagarna, t.ex. via radio eller mobiltelefoni.

Sedan slutet av 1990-talet har s.k. nätverks-RTK kommit att användas i allt större utsträckning. Till skillnad från traditionell RTK baseras nätverks-RTK på utnyttjandet av permanenta nätverk av referensstationer. Med hjälp av dessa kan man skapa RTK-korrekationer för rovers position och därmed reducera avståndsberoende fel. En vanlig metod för att åstadkomma detta är att skapa en "virtuell referensstation" som simulerar kort baslinje mellan rover och referens. Fördelen med nätverks-RTK är främst att användaren endast behöver en egen mottagare, samt att avståndet till närmaste verkliga referensstation kan ökas.

I Sverige driver Lantmäteriet ett rikstäckande nät av fasta referensstationer, SWEPOS® (se [www.swepos.com](http://www.swepos.com)), som bl.a. omfattar en nätverks-RTK-tjänst. I dagsläget täcker denna tjänst stora delar av södra och mellersta Sverige, och är under fortsatt utbyggnad. Hittills har SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst baserats på tvåvägskommunikation via GSM, men ett av flera tänkbara alternativ till GSM skulle kunna vara att överföra data via Internet, t.ex. genom att koppla en mobiltelefon med GPRS (General Packet Radio Service, en teknik för mobilt Internet) till mätutrustningen.

Detta skulle ha flera fördelar. Idag sker dataöverföringen vid nätverks-RTK uteslutande via GSM, vilket begränsar urvalet både ifråga om kostnad och tillgänglighet. Vid datadistribution via GSM får användaren betala per uppkopplad tid medan en GPRS-användare endast debiteras för överförd mängd data. Preliminära studier antyder att GPRS därför skulle kunna medföra lägre kostnader för användaren, särskilt med hänsyn till att det dataformat (RTCM) som normalt utnyttjas för RTK-tillämpningar blivit kompaktare. Dessutom finns idag en de facto-standard för överföring av GPS-korrektionsdata (t.ex. RTCM) via Internet: NTRIP - Networked Transport of RTCM via Internet Protocol.

## 3.2 Syfte

Det huvudsakliga målet med examensarbetet har varit att göra en kvalitativ jämförelse av två distributionstekniker för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. Dels nuvarande situation med datakommunikation via GSM, dels ett tänkt alternativ med datakommunikation via GPRS/NTRIP. Dessa jämförelser görs utifrån ett slutanvändarperspektiv där en kvalitetsbedömning omfattar följande frågeställningar:

- noggrannhet – hur noggranna samt hur precisa och/eller riktiga mätningarna är,
- tillförlitlighet – hur ofta mätningarna avviker från specificerad noggrannhet,
- kontinuitet – i vilken mån en viss mätnoggrannhet kan bibehållas över en tidsperiod,
- tillgänglighet – huruvida distributionstekniken är kommersiellt etablerad och täcker in hela det område som omfattas av nätverks-RTK-tjänsten,
- integritet – i vilken mån säker dataöverföring och tillförlitliga referensdata kan garanteras,
- kostnad – vilka investeringar i hårdvara/maskinvara och abonnemang som krävs, samt hur stor den rörliga kostnaden blir,
- användarvänlighet – huruvida tekniken kräver särskild expertis, stödfunktioner eller support,
- övriga tekniker – hur den studerade tekniken förhåller sig till befintliga alternativ när det gäller ovan nämnda kriterier.

De tre första frågeställningarna täcker in vad man skulle kunna kalla mätkvalitet och är förstas av största vikt för precis positionering. Analys- och resultatdelen av detta arbete fokuserar därför huvudsakligen på de uppmätta koordinaternas avvikelser från sanna värden, samt initialiseringstider, dvs. tid från påbörjad mätning till erhållen position med centimeternoggrannhet. Resultaten är dock beroende av den valda mät- och analysmetodiken och bör därför kompletteras med en mer utförlig utvärdering av felfördelning och faktorer som påverkar mätkvaliteten.

## 3.3 Metod och genomförande

Testmätningar genomfördes i Lantmäteriets testnät bestående av sju välbestämda punkter i Gästrikland och norra Uppland. Vid tidpunkten för fältstudien fungerade GPRS/NTRIP-tekniken bara för Trimble-mottagare, varför endast Trimble 5700-rover användes. Vid varje punkt utfördes ett antal parvisa mätserier bestående av tio separata mätningar för varje teknik. Mätningarna genomfördes vid



olika tidpunkter under olika dagar, för att minimera resultatpåverkande faktorer, t.ex. skiftande satellit- och atmosfärsförhållanden.

All insamlad data överfördes från fältdator till kalkylprogram där bearbetning av rådata och statistiska analyser av materialet skedde. Kvalitetsmått såsom medelavvikelse, precision och noggrannhet, samt resultatet av olika fördelnings- och korrelationsanalyser har därefter redovisats i diagram- och tabellform.

### **3.4 Disposition**

Rapportens inledande kapitel kan ses som en allmän introduktion till ämnet för studenter eller allmänintresserade inom mätningområdet. Kapitel 4 innehåller en översikt av GPS/GNSS, inklusive mät- och positionsbestämningsmetoder, felkällor och geodetiska referenssystem. Kapitel 5 beskriver bakgrunden till nätverks-RTK och tar bl.a. upp realtidshantering av nätverksdata, roverkommunikation och datastandarder, t.ex. NTRIP, samt aktuella exempel på Internetdistribuerad nätverks-RTK. Här presenteras också SWEPOS och SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst.

I kapitel 6 beskrivs förutsättningarna för fältstudien och det praktiska genomförandet, vilket inkluderar mätprocedur, utrustning och dataanalys. Kapitlet omfattar även beskrivning av fel- och kvalitetsbegrepp samt olika statistiska metoder som kan vara av intresse för kvalitetsanalys av GPS-mätningar.

I kapitel 7 presenteras resultat från fältstudien i form av kvalitetsmått och diagram som visar fördelningar och avvikelser för samtliga mätningar. Resultaten diskuteras och sammanfattas i kapitel 8. Diskussionen omfattar även en utvärdering av fältmätningsteknik och av de faktorer som påverkat resultatet, samt förslag till vidare studier på området. I bilagor återfinns punktspecifik redovisning av mätresultat.

### **3.5 Tidigare studier**

Datadistribution via Internet för realtidstillämpningar med GPS är en relativt ny företeelse. Olika tekniker för sådan dataöverföring har utvecklats och prövats i olika tillämpningar (se exempelvis Hada et al. 2000, Bock et al. 2003, Meng et al. 2004). Innan introduktionen av NTRIP-standarden har dock inte sådan distributionsteknik varit aktuell för kommersiellt bruk.

I Europa har utvecklingen kommit relativt långt. Exempelvis kan data nu levereras för produktionsmätning i realtid via NTRIP/Internet i många av de nationella referensnätverken. Sedan tidigare sker utsändning av data via trådlöst Internet från t.ex.

EUREF:s (European Reference Frame) permanenta nät i pilotprojektet EUREF-IP, som väntas leda till en Internet-baserad infrastruktur för realtidstjänster som täcker större delen av Europa (Weber et al. 2003).

En teoretisk förstudie av Peterzon (2004) vid Lantmäteriet i Gävle har behandlat principerna för Internet-distribution av korrektionsdata inom ramen för SWEPOS, vilket bland annat omfattade en testimplementering av NTRIP i SWEPOS-systemet, och den kan därför sägas ligga till grund för den här studien. De studier av Internet-distribuerad nätverks-RTK som hittills har genomförts är förhållandevis metodinriktade (befintliga exempel tas upp i kapitel 5.5). Det finns därför behov av fältstudier med tydligare fokus på mätkvalitet och andra frågor som kan vara aktuella ur ett användarperspektiv.

## 4 INTRODUKTION TILL GNSS

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) är ett samlingsnamn för satellitbaserade navigerings- och positioneringssystem, som även omfattar rymd- och markbaserade stödsystem för olika tillämpningar. Utvecklingen av satellitpositionering har varit omfattande sedan introduktionen av GNSS för över tjugo år sedan. GNSS utnyttjas idag inom en rad områden – från tidssynkronisering, farkostnavigation och positionsbestämning inom jordbruk, skogsbruk och samhällsbyggnad, till meteorologiska och geofysiska studier. I geodetiska sammanhang är syftet med GNSS huvudsakligen att möjliggöra global positionering i förhållande till ett konsistent markbundet referenssystem. GNSS omfattar följande satellitsystem:

- GPS
- GLONASS
- GALILEO

Det amerikanska GPS-systemet kommer här att beskrivas mest utförligt eftersom det i stor utsträckning har blivit synonymt med GNSS, och i praktiken är det enda av de tre som kan användas självständigt idag. I övrigt grundar sig mätmetoder, positionsbestämningsmetoder, felkällor m.m., som beskrivs i detta avsnitt, på principer som är gemensamma för alla GNSS.

### 4.1 GPS

Under 1970-talet utvecklade U.S. Departement of Defence det satellitbaserade navigerings- och positioneringssystemet NAVSTAR-GPS (Navigation System with Time and Ranging - Global Positioning System), i dagligt tal kallat GPS.

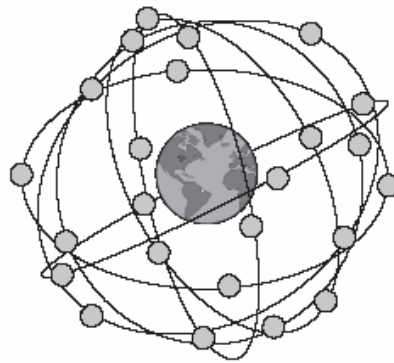
Systemet var till en början endast avsett för den amerikanska militären, men har så småningom blivit tillgängligt även för civila användare. Det används idag för många skilda ändamål, allt från enklare navigering med meternoggrannhet till geodetiska tillämpningar där en noggrannhet på centimeter- eller millimeternivå kan eftersträvas. Systemet kan utnyttjas utan användaravgifter.

GPS kan översiktligt delas in i tre delsegment; rymdsegmentet, övervakningssegmentet samt användarsegmentet.

#### 4.1.1 Rymdsegmentet

Rymdsegmentet består av minst 24 satelliter (i skrivande stund 30 stycken) som kretsar kring jorden i nästan cirkulära banor på en höjd

av ca 20 200 km. Satelliterna är fördelade längs sex olika banplan, med en inklinationsvinkel på 55 grader. Omloppstiden är knappt 12 timmar, vilket innebär att samma satellitkonfiguration upprepas ca fyra minuter tidigare varje dygn (U.S. Coast Guard 2003).



Figur 4.1: GPS-satelliterna är fördelade längs sex olika banplan (Leica geosystems 2003).

Systemet är utformat så att alltid minst fyra satelliter är tillgängliga över fem graders elevationsvinkel (höjd över horisonten) - oavsett var på jordklotet man befinner sig och oavsett tid på dygnet.

GPS-satelliterna sänder ut komplexa sammansatta signaler som består av två bärvågsfrekvenser som är modulerade med koder och satellitmeddelanden. ITU, FN-organet för radiokommunikation, har reserverat vissa frekvenser på L-bandet (1-2 GHz) för GNSS-tillämpningar. GPS-systemet utnyttjar detta för att med hjälp av atomklockor i satelliterna generera bärvågor i L-bandet för den sammansatta signalen. Bärvågorna är centrerade runt två frekvenser, L1 (1575,42 MHz, motsvarande en våglängd på ca 19 cm) och L2 (1227,60 MHz, motsvarande en våglängd på ca 24 cm). På dessa har s.k. PRN-koder modulerats (PRN = pseudorandom noise). Som namnet antyder består PRN-koderna av skenbart slumpvisa sekvenser av binära tal som används som tidsmarkörer för avståndsmätning (se kap. 4.4).

L1 är modulerad med en kod som civila användare har tillgång till, kallad C/A-kod (Coarse/Acquisition-code) samt en kod avsedd för den amerikanska militären och andra auktoriserade användare, kallad P-kod (Precise Code). På L2 finns endast den militära P-koden, men den kommer att kompletteras med en civil signal, L2C. Av säkerhetsskäl krypterar den amerikanska militären P-koden, vilken då kallas Y-kod. C/A-koden har en våglängd på ca 300 m och upprepas varje millisekund, medan P-koden har en våglängd på ca 30 m och upprepas efter 267 dagar. Varje satellit sänder unik kod.

Modulerat på bärvågen är dessutom ett satellitmeddelande med en överföringshastighet på 50 bitar per sekund. Meddelandet, som

sänds från varje satellit, består av information som krävs för att övervaka satelliterna och beräkna dess positioner. Detta omfattar funktionsstatus, banddata (även kallade efemerider) som används för positionsberäkningen, klockkorrektioner, uppskattad noggrannhet för längdmätning, och dessutom en s.k. almanacka med grova banddata för samtliga satelliter vilket underlättar signalspårningen i GPS-mottagaren.

| L1    | C/A-kod | P-kod |
|-------|---------|-------|
| 19 cm | 300 m   | 30 m  |
| L2    | L2C     | P-kod |
| 24 cm |         | 30 m  |

Figur 4.2: GPS-signalernas frekvens och våglängd (Engfeldt & Jivall 2003).

#### 4.1.2 Övervakningssegmentet

Övervakningssegmentet består av ett antal markbundna kontrollstationer som har till uppgift att övervaka och styra satelliterna. Kontrollstationerna är dels ett antal övervakningsstationer (i huvudsak placerade längs ekvatorn) som kontinuerligt registrerar satellitsignalerna, dels driftledningscentralen i Colorado Springs som beräknar och förutsäger banparametrar och klockkorrektioner utifrån dessa signaldata. Framräknade data sänds upp till satelliterna via markantennar och utnyttjas för att uppdatera satellitmeddelandet (U.S. Coast Guard 2003).



Figur 4.3: Övervakningssegmentet består av ett antal markbundna kontrollstationer (Leica geosystems 2003).

### 4.1.3 Användarsegmentet

Med användarsegmentet avses alla de GPS-mottagare som registrerar satelliternas signaler och tillåter användare att beräkna position, hastighet eller tid. Själva mätningen kan utföras på olika frekvenser, på kod eller bärvåg, eller som en kombination av dessa.

GPS-mottagare fungerar enligt följande princip: Antenn med tillhörande förstärkare tar emot signaler från satelliterna ovanför horisonten, och behöver alltså inte riktas mot signalkällorna som en parabolantenn. Signalerna är svaga och måste förstärkas innan vidare signalbehandling och registrering av observationsdata sker via mottagarens signal- och mikroprocessorer. Eftersom PRN-koderna är unika och har låg inbördes korrelation mellan satelliterna, så är signalerna relativt okänsliga för störning. Huruvida GPS-signalerna kan extraheras ur bakgrundsbruset beror därför huvudsakligen på mottagarens signalbehandling. Noterbart är att positionsbestämningen sker relativt antennens elektriska centrum, även kallat fascentrum, som vanligtvis inte sammanfaller med antennens geometriska centrum (se kap. 4.5.5).

Engfeldt & Jivall (2003) nämner ett antal faktorer som vanligtvis skiljer olika GPS-mottagare åt ifråga om prestanda:

- möjlighet att mäta på kod, eller både kod och bärvåg (se kap. 4.4),
- möjlighet att mäta på en eller två frekvenser,
- hur många kanaler som finns och hur dessa allokeras för signalmottagning,
- vilka positionsbestämningsmetoder den kan utnyttjas till (se kap. 4.6),
- vilka indataformat för relativ mätning i realtid som kan hanteras,
- antennens prestanda (t.ex. huruvida den har jordplan),
- signalbehandlingskvalitet.

## 4.2 GLONASS

GLONASS (Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema/Global Navigation Satellite System) är ett GPS-liknande system som byggts upp av det ryska försvaret, men som i dagsläget har för få satelliter för att kunna brukas på egen hand. Många GPS-mottagare kan dock ta emot även GLONASS-signaler som ett komplement till GPS-satelliternas signaler.

Systemet utarbetades under 1980-talet och den första satelliten sändes upp i oktober 1982, men det var först i september 1993 som GLONASS officiellt fick operationell status. Resursbrist har dock medfört att systemet periodvis haft svårt att fungera fristående. I maj 2005 fanns knappt 15 satelliter i drift (RFMD 2005).

Satelliterna är placerade i tre olika banplan på en höjd av ca 19 100 km. Varje satellit fullbordar ett varv runt jorden på 11 timmar och 15 minuter. Inklinationsvinkeln på 64,8 grader gör systemet särskilt intressant för tillämpningar på högre breddgrader (jfr GPS 55 grader).

Satelliterna sänder ut signaler av två olika typer: standard precision navigation signal (SP) vilken alla civila GLONASS-användare har tillgång till samt high precision navigation signal (HP). Varje satellit har dessutom sin alldeles egna frekvens (GIBS 2004). De utsända signalerna innehåller ett meddelande med banddata, tidsmarkering samt en almanacka som omfattar exempelvis satellitstatus.

Rymdsystemet övervakas från ett kontrollcenter i närheten av Moskva. Dessutom finns ett antal spårstationer alla placerade inom forna Sovjetunionen.

### **4.3 GALILEO**

Galileo är ett civilt europeiskt satellitsystem som utvecklas på initiativ av EU och ESA (European Space Agency). Uppskjutning av den första satelliten beräknas ske under 2005. Under 2006-2007 hoppas man få de resterande satelliterna i bana runt jorden samt färdigställa de markbundna kontrollstationerna. Från och med år 2008 ska systemet vara i drift (ESA 2004).

Galileo ska när det är fullt utbyggt bestå av 30 satelliter jämnt fördelade på tre olika banplan. Dessa kommer att ha en inklination mot ekvatorn på 56 grader. Satelliterna ska cirkulera runt jorden på en höjd av ca 23 616 kilometer och genomföra ett varv på 14 timmar.

Övervakningssystemet kommer att bestå av två kontrollstationer i Europa som har till uppgift att övervaka satellitkonstellationen. Utöver detta kommer ett antal spårstationer att finnas utplacerade runt jorden för att övervaka satellitsignalens kvalitet.

När Galileo så småningom är i fullt bruk kommer det att vara kompatibelt med både GPS och GLONASS, vilket innebär att en och samma mottagare kan registrera signaler från alla tre systemen. Detta medför många fördelar, t.ex. en markant ökning av antalet tillgängliga satelliter, som i sin tur leder till både bättre och säkrare positionsangivelser.

### **4.4 Avståndsmätning**

Principen för positionsbestämning med GPS är avståndsmätning mellan enskilda satelliter och GPS-mottagare. För absolut positionsbestämning krävs att avståndet från mottagaren till minst fyra satelliter samtidigt är känt. Att det behövs just fyra satelliter beror på att det finns tre obekanta positionsparametrar, två i plan

och en i höjd, samt en klockparameter att lösa. Den obekanta tidskillnaden uppstår som en följd av att satellitklockorna inte är helt synkroniserade med mottagarnas. Det finns två huvudsakliga sätt att mäta avstånd i GPS-systemet - via kod eller bärvåg.

#### 4.4.1 Kodmätning

I GPS-mottagaren skapas en kopia av den PRN-kod (C/A eller P) som sänds ut från satelliterna. Denna kopia kan sedan jämföras med koden som tas emot från satelliten. I och med att koderna är tidsmärkta kan då konstateras att den sistnämnda är fördröjd. Fördröjningen motsvarar den tid det tar för signalen att gå från satelliten till mottagaren, s.k. gångtid. Eftersom signalerna färdas med ljusets hastighet är det i princip möjligt att omvandla gångtiden till ett avstånd mellan satellit och mottagarantenn, dvs. genom att multiplicera tiden med hastigheten. Detta avstånd kallas pseudoavstånd därför att det innehåller fel som orsakas av att mottagarnas klockor aldrig är helt synkroniserade med satelliternas, samt att signalen färdas genom ett komplext medium - atmosfären. Matematiskt kan pseudoavståndet uttryckas som:

$$P = \rho + d\rho + c(dt - dT) + d_{atm} + \varepsilon_P$$

där  $\rho$  är det geometriska avståndet,  $d\rho$  är banfelet,  $c$  är ljusets hastighet,  $dt$  och  $dT$  är mottagarklockans respektive satellitklockans avvikelser,  $d_{atm}$  är atmosfärsfelet och  $\varepsilon_P$  är brus i kodmätningen som bl.a. inkluderar flervägsfel.

Kodmätning ger en noggrannhet på ett femtontal meter för C/A-koden och ett par meter för P-koden (Lantmäteriverket 1996).

#### 4.4.2 Bärvågsmätning

Bärvågsmätning innebär fasmätning på satellitens bärvåg, i GPS-fallet L1 eller L2 eller de båda samtidigt. Den bärvågssignal som tas emot från satelliten är fasförskjuten i förhållande till den bärvåg som genereras i GPS-mottagaren p.g.a. av den relativa rörelsen mellan satelliten och mottagaren. Kombinationen av dessa frekvenser kan fasbestämmas med hög noggrannhet. Eftersom bärvågen har kortare våglängd än PRN-koden så tillåter den potentiellt högre precision i avståndsmätningen. Problemet är att bärvågen saknar tidsmarkering vilket gör att gångtiden inte kan beräknas direkt. Vid bibehållen låsning av satellitsignalen till mottagaren kan däremot förändringen av antalet hela våglängder från den tidpunkt då mottagaren först låste på signalen räknas. Avståndet mellan satellit och mottagare kan således uttryckas som ett antal hela våglängder plus delen av en våglängd, dvs. fasen. Den observerade fasen kan då beskrivas enligt

$$\Phi = \rho + c(dt - dT) + \lambda \cdot N - d_{jon} + d_{trop} + \varepsilon_\Phi$$



där  $\Phi$  är den observerade fasen,  $\lambda$  är våglängden,  $N$  är antalet hela cykler mellan satellit och mottagare, och  $\varepsilon_\Phi$  är brus i fasmätningen. Atmosfärsfelet är här uppdelat i två komponenter, jonosfär och troposfär, eftersom jonosfären fördröjer kod men sprider bärvåg.

För noggrann avståndsmätning med bärvåg måste alltså antalet hela våglängder mellan satellit och mottagare när mätningen påbörjas bestämmas. Denna procedur brukar benämnas lösning av periodobekanta (eng. ambiguity resolution), vilket normalt sker via reducering av felkällor genom relativ mätning (se kap. 4.6.2) och statistisk analys. En enklare statistisk lösning på detta problem är den s.k. flytlösningen, som via t.ex. minsta kvadratmetoden ger antalet våglängder mellan satelliter och mottagare som ett decimaltal. För att kunna få den noggrannare heltalslösningen krävs förhållandevis avancerade metoder som inkluderar sökkriterier, lösningsoptimering och validering. En översikt av sådana metoder ges exempelvis i Kim & Langley (2000) och Wahlund (2002).

Bärvågsmätning ger en noggrannhet på några millimeter, förutsatt att periodobekanta kan lösas.

## 4.5 Felkällor

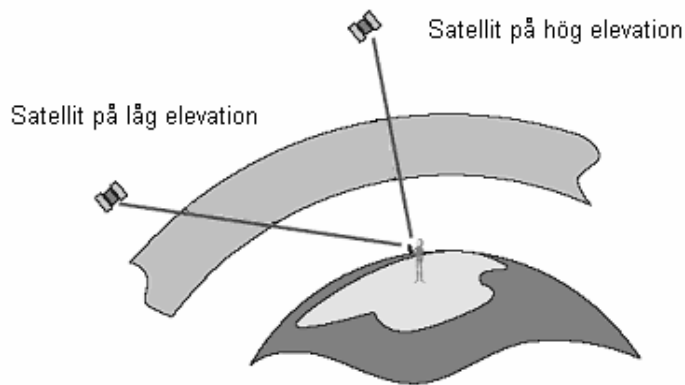
Det finns ett antal felkällor som påverkar kvaliteten vid mätning och positionsbestämning med GPS. Vissa kan reduceras och/eller elimineras med hjälp av olika positioneringsmetoder och/eller stödsystem, medan andra är svårare att göra något åt. Felen kan grovt delas in i tre kategorier: fel hos satelliterna, fel som uppstår på signalens väg från satellit till mottagare samt fel hos mottagarna. Här redovisas de vanligaste.

### 4.5.1 Atmosfärsstörningar

På sin väg mot jorden passerar GPS-signalerna jordens atmosfär, vilken påverkar signalerna på olika sätt. Atmosfären består av ett antal olika skikt, varav troposfären (ca 0-40 km höjd) och jonosfären (ca 50-1500 km höjd) är de två som har störst inverkan på signalerna (Leick 1995). Generellt kan man säga att signaler från satelliter på låga elevationer påverkas mer än signaler från satelliter som befinner sig högre upp. Detta beror på att signalen från en satellit lågt över horisonten färdas en relativt längre sträcka genom atmosfären (se figur 4.4).

#### 4.5.1.1 Jonosfären

Jonosfären är den del av atmosfären som innehåller joniserad luft (fria elektroner). När GPS-signalerna passerar jonosfären, som är ett



Figur 4.4: Signalen från en låg satellit färdas en längre sträcka genom atmosfären än signalen från en hög satellit (Leica geosystems 2003, bearbetad).

dispersivt medium, bryts de av och hastigheten påverkas beroende av frekvens. Bärivågen påskyndas medan koden blir fördröjd. Ett kodmätt avstånd blir alltså "för långt" medan ett bärivågmätt avstånd blir "för kort" (Hofmann-Wellenhof et al. 2001).

Hur stor påverkan jonosfären får på signalerna beror på den totala mängden elektroner längs signalens väg från satellit till mottagare. Detta beror i sin tur på solens aktivitet, årstid, tid på dygnet samt plats på jorden (Wahlund 2002). Det är solens strålning som frigör elektroner i jonosfären. Vart 11:e år går solen in i en fas kallad "solfläcksmaximum", då dess aktivitet är större än vanligt. Under denna period frigörs ovanligt mycket elektroner och detta påverkar GPS-mätningar negativt. Under norra halvklottets somrar befinner sig jorden längre från solen än under vinterhalvåret, därför är det lättare att mäta på sommaren än på vintern. På dagen när solen är framme ökas jonosfäreffekten, till skillnad från nätterna. Elektrontätheten i jonosfären är i allmänhet större kring ekvatorn och vid polerna än någon annanstans på jorden.

Eftersom jonosfärsfelet är frekvensberoende så utnyttjas ofta flera frekvenser vid mätning. Om både L1 och L2 används erhålls linjärkombinationer som bidrar till reduktion av felet. Enfrekvensmottagare måste lita på jonosfärsmodeller för att eliminera felet för längre baslinjer (avstånd mellan mottagarna). Jonosfärsfelen är lika stora för koden som för bärivågen, men har olika tecken.

#### 4.5.1.2 Troposfären

I troposfären utspelas vad vi i dagligt tal kallar för väder. När förhållandena i troposfären förändras, t.ex. när väderfronter passerar, påverkas signalutbredningen och därmed också avståndsmätningen med GPS. Denna påverkan sker ofta som en

kombination av signalfördröjning, signalförsvagning och korta fluktuationer (s.k. scintillationer) och är en funktion av variationer i temperatur, luftfuktighet, tryck och satellitens elevation.

Man brukar dela upp troposfären i en torr och en våt del. Ca 90 % av felen härrör ur den torra delen och ca 10 % ur den våta. Den torra delen är relativt lätt att modellera. Felen från den våta delen är däremot betydligt svårare att uppskatta eftersom mängden vattenånga ofta uppvisar stora lokala variationer. Ett flertal modeller finns dock för både den våta och den torra delen (se Hofmann-Wellenhof et al. 2001).

Felen visar sig genom att de mätta avstånden mellan mottagare och satellit blir längre än de verkliga. Kvävgas, syrgas och vattenånga fördröjer och böjer av signalerna, ungefär på samma sätt som ett prisma böjer en ljusstråle (Johansson 2001). Till skillnad från jonosfären är felen som uppstår när signalen passerar troposfären inte frekvensberoende. Bärvägen påverkas på liknande sätt som koden. Eftersom troposfärsfelen ej beror på signalens frekvens, kan de inte elimineras med linjärkombinationer (jfr jonosfärsrefraktionen).

#### **4.5.2 Banfel**

För att det ska vara möjligt att beräkna noggranna avstånd till en satellit är det viktigt att kunna bestämma dess position i det referenssystem som definierar GPS-systemet. För detta ändamål utnyttjas satellitmeddelandet där s.k. efemerider eller banparametrar ingår, dvs. information om var satelliten befinner sig (se kap. 4.1.2). Denna information uppdateras varannan timme och har ett medelfel på ca 2-3 meter. Det vi kallar banfel är alltså skillnaden mellan satellitens faktiska position och den ur banparametrar beräknade positionen.

För de flesta geodetiska ändamål räcker noggrannheten i utsända banddata. Om det ändå krävs större exakthet finns precisa banddata att tillgå. Här ligger medelfelet på ca 0,5 meter (Engfeldt & Jivall 2003). Precisa banddata beräknas i efterhand och tillhandahålls av bl.a. IGS (International GPS Service, se kap. 4.7). Dessa är således inte aktuella för realtidstillämpningar.

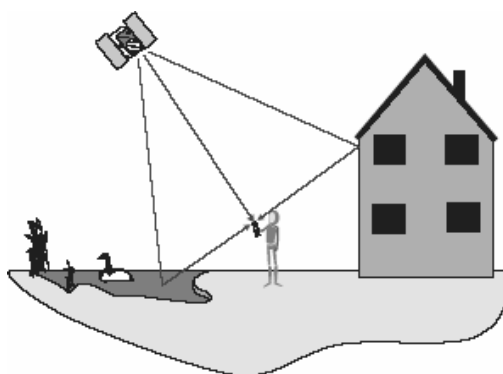
#### **4.5.3 Klockfel**

Satelliterna är utrustade med atomklockor som är oerhört exakta. Trots detta uppstår ibland små fel som påverkar noggrannheten i positionsbestämningen. Övervakningssegmentet ansvarar för att uppskatta och bevaka satellitklockornas fel. För de fel som upptäcks skickas korrektionsmodeller till användarna som själva korrigerar för det uppskattade felet. Även i mottagarna finns klockor vars fel måste

tas hänsyn till. Klockfel reduceras enklast genom enkel- och dubbeldifferenser (se kap. 4.6.2).

#### 4.5.4 Flervägsfel

Flervägsfel uppstår då GPS-antennen är placerad i närheten av något objekt eller material som GPS-signalen reflekteras/refrakteras mot. Effekten blir att signalen inte når antennen direkt, utan går via t.ex. en husvägg eller en blank vattenyta. Dess väg från satellit till mottagare blir längre än den borde vara. Det vanliga är att både den reflekterade signalen och den korrekta når fram till antennen och interfererar med varandra. Det kan också hända att endast den felaktiga signalen når fram på grund av att sikten är skynd till satelliten.



Figur 4.5: Flervägsfel uppstår då antennen är placerad i närheten av något material som GPS-signalen kan reflekteras mot (Leica geosystems 2003).

Flervägsfel är våglängdsberoende och av den orsaken påverkas bärvågen mindre är koden (Hofmann-Wellenhof et al. 2001). Det är även så att signaler från satelliter på höga elevationer inte reflekteras lika lätt som signaler från satelliter på låga elevationer.

Eftersom flervägsfel är den största icke-rumsligt korrelerade felkällan är det viktigt att beakta den. Inverkan av flervägsfel kan reduceras genom användning av antenner speciellt konstruerade för att minska risken för denna typ av fel. Dessa kallas på engelska choke ring antennas, och har ett antal koncentriska metallringar placerade runt själva antennerna, vilket hindrar att signaler med låg elevation når fram. Det säkraste sättet att undvika flervägsfel är att inte placera antennen i miljöer där det finns reflekterande ytor, vilket förstås kan vara praktiskt omöjligt i vissa sammanhang.

#### 4.5.5 Antenn- och mottagarfel

En antens elektriska fascentrum är den punkt till vilken satellitsignalen mäts. Denna sammanfaller inte nödvändigtvis med

antennens geometriska centrum, som vanligen är bestämd relativt en fysisk markering, t.ex. på antennens undersida (på engelska kallad ARP, Antenna Reference Point). Antennens fascentrum varierar systematiskt i förhållande till dess geometriska centrum, huvudsakligen beroende av satelliternas elevation och den inkommande satellitsignalens intensitet. Trots det är det svårt att modellera variationen eftersom den är olika stor för varje antenn och för olika typer av antenner. Dessutom är variationen olika stor för L1 och L2.

En antens tillförlitlighet bör baseras på hur stor denna variation är och inte nödvändigtvis på skillnaden mellan elektroniskt och geometriskt centrum. Den vertikala felkomponenten är vanligtvis den största och har därför särskild stor betydelse vid höjdmätning med GPS. Kalibreringsmetoder kan användas för att reducera antennfelet och för att skilja den från andra felkällor med liknande egenskaper, t.ex. flervägsfel. En enkel metod vid relativ mätning är annars att använda samma typ av antenn för en given baslinje (läs mer om relativ mätning under kap. 4.6.2).

En annan felkälla är brus som skapas i själva GPS-mottagaren under pågående mätning och signalbehandling. Detta gäller såväl kod- som fasmätning. Felet är i regel beroende av typ av GPS-mottagare och kan uppskattas genom mätning på samma punkt med två mottagare av samma modell. Även om denna felkälla är ganska obetydlig i absoluta tal så är den relativt svår att reducera.

## 4.5.6 Satellitkonfiguration

Vid GPS-mätning är det viktigt att de satelliter mottagaren mäter mot har en inbördes god geometrisk konfiguration, dvs. att de är väl spridda över himlen. Om så inte är fallet påverkas positionsnoggrannheten negativt. Det är även av stor betydelse att signalerna inte kommer från satelliter som står för lågt över horisonten eftersom det ger sämre signalkvalitet och mätnoggrannhet. Därför är en kompromiss mellan konfiguration och elevation nödvändig. Det är vanligt att satelliter på elevationer lägre än 10-15° sorteras bort vid mätning. Denna s.k. elevationsmask är dock godtycklig och kan väljas efter eget önskemål.

Det finns ett värde som beskriver satellitkonfigurationens bidrag till osäkerheten i en positionsbestämning, kallat DOP (eng. Dilution of Precision). Ju lägre värdet är, desto bättre konfiguration. Det förekommer ett antal olika DOP-tal:

- PDOP = Positional DOP
- VDOP = Vertical DOP

- HDOP = Horizontal DOP
- TDOP = Time DOP
- GDOP = Geometric DOP

Det kanske mest använda DOP-talet är GDOP eftersom det rymmer en kombination av alla faktorerna (två positioner i plan, en i höjd samt tiden). RDOP är ett mer sällsynt mått som används vid relativ mätning. Det beskriver satellitkonfigurationens inverkan på positionsnoggrannheten vid dubbeldifferensbildning, antingen för flyt- eller fixlösning. Det finns särskilda RDOP-tal för den vertikala komponenten, den horisontella komponenten osv. (som då benämns RVDOP, RHDOP etc.).

DOP-värden kan alltså beräknas för specifika satellitkonfigurationer. DOP-värdena förändras emellertid i takt med att satelliterna förflyttas längs sina banor. Satellitkonfigurationen går inte att påverka, den går dock att förutsäga utifrån satellitalmanackan så att planering av mätningar kan ske med hänsyn tagen till densamma. GPS garanterar minst fyra tillgängliga satelliter dygnet runt, var man än befinner sig på jordklotet. Denna garanti gäller emellertid bara vid fri sikt mot horisonten. Eftersom det vid många geodetiska tillämpningar krävs minst fem eller sex satelliter för en tillfredsställande positionsnoggrannhet kan det vara en god idé att studera en s.k. satellitprognos som visar tillgängliga satelliter vid olika tider på dygnet (t.ex. på SWEPOS hemsida). Därefter kan mätningarna förläggas till de tidpunkter då det finns tillräckligt många satelliter.

#### **4.5.7 Signalkvalitet och sikthinder**

Vid mätning är det viktigt att komma ihåg att omgivningens karaktär har betydelse för om mätningen ska lyckas eller ej. Är sikten skymd till satelliterna är det möjligt att signalerna inte når fram till mottagaren. Om t.ex. en byggnad blockerar sikten mot satelliten fås ingen kontakt alls. Om det däremot är vegetation som skymmer kan signalen nå fram till mottagaren, om än något försvagad.

### **4.6 Positionsbestämningsmetoder**

Det finns två grundläggande metoder för att bestämma positioner. Dessa två skiljer sig åt främst genom att de ger olika positionsnoggrannhet samt på det antal mottagare som krävs vid mätning.

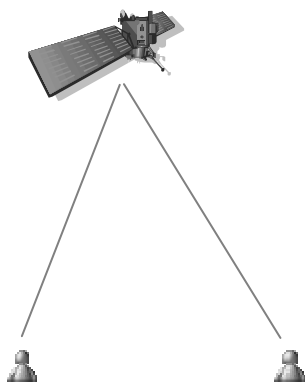
## 4.6.1 Absolut mätning

Vid absolut mätning registrerar en mottagare signaler från minst fyra satelliter. Positionen bestäms direkt i förhållande till satelliterna och det är nästan alltid kodmätning som används. Absolut mätning är en både snabb och enkel metod som därför är populär i t.ex. navigeringssammanhang. Den ger en horisontell noggrannhet på 10 meter eller bättre (Engfeldt & Jivall 2003).

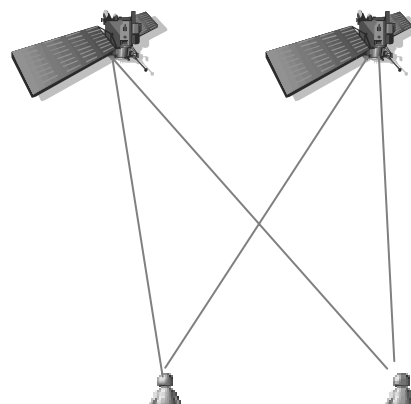
## 4.6.2 Relativ mätning

Vid relativ mätning används alltid minst två mottagare som samtidigt mäter mot åtminstone fyra gemensamma satelliter. En av mottagarna placeras över en punkt med känd position medan den andra placeras över den punkt man vill bestämma. Mätningarna sker relativt den kända punkten (se vidare under kap. 4.6.2.2 DGPS). Relativ mätning ger bättre noggrannhet än absolut mätning därför att det bildas differenser som reducerar de felkällor som kan tänkas förekomma.

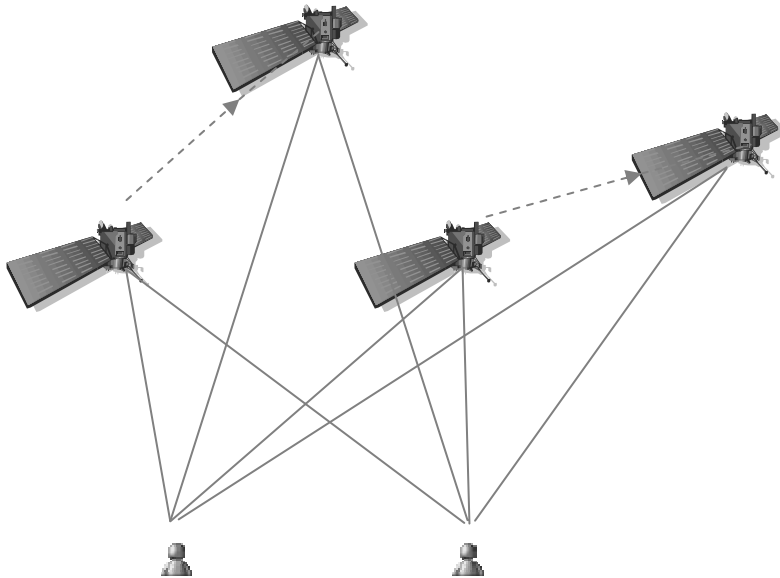
Enkeldifferenser (figur 4.6) används för att eliminera klockfel i satelliter och reducera banfel och lokala atmosfärsfel. Differensen fås antingen genom mätning från två mottagare mot en satellit, eller genom mätning från en mottagare till två satelliter. I det sistnämnda fallet kan mottagarens klockfel elimineras. Dubbeldifferenser (figur 4.7) är skillnaden mellan två enkeldifferenser. Efter dubbeldifferensbildning är både satelliternas och mottagarnas klockfel eliminerade. Det är vanligtvis den här metoden som används för att lösa s.k. periodobekanta.



Figur 4.6: Enkeldifferens mellan två mätningar (satellit-mottagare).



Figur 4.7: Dubbeldifferens är skillnaden mellan två enkeldifferenser.



Figur 4.8: Trippeldifferens är skillnaden mellan två dubbeldifferenser.

Trippeldifferenser (figur 4.8) är skillnaden mellan två dubbeldifferenser av mätningar gjorda under två närliggande epoker. Denna differensbildning eliminerar de flesta felen (inklusive periodobekanta) och används för att upptäcka period- och signalbortfall.

Både bärvägsättning och kodmätning kan användas vid relativ mätning, men den förstnämnda metoden ger bättre noggrannhet. Beräkningarna sker antingen i realtid eller i efterhand.

#### 4.6.2.1 Statisk mätning

Statisk mätning innebär att två eller flera mottagare ställs upp och står stilla under tiden som mätning pågår. För att det ska vara möjligt att bestämma periodobekanta måste satellitgeometrin hinna ändras, varför observationstider på minst tjugo minuter eftersträvas, gärna längre. Vid långa baslinjer måste mätningarna ibland pågå i flera dygn för att god noggrannhet ska uppnås. Beräkningarna genomförs alltid i efterhand.

Statisk mätning är den mätmetod som ger högst noggrannhet, från några millimeter till några centimeter, beroende på baslinjernas längd, beräkningsalgoritm och observationstid. En variant på statisk mätning är s.k. snabb statisk mätning. Denna metod har samma tillvägagångssätt men med kortare observationstider. Baslängder upp till 20 km kan beräknas efter ca 5-20 minuters mätning (Engfeldt & Jivall 2003). Metoden ger generellt lite sämre noggrannhet än "vanlig" statisk mätning.



#### 4.6.2.2 DGPS

DGPS står för Differentiell GPS och innebär att mottagarens position bestäms relativt en känd punkt. Metoden nyttjar relativ kodmätning i realtid på en frekvens, alternativt bärvågsunderstödd kodmätning. En mottagare placeras över en punkt med känd position. Denna referensstation beräknar skillnaden mellan den sanna positionen och den mätta positionen och omvandlar avvikelsen till korrektioner som skickas till den rörliga mottagaren (rovern). De fel som kan uppstå är jämförbara för närliggande mottagare och korrektionerna kan därför användas i ett område runt den mottagare som är placerad på den kända punkten.

I och med att positionsbestämningen sker relativt elimineras eller reduceras felkällor. Även om beräkningarna för det mesta sker i realtid finns möjligheten att utföra dem i efterhand. En fördel med realtidsmätning är emellertid att positionen fås direkt vilket innebär att man redan ute i fält kan kontrollera sina resultat.

DGPS ger en noggrannhet på meternivå beroende på om bärvågsunderstödd kodmätning används eller ej.

#### 4.6.2.3 RTK

RTK (Real Time Kinematic) innebär bärvågsmätning i realtid, dvs. att positionen erhålls direkt i fält. En referensstation etableras över en känd punkt. Denna registrerar signaler från satelliter samtidigt som en rörlig mottagare (rover) gör detsamma. För initialisering krävs observationsdata från minst fem satelliter, gemensamma för de båda mottagarna. Tre satelliter behövs för att bestämma koordinater i plan och höjd, en för tidsfelet samt en för överbestämning.

Från referensstationen sänds observationsdata via någon kommunikationslänk (t.ex. radio eller mobiltelefoni) till den rörliga mottagare för vilken man önskar bestämma positionen. Till skillnad från DGPS då endast korrektioner överförs, skickas vanligen observationsdata vid RTK-mätning (Johansson 2001). Observations- eller korrektionsdata översänds normalt i standardformatet RTCM som förstås av de flesta GPS-mottagare (se kap. 5.4.1). Beräkningarna sker sedan i realtid i rovern. För att centimeternoggrannhet ska kunna uppnås måste rovern initialiseras, dvs. lösa periodobekanta (se kap. 4.4.2). När så skett erhålls s.k. fixlösning. Hur snabbt detta kan ske är beroende av en rad faktorer, bl.a. satellitkonfigurationen, radiolänkens kvalitet, roverprogramvarans prestanda och avståndet till referensstationen.

Avståndet mellan referensstation och rover bör inte överstiga 10-20 km för att ge snabba och pålitliga fixlösningar. Detta beror främst på skilda atmosfärsförhållanden för de båda mottagarna på längre avstånd, men även på andra avståndsberoende faktorer såsom

banfel. Interna atmosfärsmodeller kan dock skapas för att reducera atmosfärsfelen.

Det finns några olika alternativ när det gäller val av referensstation. Ett alternativ är att etablera stationen i egen regi, antingen som en tillfällig vilken plockas ner när mätningen är avslutad eller som en fast monterad som alltid får stå. Ett annat alternativ är att utnyttja befintliga stationer i någon positioneringstjänst. En fördel med att använda permanenta stationer är att man själv endast behöver en RTK-utrustning istället för två (läs mer om detta i kapitel 5).

RTK ger en noggrannhet i plan på 1-2 cm och ca 1,5-2 gånger sämre i höjd (Engfeldt & Jivall 2003). RTK används t.ex. vid detaljmätning, förrätningsmätning, utsättning och maskinguidning.

## 4.7 Stödsystem

Idag används en rad mark- eller satellitbundna stödsystem för att underlätta och öka noggrannheten vid relativ GPS-mätning. I normalfallet rör det sig om fasta referensstationer, men i övrigt är de utformade för att motsvara de behov och krav som finns inom respektive användningsområde. Stödsystem finns för både kod- och bärvågsmätning och data distribueras både i realtid och för efterberäkning. I Sverige finns ett rikstäckande permanent nät av referensstationer för GNSS-tillämpningar, SWEPOS, som beskrivs utförligare i kap. 5.1.1.

IGS (International GPS Service) och EUREF:s (European Reference Frame) permanenta nätverk EPN är internationella stödsystem som används för efterbearbetning av GNSS-data. IGS är ett globalt nät bestående av ca 200 stationer som används för att samla in, arkivera och distribuera GNSS-data. Tillgängliga data omfattar t.ex. noggranna banddata, klockkorrektioner, atmosfärsdata och jordrotationsparametrar. Dessa utnyttjas i sin tur för en rad geodetiska och geofysiska tillämpningar, bl.a. realisering och underhåll av det internationella referenssystemet ITRF, studier av jordens rotation och deformation, och forskning kring klimat och atmosfär. EPN kan ses som en europeisk förtätning av IGS. Data i EPN bearbetas vid ett antal analyscentra och nya nätverkslösningar görs kontinuerligt tillgängliga via EUREF. Ett av dessa analyscentra drivs av Lantmäteriet inom ramen för NKG (Nordiska Kommissionen för Geodesi).

I Sverige distribueras data från SWEPOS via FM-nätet för DGPS-tjänsten EPOS, som drivs av Cartesia. För realtidspositionering med högre krav på noggrannhet finns SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst (se kap. 5.1.2). Det finns även internationella stödsystem för realtids-tjänster, t.ex. Omnistar och EGNOS som utnyttjar geostationära satelliter med GPS-transpondrar för att sända signal för avståndsmätning tillsammans med korrektions- och integritetsdata.

På grund av de låga elevationsvinklarna vid högre latituder så är dock Omnistar och EGNOS främst av intresse för användare i södra Sverige.

Andra exempel på markbundna stödsystem är AGPS (Assisted GPS) och s.k. pseudoliter, tekniker som båda är på frammarsch. AGPS baseras på integrerade GPS-mottagare och mobila radiomottagare som tar emot stödinformation från ett driftcentrum via valfri kommunikationslänk. Huvudsyftet är att förbättra positioneringen i traditionellt "svåra" miljöer, t.ex. i stadsmiljö eller inomhus. Pseudoliter (en förkortning av pseudo-satelliter) utgörs av GPS-referensstationer som sänder ut differentiella korrektioner på samma bärvågsfrekvens och med samma modulering som det nuvarande GPS-systemet. Detta innebär att pseudoliterna kan betraktas som "extra" satelliter som ger ökad täckning och bättre geometri utan behov av särskilda mottagare för referenssignalerna.

## **4.8 Referenssystem**

Punkter på jordens yta anges med koordinater vilka placeras i referenssystem. Ett fastlagt gradnät med en vald nollmeridian utgör ett referenssystem för positionsangivelser på jorden.

Det finns en mängd olika typer av referenssystem. Några konkreta exempel ges här nedan.

### **4.8.1 Internationella och nationella referenssystem**

Det finns både internationella och nationella referenssystem. De internationella referenssystemen är framtagna genom samarbetsprojekt på global nivå, medan de nationella utarbetas inom respektive land.

#### **4.8.1.1 ITRF 89**

I samband med satellitpositioneringens framväxt och ökande tillgänglighet har det blivit större efterfrågan på globala referenssystem. Globala referenssystem är väl definierade i förhållande till hela jordklotet. ITRF (International Terrestrial Reference Frame) är en samling internationellt utarbetade globala system. 1989 introducerades det första, ITRF 89 och alltsedan dess nyberäknas systemen med ett par års mellanrum.

#### **4.8.1.2 ETRS 89**

I Europa har ETRS 89 (European Terrestrial Reference System 1989) utvecklats av EUREF, vilket är en förtätning av ITRF-systemen.

### 4.8.1.3 SWEREF 99

Sedan början av 2000-talet används i Sverige det nationella referenssystemet SWEREF 99 (Swedish Reference Frame 1999). När det introducerades ersatte det SWEREF 93 och gjorde att vi fick ett standardiserat och internationellt certifierat system beräknat enligt EUREF:s normer. SWEREF 99 är en svensk realisering av ETRS 89 med god noggrannhet över långa avstånd. När SWEREF 93 utvecklades under början av 1990-talet fanns inga riktlinjer för hur beräkningar av koordinater i ETRS 89 skulle ske. SWEREF 93 var därför inte maximalt anpassat till senare framtagna europeiska system (Lantmäteriet 2001). SWEREF 99 har bättre överensstämmelse med våra grannländers system, som är ETRS-lösningar.

### 4.8.1.4 WGS 84

WGS 84 (World Geodetic System 1984) är ett globalt referenssystem konstruerat av amerikanska myndigheter för realtidsbestämning av koordinater med GPS. Det är grundat på satellit och gravitationsmätningar och var till en början helt fristående men är numera kopplat till ITRF-systemen (Ekman 2002). WGS 84 kommer med jämna mellanrum i nya versioner allteftersom ITRF förbättras.

I Sverige finns ingen egentlig realisering av WGS 84, utan vid GPS-mätning fås koordinaterna i SWEREF 99. Det skiljer inte mer än några decimeter mellan de båda systemen (Lantmäteriet 2004). De tre globala referenssystemen ETRS 89, WGS 84 och ITRF 89 sammanfaller inom någon meter.

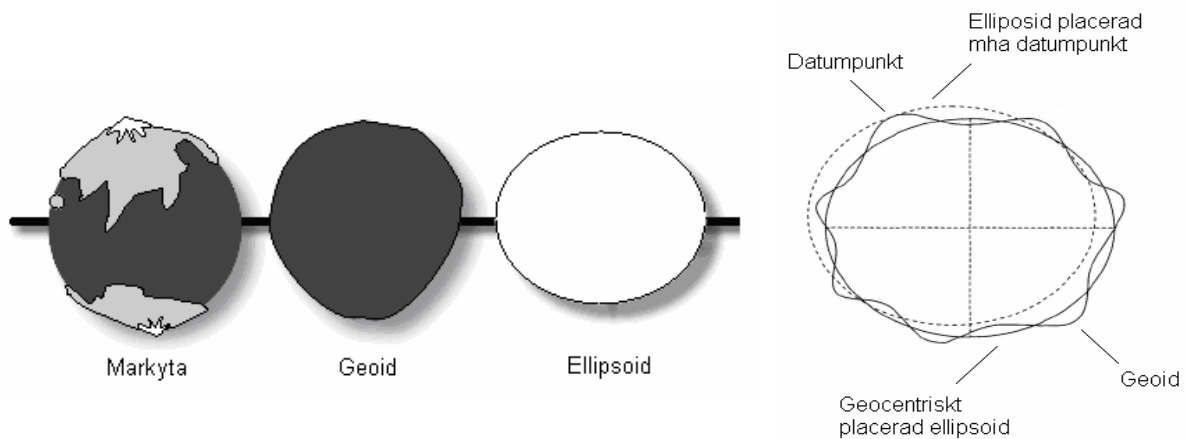
## 4.8.2 Modellering av jorden

Jordytan är en oregelbunden yta och om punkter ska kunna anges i referenssystem knutna till jorden måste jordytan på något vis approximeras. Det görs genom att modeller skapas som är så lika jordens form som möjligt.

### 4.8.2.1 Geoiden

Geoiden är en sluten men ojämn yta som omger hela jorden. Den följer i stort medelhavsytan och dess tänkta förlängning in under kontinenterna. Den är en s.k. ekvipotentialyta i jordens tyngdkraftsfält, dvs. den har samma tyngdkraftspotential överallt längs hela sin yta. Geoiden är i varje punkt vinkelrät mot lodlinjens riktning.

Genom mätningar av tyngdkraften kan geoiden beskrivas i en geoidmodell (geoidhöjdssystem). I Sverige används för närvarande en modell kallad SWEN 01L. (L:et berättar att modellen tagit hänsyn till effekten av landhöjningen).



Figur 4.9: Bilden t.v. visar markytans, geoidens och ellipsoidens form. T.h. syns en ellipsoid inpassad med hjälp av datumpunkt samt en geocentriskt placerad ellipsoid (Australian government 2004; Valdimarsson 2004, bearbetade).

#### 4.8.2.2 Ellipsoiden

Jordklotet är på grund av sin rotation en aning avplattat vid polerna och antar i det närmaste formen av en rotationsellipsoid. Ellipsoiden är alltså en matematisk definition av den verkliga jordytan (geoiden). Det finns många olika ellipsoidmodeller och val av sådan tillsammans med det sätt på vilket den passas in i förhållande till jorden, ger upphov till olika koordinatvärden för en och samma punkt på jordytan (Ekman 2002).

Vid satellitpositionering tillämpas geocentrisk placering av ellipsoiden vilket innebär att dess centrum förläggs till jordens masscentrum. Där är alla koordinatvärden noll och punkten tjänar som utgångspunkt för beräkning av alla tredimensionella positioner. Om det räcker att ellipsoiden stämmer väl överens med jorden inom ett begränsat område, väljs en specifik punkt, s.k. datumpunkt, där ellipsoiden fixeras mot geoiden.

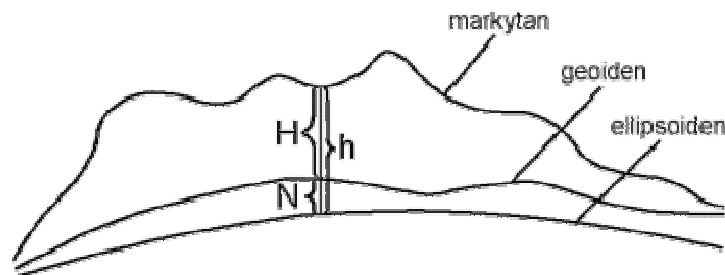
Knuten till varje referenssystem finns en specifik ellipsoidmodell. WGS 84 har en ellipsoid med samma namn och för SWEREF 99 gäller en benämnd GRS 80. Den är satellitbaserad och beräknad ur satellitbanor och antagen av IAG (International Association of Geodesy) som internationell ellipsoid (Ekman 2002). Dessa båda är nästan identiska med varandra.

#### 4.8.3 Höjder

Traditionella höjdsystem har en referensyta som nära sammanfaller med geoiden, dvs. mätta punkters vertikala komponent fås som en höjd över geoiden ( $H$ ), dvs. höjd över medelhavsnivån. GPS-mätning resulterar däremot i en punkts höjd över referensellipsoiden ( $h$ ). Det vanliga är dock att man vill uttrycka sina höjder i "höjd över geoiden", varför det krävs kännedom om differensen mellan geoiden och ellipsoiden, den s.k. geoidhöjden, ( $N$ ). I Sverige varierar

geoidhöjden mellan +20 och +38 meter, medan det i övriga delar av världen kan förekomma skillnader på upp till 100 meter då en global rotationsellipsoid används (Ekman 2002). Geoidhöjden blir känd genom att geoidens form modelleras i ett geoidhöjdssystem. Därefter kan beräkningen ske enligt:

$$H = h - N$$



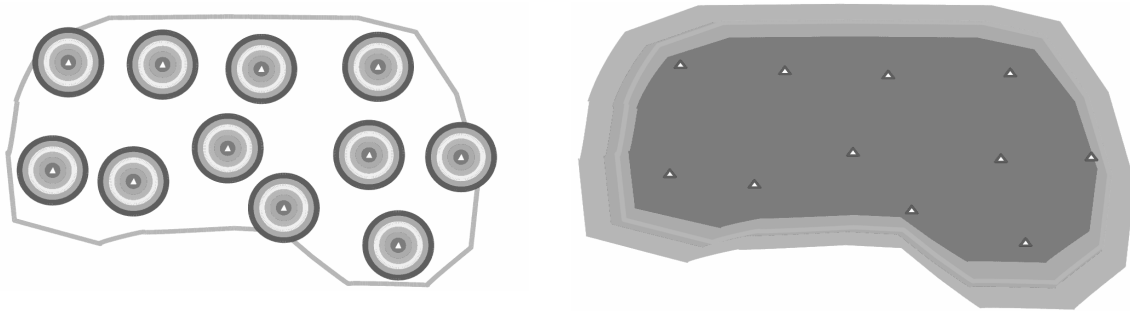
Figur 2.10: Samband mellan höjd över geoiden (H) och geoidens höjd över ellipsoiden (N) (Lantmäteriet 2004).

## 5 NÄTVERKS-RTK

Vid traditionell RTK etableras en GPS-mottagare som referensstation över en punkt med känd position och skickar observationsdata till en rörlig mottagare - en s.k. rover, ett förfarande som hädanefter kallas enkelstations-RTK (Jonsson & Nordling 2003). Nätverks-RTK är en teknik där data som förmedlas till rovern grundar sig på flera referensstationers observationer. Skillnaden gentemot enkelstations-RTK är främst att nätverks-RTK kompletteras med information om de felkällor som beräknats från hela (eller delar av) nätverket. Detta omfattar framför allt atmosfärsförhållanden som varierar i tid och rum, vilket gör att noggrannheten för korrektioner/observationer vid enkelstations-RTK snabbt blir sämre på ökande avstånd mellan referens och rover. I nätverks-RTK interpoleras atmosfärskorrektioner fram utifrån en modell, vanligen via en programvara vid en driftcentral som tar emot data från referensstationerna (se kap. 5.2 och kap. 6.1.1). Med hjälp av egna observationer och mottagna nätverksdata kan sedan rovern lösa periodobekanta och erhålla en position med god noggrannhet trots att avståndet mellan referensstationerna är uppemot 70 km, vilket är mycket svårt med enkelstations-RTK. För att kunna utnyttja en sådan tjänst krävs dock att användaren har ett abonnemang samt någon form av modem eller radiomottagare.

Att avståndet kan ökas så pass mycket är en av de största fördelarna med nätverks-RTK, men också att referensdata kan kvalitetskontrolleras fortlöpande. Nätverkets redundans gör det möjligt att upptäcka och eliminera fel, exempelvis sådana koordinatfel som uppkommer vid etablering av referensstation för enkelstations-RTK och som sedan fortplantas till roverpositionen. Andra fördelar är att nätverks-RTK ger ett sömlöst täckningsområde (se figur 5.1) och att användaren bara behöver tillgång till en mottagare och inte själv behöver etablera egen referens.

I kapitlet som följer beskrivs grundkomponenterna i ett fungerande nätverks-RTK-system, nämligen referensstationsnät, hantering av nätverksdata i realtid, standarder för dataöverföring av RTK-data, samt olika distributionstekniker. Dessutom ges en introduktion till NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) och Internet-distribuerad nätverks-RTK.



Figur 5.1: Schematisk bild av nätverksprincipens fördelar ifråga om noggrannhet, pålitlighet och tillgänglighet av data. Till vänster fristående referensstationer i ett godtyckligt område. Till höger samma stationer sammanlänkade i ett sömlöst nätverk med hög datakvalitet över hela området.

## 5.1 Referensstationsnät

De permanenta referensstationsnät som utnyttjas för nätverks-RTK är stödsystem bestående av tvåfrekvensmottagare som kontinuerligt förmedlar GNSS-data till en driftcentral, varifrån referensstationerna också övervakas och styrs. För dataöverföring krävs en fast förbindelse, som analoga eller digitala telefonlinjer. Syftet med referensnätverken är ofta flerfaldigt, t.ex. att erhålla data för navigation, underhåll av referenssystem, eller för geodetiska och geodynamiska tillämpningar. Exempel på en sådan infrastruktur är det svenska referensnätverket SWEPOS (se figur 5.2), som också omfattar en nätverks-RTK-tjänst.

Referensstationerna kan också användas var och en för sig. Ciceron, en tjänst för realtidspositionering med centimeternoggrannhet som fungerade enligt denna princip, fanns tillgänglig i ett fåtal svenska städer fram till 2002. Ciceron baserades på SWEPOS-data som distribuerades via DARC-kanalen i FM-bandet inom ca 20 km radie från referensstationerna. Detta gav ett icke sömlöst täckningsområde (se figur 5.1) och fördelarna ifråga om datakvalitet och täckning har medfört att allt fler nätverkslösningar utnyttjas i stödsystemen.

### 5.1.1 SWEPOS

SWEPOS är ett nät av permanenta referensstationer som täcker hela Sverige. Lantmäteriet står för drift och underhåll av SWEPOS, som har varit operationellt för navigering och positionsbestämning med meternoggrannhet sedan juli 1998.

Det huvudsakliga syftet med SWEPOS är att tillhandahålla GNSS-data för en rad olika tillämpningar och noggrannhetskrav. Detta omfattar bl.a. kontinuerlig övervakning av GPS-systemets integritet, förmedling av rådata för efterberäkning, och DGPS- och RTK-data för realtidsanvändning. Utöver detta tillhandahåller SWEPOS data



för studier av rörelser i jordskorpan samt meteorologiska och andra vetenskapliga undersökningar. Dessutom realiserar SWEPOS det nationella tredimensionella referenssystemet – SWEREF 99 (Jonsson et al. 2003).

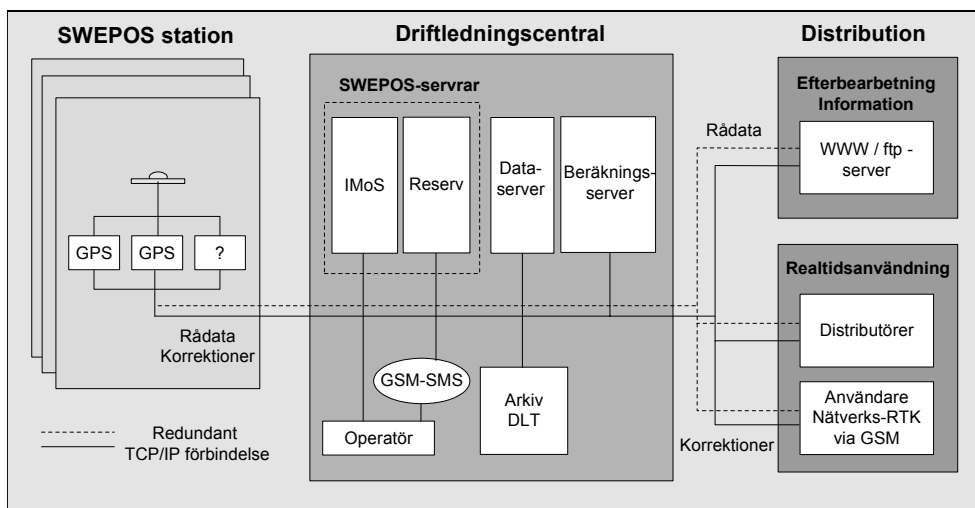


*Figur 5.2: SWEPOS-nätet, med namngivna fullständiga stationer (SWEPOS, 2004).*

I dagsläget omfattar nätverket 21 fullständiga stationer (se figur 5.2) och drygt 50 förenklade, men utbyggnad/förtätning pågår fortfarande. De fullständiga stationerna består av GPS-antenn monterad på en i berggrund väl förankrad betongpelare, samt av dubblerad utrustning för ökad datasäkerhet. De förenklade stationerna har ofta GPS-antennen monterad på en byggnad.

SWEPOS-stationerna är anslutna till driftledningscentralen på Lantmäteriet i Gävle via fasta telefonförbindelser där dataöverföringen sker med Internet-protokollen TCP/IP (se figur 5.3). Driftledningscentralen som kontinuerligt övervakar SWEPOS-nätet kontrollerar GPS-mottagare, backup-datorer, el och värme för samtliga stationer och samlar in data från nätet (Kempe 2004). Eftersom centralen har tillgång till all observationsdata i realtid kan man direkt utföra kvalitetskontroll och vidarebefordra data, t.ex. i form av RTK-korrekationer. Hanteringen av realtidsdata görs på två servrar där den ena är en s.k. "varm reserv", dvs. den kan ta över

hanteringen av realtidsdata om något fel skulle uppstå med den ordinarie servern. Data för efterberäkning lagras på en server som kan nås av användarna via FTP-server. Fullständiga nätutjämnningar av samtliga SWEPOS-stationer sker dagligen (Jonsson et al. 2003). Via stationerna i Kiruna, Mårtsbo, Borås, Onsala och Visby är SWEPOS anslutet till IGS-nätverket, samt till EPN-nätet där även stationerna i Vilhelmina och Skellefteå ingår (se kap. 4.7).

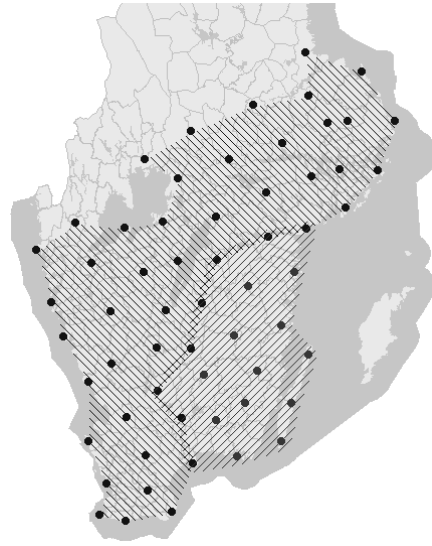


Figur 5.3: Systemskiss över SWEPOS.

## 5.1.2 SWEPOS nätverks-RTK-tjänst

I Sverige har den geodetiska infrastrukturen utvecklats sedan mitten av 1990-talet för att möjliggöra stödsystem för realtidstillämpningar som bygger på nätverks-principen, bl.a. genom regional förtätning av det ursprungliga SWEPOS-nätet (se figur 5.2), implementering av programvaror för nätverks-RTK samt utökad och förbättrad datakommunikation mellan referensstationer-driftcentral och driftcentral-realtidsanvändare. Mycket av detta har skett i samband med ett antal förstudie- och etableringsprojekt av nätverks-RTK-teknik på initiativ av Lantmäteriet (se Jonsson et al. 2003).

Sedan 1 januari 2004 driver Lantmäteriet en nätverks-RTK-tjänst med GSM som distributionskanal. Programvaran GPSNet används på SWEPOS driftledningscentral för att beräkna och distribuera nätverks-RTK-data till abonnenter på tjänsten, som kan utnyttjas överallt i de regioner där täckning finns. Användaravgifter bidrar till drift/underhåll och eventuellt överskott återinvesteras för förbättringar av tjänsten. Fortsatt utbyggnad sker i samarbete mellan olika intressenter, förutom Lantmäteriet även kommuner, statliga verk och konsultfirmor. Planerade etableringsprojekt omfattar bl.a. mellersta Sverige och Norrlandskusten.



Figur 5.4: Täckningskarta för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst inklusive det etableringsprojekt som pågår i sydöstra Sverige (SWEPOS 2004).

## 5.2 Nätverksprocess och felmodellering

Eftersom flera referensstationer används för att beräkna och interpolera atmosfärs- och banfel för rovers position, så krävs omfattande analys och bearbetning av observationsdata vid den driftledningscentral som är navet i stationsnätverket. Denna s.k. nätverksprocess omfattar validering av data och parametrisering av felkällor, t.ex. genom lösning av periodobekanta i nätverket för uppskattning av restfel mellan referensstationerna, samt beräkning av nätverkskorrektioner för överföring till rover. Exakt hur dessa steg utformas varierar mellan olika nätverks-RTK-system och är fortfarande föremål för omfattande forskning (Fotopoulos & Cannon 2001, Lachapelle & Alves 2002, Rizos & Han 2003).

För mjukvarusystemet som utnyttjas vid SWEPOS driftcentral ser denna process ungefär ut på följande sätt (Vollath et al. 2000, Trimble 2003b):

1. Först och främst utförs en omfattande kvalitetskontroll av rådata som består av pseudoavstånds- och bärvågsmätningar. Detta görs för varje referensstation och varje satellit. Bl.a. uppskattar man flervägsfel och klockfel och utesluter orimliga kodmätningar, s.k. outliers. Dessutom kan man upptäcka och reparera periodbortfall i bärvågsmätningen.
2. Efter detta utökas kvalitetskontrollen till alla baslinjer i nätverket genom enkeldifferensbildning. Satellitklockfel kan därmed elimineras och övriga felkällor reduceras. Genom

trippeldifferensbildning kan bärvågsobservationerna kontrolleras mot de periodbortfall som inte upptäcktes i första steget, vilket medför att outliers kan identifieras och uteslutas.

Differensbildningen gör att den specifika stationsinformationen går förlorad, men säkerställer att inga undermåliga data används i ett senare skede.

3. Efter att all data kvalitetskontrollerats utför nätverksprocessorn en global modellering av nätverksområdet. Syftet med detta är antingen att kunna skicka korrekationer för tillämpningar med lägre noggrannhetskrav eller att reducera felen tillräckligt mycket för att lösa alla periodobekanta i nätverket. I detta skede sker därför en uppskattning av jonosfärsfel, troposfärsfel och banfel.

4. Eftersom modelleringen görs utifrån odifferentierad data är det viktigt att periodbortfall, signalbrus eller liknande felkällor har tagits bort för att uppnå ett bra resultat. I vilken grad referensnätverket lyckas modellera felkällorna beror i hög grad på hur dessa är korrelerade i tid och rum. Normalt förutsätts åtminstone ett kortvarigt linjärt uppträdande.

5. Med hjälp av feluppskattningen kan periodobekanta lösas för baslinjerna i nätverket. Förbättringarna för varje baslinje kan därefter beräknas med hög noggrannhet och används för att generera s.k. nätverkskorrekationer i nord-sydlig respektive öst-västlig riktning för varje satellit och station. Detta görs dels för jonosfärsdelen och dels för den geometriska delen (dvs. troposfärs- och banfel, som uppvisar liknande egenskaper).

6. Nätverkskorrektionerna används sedan för att beräkna RTK-korrektioner för det lokala område rovern befinner sig i. Detta sker utifrån en viktad linjär interpolation av omgivande referensstationer. För att RTK-korrektioner ska kunna skickas krävs dock samtida observationer mot minst fem satelliter från minst tre referensstationer. Om fler stationer finns tillgängliga så kan beräkning av korrekationer ske med upp till sex stationer.

## 5.3 Principtekniker

Genom att använda ett nätverk av referensstationer kan man alltså modellera de systematiska felen i ett större område, och därmed reducera positioneringsfelen generellt i RTK-tillämpningar. Det finns idag två huvudsakliga tekniker som är i praktisk användning för att förmedla felkorrekationer till rovern:

1. Utsändning av korrektionsmodell
2. VRS – virtuell referensstation

### 5.3.1 Utsändning av korrektionsmodell

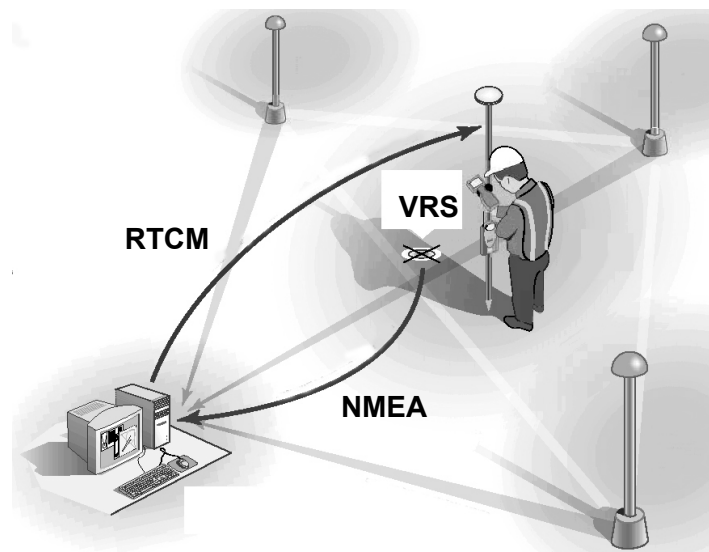
I detta fall förmedlas korrektionsdata och observationsdata för en referensstation via envägskommunikation till rovern och brukar därför benämnas Broadcast network RTK. Tekniken kallas även standard-nätverks-RTK eftersom utvecklingen av dataformat för RTK-korrekationer (se kap 5.4.1) huvudsakligen inriktats mot dylika lösningar (Talbot et al. 2002). Beräkning av korrektionsparametrarna sker vid driftcentralen och gäller för det område som definieras av referensstationerna. Denna teknik används t.ex. vid utsändning av s.k. områdeskorrektionsparametrar (FKP) i SAPOS-nätverken i Tyskland. Fördelarna med utsändning av korrektionsmodell i nätverks-RTK är bl.a. att man endast behöver kommunikationsutrustning med mottagarfunktion, vilket betyder att man kan använda andra tekniker än GSM och rent generellt minimera storlek, vikt och strömförsörjning på roversidan. Nackdelen är att beräkningsbördan läggs på rovern, som måste vara rätt utrustad för att kunna koda och interpolera nätverksdata. Utan effektiva standarder för dataöverföring (se vidare kap 5.4) så kräver detta mer avancerad rover-utrustning och programvaror (Landau et al. 2002, Talbot et al. 2002).

### 5.3.2 VRS - virtuell referensstation

VRS är den teknik som används för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. Till skillnad från nätverks-RTK med utsändning av korrektionsmodell bygger VRS-tekniken i normalfallet på tvåvägskommunikation. I detta fall sänder rovern sin ungefärliga position till driftcentralen som svarar med att skapa och skicka korrigerad RTK-data för den positionen (se figur 5.5). Detta görs genom att nätverksprogramvaran utför en geometrisk korrektion av närmaste referensstationsdata och därmed skapar en "virtuell station" på den insända positionen. Rovern kommer därför att uppfatta det som om observations- och korrektionsdata kom från en verklig referensstation bara några meter bort. Ett alternativ till tvåvägskommunikation som bl.a. har etablerats för ett byggprojekt i Göteborg (Norin 2005) är att explicit ange positionen för den virtuella stationen i programvaran, och därefter sända ut RTK-data med vanlig envägskommunikation (t.ex. via radio).

Viktiga fördelar med VRS-tekniken är att interpolation av korrekationer och motsvarande tunga beräkningar kan ske vid driftcentralen, samt att rover-utrustning ej behöver modifieras/uppdateras eftersom VRS-data har samma egenskaper som vanliga referensdata. Dessutom har VRS-tekniken ansetts bättre anpassad för kommersiella ändamål eftersom användaren kan debiteras vid uppringning till centralservern. Jämfört med utsändning av nätverks-RTK kan dock denna teknik innebära vissa begränsningar

ifråga om samtidiga användare av tjänsten (Talbot et al. 2002) samt svårigheter att kvalitetskontrollera den beräknade positionen.



Figur 5.5: Principen för positionsbestämning med VRS-teknik (Landau et al. 2002).

## 5.4 Datakommunikation

Relativ mätning i realtid kräver en fungerande kommunikation av observationsdata från referensstation till rovermottagare. Nätverks-RTK innebär dessutom att korrektionsdata måste överföras från driftcentral till rover med korta uppdateringsintervall för att kunna lösa periodobekanta och uppnå högsta noggrannhet. Detta medför höga krav på ändamålsenliga dataformat och distributionskanaler.

### 5.4.1 Standardformat

RTCM SC-104 (Radio Technical Commission for Maritime Services) är ett ASCII-baserat standardformat som utvecklats för att sända och ta emot meddelanden för relativa GPS-tillämpningar. De flesta mottagare är idag RTCM-kompatibla, vilket innebär att de vid RTK-mätning accepterar korrektionsmeddelanden via realtidskommunicerande länk (se 5.4.2), oavsett hur de genererades.

Rekommendationerna i denna standard fokuseras framför allt på definition av dataformat och meddelandetyper, samt ett användar-interface som ska kunna fungera med en rad olika distributionstekniker. I RTCM version 2.3, som utnyttjats i denna studie, så är exempelvis meddelandetyperna 18-21 definierade för RTK-tillämpningar. Dessa består av rena bärvågs- och pseudoavståndsobservationer respektive korrigerade bärvågs- och

pseudoavståndsdata. Därutöver används ibland meddelandetyperna 23 och 24 för att ge specifik antenninformation, vilket krävs för högsta noggrannhet (Trimble 2003b).

RTCM är huvudsakligen avsett för utsändning av korrektionsdata men kan även utnyttjas tillsammans med virtuell referensstation. Eftersom utsänd observationsdata för referensstation anges för VRS-positionen, så utnyttjas det tillverkardefinierade RTCM-meddelandet 59 för att sända koordinater för närmaste fasta referensstation. Detta meddelande används också för utsändning av FKP, s.k. områdeskorrektioner i SAPOS-standarderna.

Eftersom RTCM-formatet hittills ansetts vara relativt klumpigt så har enskilda tillverkare av RTK-utrustning utvecklat egna format för dataöverföring, t.ex. Trimbles CMR-format. RTCM-standarderna uppdateras dock kontinuerligt för att hållas a jour med ny forskning och teknikutveckling. Inte minst har detta stor betydelse för nätverks-RTK som bygger på utsänd korrektionsmodell eller rådata och därför kräver en kompakt datahantering (t.ex. Bock et al. 2003). Den senaste RTCM-versionen 3.0 har i stor utsträckning tillkommit som svar på önskemål från tillverkare och tillhandahållare av GNSS-utrustning och tjänster. RTCM 3.0 består huvudsakligen av meddelanden som stödjer RTK-tillämpningar, och i dessa utnyttjas knappt halva datamängden jämfört med tidigare RTCM-versioner (Hedling 2004). Meddelanden som stödjer RTK och nätverks-RTK med både GPS och GLONASS har inkluderats, och dessutom har arkitekturen i den nya standarden anpassats för att lätt kunna modifieras, t.ex. i samband med kommande civila frekvenser och introduktionen av GALILEO. Man utvecklar även meddelanden för pseudoliter och andra stödsystem med utsändning från fasta stationer eller geostationära satelliter i samma frekvensband som GNSS-satelliterna.

I detta sammanhang bör också NMEA-formatet nämnas. NMEA är en specifikation som definierar gränssnittet mellan olika delar av marin elektronisk utrustning. Eftersom GPS-mottagarnas kommunikation ursprungligen är definierad inom denna specifikation så sker idag mycket av datahanteringen för realtidspositionering i detta format. Exempelvis så används en s.k. NMEA GGA-sträng i VRS-tillämpningar för att skicka rovers ungefärliga position till driftcentralen (Trimble 2003b).

## 5.4.2 Distributionskanaler

Idag utnyttjas en rad tekniker för trådlös överföring av nätverks-RTK-data till roverbmottagare, inklusive

- Mellan- och kortvågsradio
- Mobiltelefoni, t.ex. GSM

- TV och digitalradio
- Satellittelefoni

När det gäller val av distributionsteknik så finns ett antal faktorer att ta hänsyn till. Till de mest grundläggande hör förstas diverse kostnader för investeringar, abonnemang etc. Distributionen måste kunna ske inom hela det område som täcks av referensnätverket. Användare i området måste dessutom kunna ta emot data på ett pålitligt sätt och med utrustning som är fältmässig och lättillgänglig. Överföringshastighet och eventuella fördröjningar i kommunikationen är andra viktiga faktorer att ta hänsyn till vid GNSS-tillämpningar i realtid med krav på hög precision.

Ultrafrekvensbandet (UHF) på 400-800 MHz har kanske varit vanligast förekommande i enkelstations-sammanhang. Traditionell radiolänkskommunikation dras dock med flera nackdelar enligt ovannämnda kriterier; kort räckvidd, dålig frekvensupplösning och en signal som lätt hindras på vägen av skog eller topografi. Ökad effekt vid utsändning ger längre räckvidd men restriktioner finns i de flesta länder avseende licensgivning. Repeatersystem kan användas för att öka räckvidden, men detta kräver i motsvarande grad ökad överföringshastighet. I praktiken saknar därför vanlig UHF-baserad radio nödvändig bandbredd för att kunna skicka RTCM-meddelanden på längre avstånd och samtidigt upprätthålla noggrannhet på centimeternivå (Liu 2004).

Som framgår av kap. 5.3 finns en koppling mellan principteknik och distributionskanal för nätverks-RTK, exempelvis tvåvägskommunikation för kommersiella tillämpningar med virtuell referensstation. GSM-mobiltelefoni har hittills varit den dominerande tekniken i detta sammanhang eftersom den i regel är utbredd och lättillgänglig. Som tidigare nämnts är också GSM den distributionskanal som utnyttjas för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst. GSM-täckningen kan dock inte garanteras i alla områden och dessutom är tekniken kostsam vid tillämpningar som kräver långa uppkopplingstider (Johansson 2004). På Lantmäteriet pågår därför utvärdering av alternativa distributionsformer.

Envägskommunikation via DARC (Data Radio Channel) i FM-bandet är en av de möjligheter som undersökts (Kempe 2004).

### **5.4.3 Internet och NTRIP**

I och med att Internet och mobila nätverk har vuxit i omfattning, med ökade överföringsmöjligheter och fler användare, så har trådlös Internet-distribuerad dataöverföring för RTK-tillämpningar allt mer kommit att ses som ett gångbart alternativ till existerande tekniker (Lenz 2004).



Ifråga om nätverks-RTK så innebär detta att observationsdata och korrektioner i form av RTCM- eller CMR-meddelanden skulle kunna levereras via Internet till rovern med hjälp av t.ex. GPRS. GPRS (General Packet Radio Service), som har använts i denna studie vid sidan av traditionell GSM-överföring, är en datapaketsbaserad service för mobil kommunikation som kan ses som föregångaren till UMTS, den tredje generationens mobila nätverk. I Sverige är GPRS tillgängligt via de befintliga GSM-näten. Fördelen gentemot GSM är att dataöverföringen sker i diskreta mängder vilket tillåter optimalt utnyttjande av bandbredd i mobilnätet. Eftersom kostnaden för GPRS-kommunikation baseras på överförd datamängd och inte uppkopplingstid så kan detta i förlängningen innebära lägre kostnader för användaren i förhållande till GSM. Detta gäller inte minst i och med övergången till den nya RTCM-versionen 3.0, eftersom datavolymen vid RTK-mätning möjligen kan reduceras upp till 2-3 gånger (Peterzon 2004, Hedling 2004).

Realtidsdistribution av GNSS-data via Internet är redan etablerat sedan några år tillbaka. Ett noterbart exempel är de globala DGPS-korrektioner från NASA som finns tillgängliga via Internet-server (Muellerschon et al. 2000). Den europeiska rymdstyrelsen ESA har nyligen utvecklat SISNet, en tjänst som gör det möjligt att erhålla EGNOS-meddelanden över Internet via trådlösa nätverk, t.ex. GSM/GPRS, utan behov av särskild EGNOS-mottagare (för översikt, se Torán-Martí & Ventura-Traveset 2004). Detta innebär att EGNOS kan utnyttjas av användare med tillgång till Internet oavsett yttre förhållanden, t.ex. vid skymmande sikt i stadsmiljöer eller vid låga elevationsvinklar.

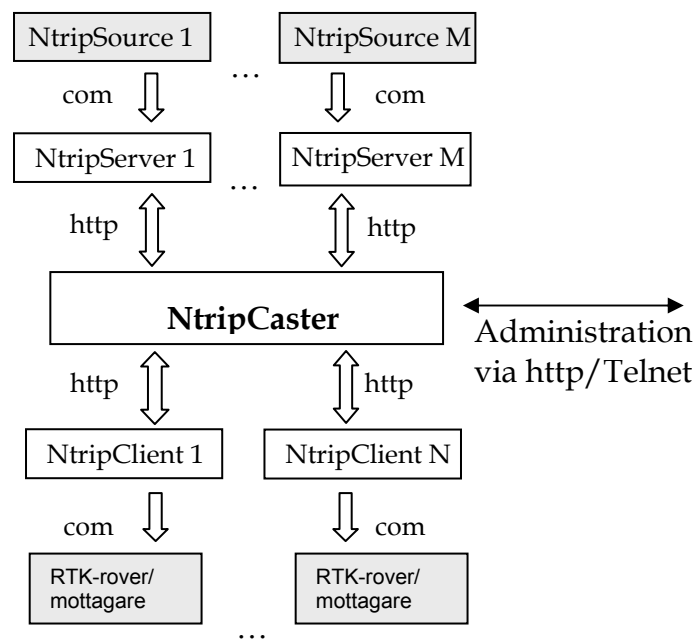
Överföring av RTCM-data via trådlöst Internet har också prövats framgångsrikt i en rad RTK-tillämpningar (Hada et al. 2000, Gao & Liu 2001, Liu 2004, Meng et al. 2004). Dessa studier har bl.a. visat på små fördröjningar vid överföring till rover, vilket är en kritisk punkt för att möjliggöra positionsnoggrannhet på centimeternivå. Bock et al. (2003) har exempelvis presenterat en Internet-baserad RTK-lösning, där en server/klient-konfiguration används för att överföra nätverksbaserad RTCM-data från valfria referensstationer via TCP/IP med olika mobila lösningar. Till skillnad från vanlig nätverks-RTK sker positionsberäkningen här i klientprogramvaran (t.ex. en handdator) dit alltså även rådata överförs från mottagaren.

Det är dock först i och med NTRIP-formatet som kommersiellt gångbar Internet-distribution av nätverks-RTK har etablerats på allvar. NTRIP (Networked Transport of RTCM via Internet Protocol) är ett http-baserat protokoll på applikationsnivå för överföring av GNSS-data, huvudsakligen korrektionsdata för relativa GNSS-tillämpningar. Den tyska kartmyndigheten BKG (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) har ansvarat för utvecklingen av NTRIP som ett projekt under EUREF (Lenz 2004, se vidare kap. 5.5).

Följande komponenter är utmärkande för NTRIP-systemet (figur 5.5):

- NtripSources, dvs. referensstationer som genererar GNSS-data.
- NtripServers, som överför data från en NtripSource till en NtripCaster.
- NtripCaster, den huvudsakliga systemkomponenten för datadelning och utsändning.
- NtripClients, som tar emot data från valfria NtripSources via NtripCastern.

Av dessa är NTRIP-protokollet implementerat i de tre sistnämnda, som alltså även är namnen på respektive applikation.



Figur 5.6: Generell arkitektur i ett Ntrip-system (efter Weber 2004).

En NtripSource är en eller flera GNSS-mottagare som kontinuerligt förmedlar data från en specifik plats eller känd position. Dataflödet behöver inte ske via TCP/IP redan från en NtripSource, men konvertering från seriell överföring till TCP/IP måste i så fall ske i den dator som GNSS-mottagaren är kopplad till.

För överföring av data till NtripCastern används en NtripServer, som i det "minimalistiska" fallet kan vara en mjukvara i en Internet-ansluten dator. NtripServern definierar ett ID för varje NtripSource som kallas monteringspunkt (eng. mountpoint). Detta innebär att

även en virtuell referensstation kan vara en NtripSource, även om data i det fallet kommer från ett nätverk av riktiga referensstationer. NtripServers ansluter till NtripCasters genom att sända en http-förfrågan med specifik information om monteringspunkt och lösenord, vilket måste accepteras av NtripCastern. En NtripServer kan ibland vara del av en NtripCaster-programvara, som i sådana fall endast behöver en funktion för mottagning av NtripClient-meddelanden (RTCM 2004).

NtripCastern är kommunikationsnavet i ett NTRIP-system. I grunden rör det sig om en http-server som är integrerad mellan datakällor och slutanvändare. Med andra ord tar NtripCastern emot data från NtripSources (via NtripServers) för vidarebefordring till NtripClients, som vanligtvis är applikationer i de handdatorer eller fältdatorer som används i roversystemet. Alla monteringspunkter hanteras i NtripCasterns s.k. källdatatabeller (eng. source table), som innehåller specifika attribut för ID, koordinater, dataformat (t.ex. RTCM), satellitsystem m.m. Källdatatabellerna kan dessutom innehålla information om nätverk av NtripSources eller andra NtripCasters. Genom att på det viset dela upp källdata i separata nätverk så underlättas hanteringen av förfrågningar, och det blir dessutom lättare för användaren att överblicka systemet. Via NtripCastern hanteras förutom monteringspunkter även lösenords- och betalningsrutiner (RTCM 2004).

En NtripClient får tillgång till källdatatabell från NtripCastern genom att sända en http-förfrågan till det specifika IP-nummer och reserverade port (vanligen standardport 80) som gäller för NtripCastern. Detta meddelande kan inkludera användaridentifikation (Peterzon 2004). Efter att källdatatabellen överförs till Ntrip-klienten kan sedan användaren välja en monteringspunkt, dvs. ett specifikt dataflöde i ett specifikt format. Detta görs genom ytterligare en http-förfrågan till NtripCastern. I samband med detta kan även en NMEA-sträng sändas vid VRS-tillämpningar (RTCM 2004). NtripCastern svarar sedan med att öppna dataflödet mellan vald NtripSource och NtripClient. Konvertering från TCP till seriell kommunikation av RTCM sker mellan NtripClient-programvaran och mottagaren, alternativt överförs data från mottagaren till klientprogramvaran för beräkning. Överföringen av RTK-data innebär relativt låg bandbredd i jämförelse med många andra Internet-tillämpningar, ca 5 kbits/s (Lenz 2004, Weber et al. 2004).

Ntrip baseras alltså på den vanliga http-standarden och kan anses som relativt lätt att implementera, även när begränsade server/klient-resurser är tillgängliga (Chen et al. 2004). Potentiellt sett kan alla GNSS-mottagarsystem som kan anslutas till Internet konfigureras för NTRIP. Eftersom NTRIP är ett applikationsprotokoll ovanpå TCP/IP så tillåts säker överföring via alla fasta eller mobila

IP-nätverk utan att hindras av brandväggar eller proxyservrar. TCP/IP har dessutom en fördel jämfört med andra protokoll för dataöverföring, nämligen att TCP-kopplingarna kräver bekräftelse av mottagen data. I fall av avbruten kommunikation mellan systemkomponenterna i NTRIP så skulle alltså dessa kunna konfigureras för automatiska återuppkopplingsförsök (Lenz 2004, Peterzon 2004). En eventuell nackdel är dock att TCP därmed medför långsammare dataöverföring och "överskottsdata" vid anslutning och fränkoppling av förbindelsen (Meng et al. 2004, Hedling 2004).

NTRIP-applikationerna är inte nödvändigtvis begränsade till överföring av DGPS/RTK-korrekationer utan kan i princip användas för alla typer av GNSS-data. I och med att inkommande data kan fördelas av NtripCastern så tillåts överföring till ett stort antal användare, samtidigt som NtripCastern fungerar som ett skyddande element för dessa data (RTCM 2004, Weber 2004). Utöver detta finns det mycket som talar för NTRIP i framtida RTK-tillämpningar. RTCM-kommittén accepterade i september 2004 NTRIP version 1.0 som standard för paketbaserad kommunikation av GNSS-data. Dessutom finns flera tjänster redan tillgängliga och flera tillverkare jobbar nu på att utveckla och implementera NTRIP i sina utrustningar och programvaror. Exempelvis kan Trimbles GPSNet och fäldator-mjukvaran Survey Controller, som användes i denna studie, hantera detta format. En lista över befintliga NTRIP-applikationer finns tillgänglig via BKG:s hemsida: [http://igs.ifag.de/index\\_ntrip.htm](http://igs.ifag.de/index_ntrip.htm).

## 5.5 Exempel på realtidstillämpningar med NTRIP

EUREF driver sedan 2002 ett pilotprojekt för att bygga upp och utveckla en infrastruktur för realtidstjänster på Internet utifrån ett urval av stationer i det permanenta nätverket EPN. En av målsättningarna är att utvärdera och stimulera användandet av NTRIP-teknologin. En tänkt tjänst för distribution av RTCM-korrekationer över Internet som baseras på NTRIP-standarden går under namnet EUREF-IP. Data från EPN-stationerna och andra nätverk (t.ex. IGS, WAAS, EGNOS och vissa av de tyska SAPOS-nätverken) skickas till EUREF-IP:s officiella NtripCaster för vidarebefordring till behöriga användare. Den tyska kartmyndigheten BKG är i dagsläget ansvarig för driften av EUREF-Broadcastern, som möjliggör spridning av data från några hundra referensstationer (NtripSources) till över tusen samtidigt uppkopplade användare (NtripClients). Testimplementeringar av länkade NtripCasters sker för närvarande på andra ställen i Europa. Tanken är att spridning av realtidsdata så småningom ska kunna ske på regional basis, vilket skulle innebära sömlös distribution med

kortare fördröjningar och delad arbetsbörda för driftcentralerna (Weber 2002, Weber et al. 2003, Chen et al. 2004).

I samband med utvecklingen av EUREF-IP har flera kvalitetsstudier utförts av BKG. Bland annat har man undersökt noggrannhet och fördröjningstider vid RTCM-överföring mellan Broadcaster-Client. Varken för DGPS- eller RTK-tillämpningar verkar positionsbestämningen påverkats negativt av trådlös dataöverföring. Dessutom har man inte kunnat se fördröjningar på mer än ett fåtal sekunder för Internet-överföring, oavsett om datadistribution skett inom Tyskland eller till andra länder. Slutsatsen från dessa studier har således varit att trådlöst Internet inte innebär någon försämrad mätkvalitet (Weber et al. 2004).

Grundkonceptet för EUREF-IP har hämtats från det tyska referensstationsnätet GREF som nu omfattar GREF-IP, en realtidstjänst för distribution av GNSS-data via Internet med NTRIP-protokoll. Vid BKG:s driftcenter i Frankfurt används GREF-data och Trimbles GPSNet-programvara för att generera RTCM-data för ett antal virtuella referensstationer som är spridda över Tyskland. Också utanför EUREF-IP finns sedan en tid en rad offentliga och privata institutioner som utnyttjar NTRIP för realtidsdistribution, t.ex. i det privata ASCOS-nätverket som ägs av Ruhrgas och i den tyska lantmäterimyndighetens SAPOS-tjänster (där dock NTRIP ännu inte är fastslagen standard).

Ett annat exempel är Schweiz där man nu kan erbjuda nätverks-RTK via Internet. Tjänsten swipos-GIS/GEO baseras på det permanenta nätverket AGNES och utnyttjar VRS-konceptet. GPRS-förbindelse över GSM-nätet via NTRIP har nu introducerats som alternativ distributionsform, där det huvudsakliga motivet varit förmodat lägre kostnader i och med det nya RTCM-formatet version 3.0. Förstudier med olika GPS-mottagare har även visat på kortare initialiseringstider för GPRS jämfört med GSM, huvudsakligen beroende på snabbare uppkoppling mot swipos-servern (Brem 2004).

Det välutbyggda schweiziska GSM-nätet har också utnyttjats i en intressant studie av Gontran et al. (2004); ett mobilt system för realtidskartering där NTRIP används för att överföra RTK-korrekationer från en referensmottagare som är kopplad till en server i ett lokalt nätverk. Konvertering av seriell data till TCP/IP sker först i servern. Med hjälp av GPRS-uppkoppling sker sedan överföring via Internet till den mobila rovern. Signalkvalitet och roverposition kan övervakas i realtid. Istället för RTCM-meddelanden användes här CMR-korrekationer för att begränsa bandbredden och därigenom undvika "stopp" i dataflödet.

Chen et al. (2004) har demonstrerat ett Internet-baserat RTK-system som utnyttjar NTRIP för utsändning av data via Internet-radio. En NtripServer med permanent Internet-anslutning användes för att

skicka referensdata (RTCM) från Finland via NtripCastern i Frankfurt och tillbaka till en GPS-mottagare i fält. Ett test med statisk mottagare visade en horisontell och vertikal noggrannhet på centimeternivå för kort baslinje. Man utförde även ett test med bilburen rover. Avsikten var för att undersöka hur GSM respektive GPRS uppförde sig vid höga hastigheter, och systemets tolerans vid användning av en instabil trådlös datalänk. Resultaten visade här en högre stabilitet för GSM-uppkoppling.

Det exempel som kanske är mest snarlikt befintlig studie är ett examensarbete som utförts vid tekniska högskolan i Mainz (Schöffel & Schneider 2004). Examensarbetet bestod i att realisera och praktiskt testa NTRIP utifrån ett användarperspektiv, samt att undersöka fördelar och nackdelar i jämförelse med GSM-användning. Fältstudien utfördes i SAPOS-nätverket i tyska delstaten Hessen genom simultanmätningar på samma rådata (dvs. med samma GPS-antenn) med två mottagare av samma modell. GSM- och GPRS-anslutningar användes för att ta emot RTCM-meddelanden av typ 20 och 21 med FKP-korrekationer i respektive mottagare. Mätningarna utfördes som 3-minutersobservationer i 12-timmar långa sessioner under olika veckodagar för att om möjligt kunna påvisa skillnader i datalänkens kvalitet, beroende på Internettrafikens omfattning. Resultaten av GSM- och GPRS-mätningarna uppvisade nästan identiska kvalitetsvärden med absolut och relativ noggrannhet på centimeternivå och likvärdiga tider till fixlösning med uppkopplingstiden inräknad. GPRS uppvisade dock en något högre misslyckandefrekvens, huvudsakligen p.g.a. brister i NtripClient/Caster-kommunikationen.

Slutligen bör här nämnas det examensarbete om distribution av GPS-data via Internet som tidigare utförts vid Lantmäteriet (Peterzon 2004). Denna studie omfattade en testimplementering av NTRIP och olika strategier för integration i SWEPOS-systemet utvärderades. Resultaten demonstrerade bl.a. NTRIP-standardens flexibilitet och att Internet-distribution på sikt kan väntas bli mer kostnadseffektivt än dagens system.

Kompletterande fältstudier måste dock utföras innan NTRIP/GPRS kan realiseras som alternativ till den befintliga datadistributionen (t.ex. i SWEPOS nätverks-RTK-tjänst), vilket därför är det viktigaste motivet till detta examensarbete.

## 6 GENOMFÖRANDE AV STUDIE

Jämförelsen av GSM- och GPRS-distribuerad nätverks-RTK har utförts inom ramen för det svenska referensstationsnätet SWEPOS, närmare bestämt dess nätverks-RTK-tjänst. Data för jämförelsen består av upprepade mätningar på punkter med känd position. I det här kapitlet beskrivs de specifika förutsättningarna för projektet, planeringen och genomförandet av fältmätningar, samt metoder för analys av mätdata.

### 6.1 Förutsättningar för test av nätverks-RTK

#### 6.1.1 Systemfunktion

Trimble Terrasats programvara GPSNet används i driften av SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst. GPSNet är ett s.k. modulärt applikationssystem där olika funktioner kan kombineras inom en gemensam plattform efter egna önskemål och behov. För VRS-tillämpningar så krävs exempelvis ett minimum av tre mottagarmoduler, en synkroniseringsmodul, en VRS-processormodul och en RTCM/VRS-generatormodul (Trimble 2003b).

Mottagarmodulerna kontrollerar normalt kommunikationen med referensstationerna och gör integritetskontroll av referensstationsdata. I SWEPOS sköts dock mottagarmodulernas uppgifter av den separata programvaran IMoS. Alla referensstationer är som tidigare nämnts anslutna till en router vid SWEPOS-driften via TCP/IP-förbindelser, vilket i teorin möjliggör ett obegränsat antal referensstationer där varje station har en egen IP-adress. GPSNet läser all referensstationsdata via IP-protokoll.

Via synkroniseringsmodulen vidarebefordras referensstationsdata till VRS-processorn, epok för epok. Modulen kan tillfälligt fördröja trafiken tills kompletta data från alla stationer anländer. Via synkroniseringsmodulen kan också specifika stations- och satelliturval konfigureras, vilket t.ex. kan vara aktuellt vid stationsunderhåll eller tekniska problem med vissa satelliter.

I VRS-processormodulen sker sedan atmosfärmodelleringen av SWEPOS-nätverket. Vid initialisering gör VRS-processorn beräkningar på baslinjerna mellan referensstationerna och modellerar systematiska fel (se kap. 5.2). Detta resulterar i nätverkskorrektioner för varje satellit och station, vilka sänds vidare via en RTCM-generator. Detta förutsätter samtidigt observationer av

minst fem satelliter från minst tre stationer. I den mån VRS-processorn inte lyckas eliminera felkällorna, främst på grund av icke-linjära fel från jonosfären, så kan restfelen uppskattas genom en s.k. integritetskontroll (Chen et al. 2003). Kontrollen görs genom att interpolera fram nätverkskorrektioner för en station från omgivande stationer och sedan jämföra resultatet med de "riktiga" korrektionerna (Trimble 2003b). För att minska arbetsbördan vid VRS-beräkningar så är SWEPOS-stationerna uppdelade i två nätverk, GPSNet-Nord och GPSNet-Syd.

RTCM-generatormodulerna används för att sända observationer, korrektioner och andra meddelanden till användare i realtid (i RTCM- eller CMR-format). I SWEPOS nätverks-RTK-tjänst utnyttjas VRS-tekniken. För att kunna använda en GPS-mottagare som RTK-rover måste den därför kunna sända in sin position via NMEA-meddelande, vilket i normalfallet sker via GSM-modem. Inkommande samtal tas emot av en accessserver via ett antal ISDN Multi-ledningar på SWEPOS-driften. Detta möjliggör ett stort antal simultana användare på samma telefonnummer. Efter att användaren har identifierats och godkänts så slussas mobilsamtalet vidare till GPSNet-Nord eller GPSNet-Syd beroende på roverpositionen, och därefter till en ledig RTCM-generator. Efter att ha bestämt vilken verklig referensstation som befinner sig närmast den ungefärliga roverpositionen så går RTCM-generatorn in i VRS-läge. I VRS-läget applicerar generatorn nätverkskorrektionerna till den närmaste referensstationens rådata efter att först ha transformerat den till VRS-positionen. Detta innebär att alla delar av observationsekvationerna som beror av mottagarpositionen måste korrigeras till ny position. Nätverkskorrektionerna kan liknas vid ett linjärt plan mellan restfelen för de omgivande referensstationerna där de specifika VRS-korrektionerna interpoleras fram i nord-sydlig respektive öst-västlig riktning beroende på rovers position. Den virtuella referensstationen kommer att bli kvar på samma position så länge rovern är i kontakt med SWEPOS-driften (Vollath et al. 2000, Trimble 2003b). Vid SWEPOS är dock GPSNet konfigurerat för att skapa en ny VRS-position om avståndet till den senast beräknade roverpositionen överstiger 5 km.

Rovern börjar därefter ta emot data i RTCM 2.3-format, meddelandetyper 18, 19, 23, 24 och 59 med specificerade uppdateringsfrekvenser. Meddelandetyperna 18 och 19 är "vanliga RTK-data", dvs. fas- och pseudoavståndsobservationer som i det här fallet motsvarar närmaste verkliga referensstation. Dessa data uppdateras en gång i sekunden. I GPSNet utnyttjas det tillverkarspecifika meddelande 59 för att sända koordinaterna för den verkliga referensstationen, samt jonosfäriska och geometriska korrektioner för varje satellit som har nätverkskorrektioner (enligt beskrivningen i kap 5.2). Eftersom korrektionerna appliceras på den



virtuella referenspositionen så kallas meddelandetyperna även för VRP. Uppdateringen av nätverkskorrektionerna sker ungefär var tionde sekund, vilket i de flesta fall är tillräckligt med tanke på de små atmosfärsvariationerna på den korta baslinjen mellan den virtuella positionen och rovern (Trimble 2003b).

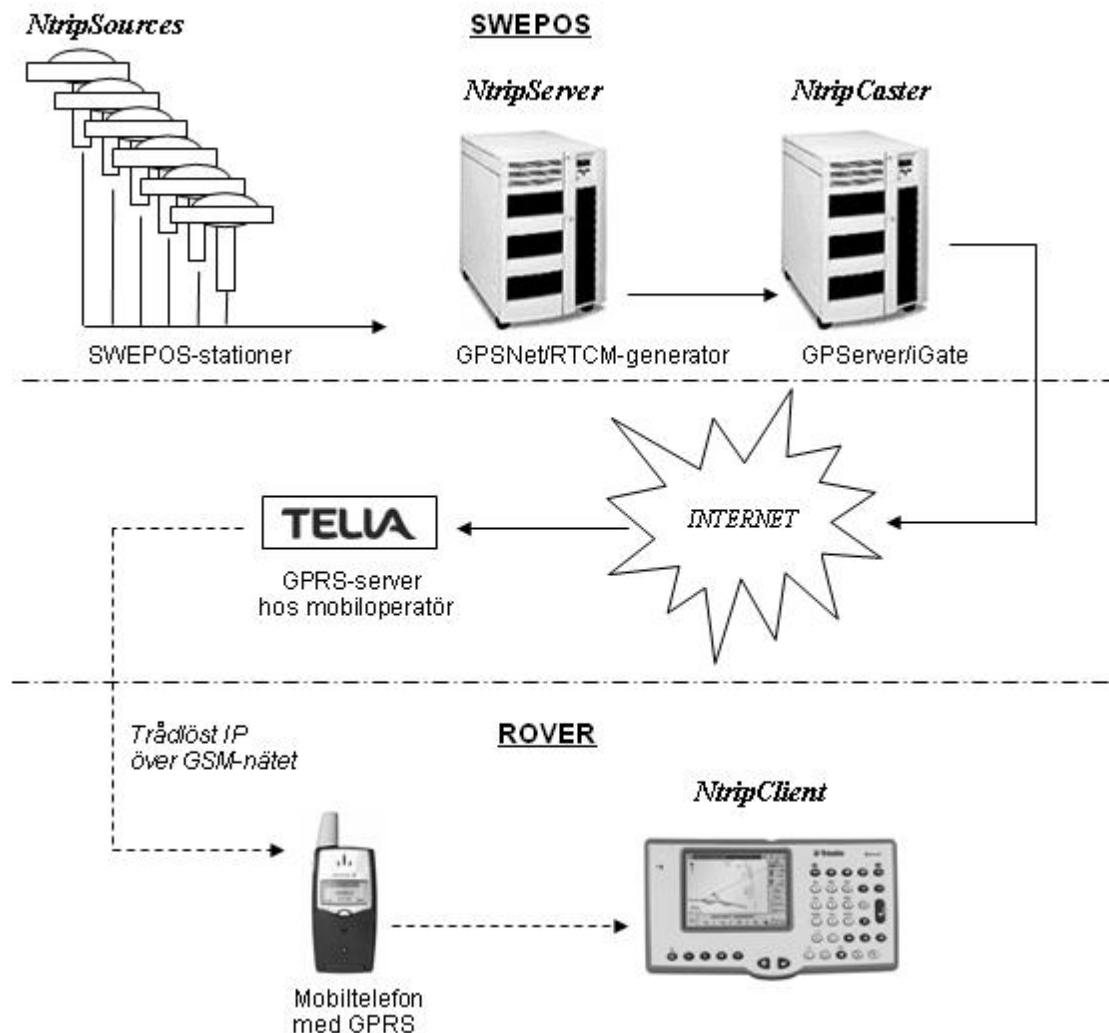
Det finns även möjlighet att komplettera dessa meddelanden med antennspecifik information (antennmodell- och satellitelevationsberoende korrektioner), meddelandetyper 23 och 24. Dessa meddelanden utnyttjades inte vid fältmätningarna men kan vara viktiga att ta hänsyn till om roverpositionen ska kunna bestämmas med millimeter-noggrannhet, särskilt vid stora fascentrumskillnader mellan rover och referens (Trimble 2003b).

## 6.1.2 Implementering av NTRIP

Peterzon (2004) har undersökt hur Internet-distribution av GPS-data skulle kunna ske inom ramen för SWEPOS, med fokus på NTRIP-protokollet och hur det skulle kunna användas för realtidstillämpningar som nätverks-RTK. Studien visade på olika förslag för integrering av Ntrip i det befintliga SWEPOS-systemet samt tänkbara lösningar för kommunikation mellan komponenterna i NTRIP-systemet. Bl.a. utfördes ett funktionalitetstest där BKG:s NtripCaster prövades tillsammans med olika NtripClient-alternativ. Det bästa alternativet med tanke på kontroll- och integrationsaspekter ansågs dock vara en lokal NtripCaster vid SWEPOS-driften, vilket också skulle medföra kortare och mindre oförutsägbara fördröjningar vid dataöverföring. Referensstationsdata är i dagsläget tillgängliga via TCP-förbindelser till en och samma dator och kräver inte nödvändigtvis transport via NTRIP från respektive station. Inga stora investeringar i hårdvara är därför nödvändiga, förutom en dator med NtripServer/Caster-funktion och en permanent Internet-uppkoppling. Dessutom finns redan en fungerande infrastruktur för kommunikation, i form av lokala nätverk och GPRS-täckning. En viktig slutsats var således att datadistribution via NTRIP kan implementeras inom det befintliga SWEPOS-systemet med relativt små medel (Peterzon 2004).

GPSTool är en web-programvara som normalt används för att administrera och distribuera arkiverade data via Internet, t.ex. observationsdata i RINEX-format för efterberäkning (detta inkluderar även VRS-data som går att generera i efterhand). Vid SWEPOS finns visserligen alternativa system för dessa ändamål, men man utnyttjar ändå en särskild GPSTool-modul: iGate. iGate kan beskrivas som en nod för kommunikationen mellan datakällor och användare via Internet. Den stöder protokoll som används för distribution, förfrågningar och hämtning av GNSS-data, och kan hantera samtida uppkopplingar från flera klienter. För

realtidstillämpningar kan iGate konfigureras att använda NTRIP. Via modulen sköts olika slags inställningar och administration, t.ex. av användaruppgifter. iGate-modulen fungerar med andra ord som en NtripCaster i SWEPOS-systemet (Trimble 2003a, Millner et al. 2004).



Figur 6.1: NTRIP-system för RTCM-överföring under fältmätningarna.

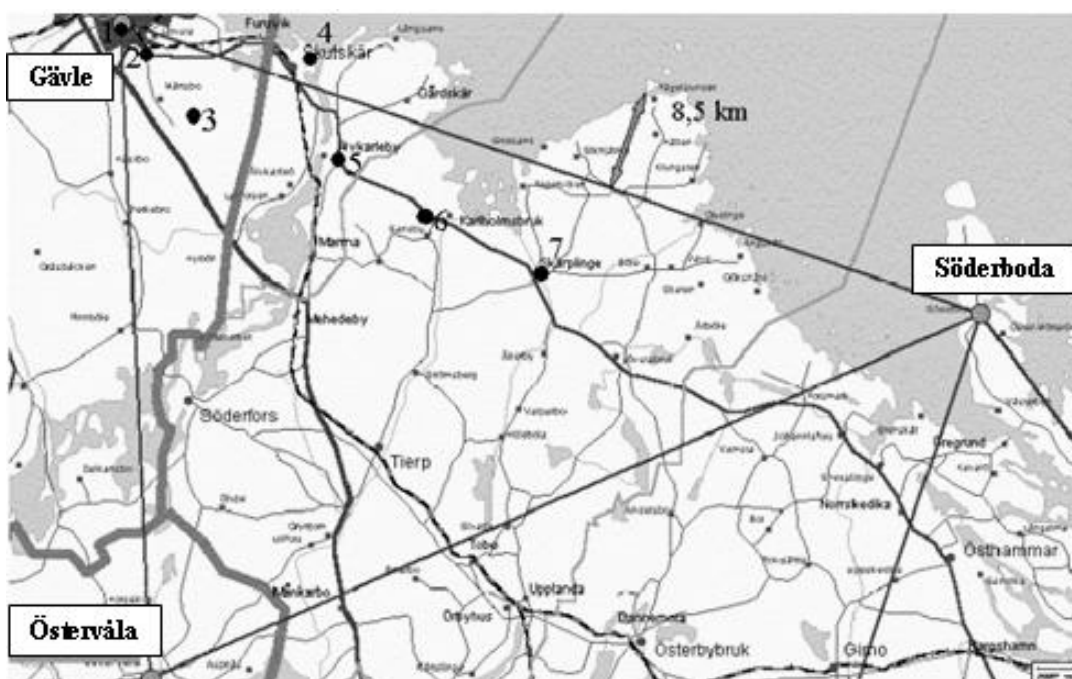
Under fältmätningarna var rovermottagaren kopplad till en fältdator med en NtripClient-applikation, som i sin tur kommunicerade med en mobiltelefon via Bluetooth. Andra lösningar vore också tänkbara, t.ex. där GPS-mottagarens maskinvara fungerar som NtripClient med Internet-kommunikation via ett inbyggt GPRS-modem.

Varje mätning med GPRS-tekniken inleds med uppkoppling mot SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst via mobilt IP (figur 6.1). Rover-systemets NtripClient, Survey Controller-mjukvaran i fältdatorn (se kap. 6.2), instruerar en mobiltelefon med GPRS-funktion att koppla upp mot Internet – vilket i det här fallet sker via Telias GSM-nät. Kommunikation mellan Ntrip-klienten och mobiltelefonen sker via Bluetooth-kommunikation. Inställningar för NtripCasterns IP-adress

och använd port är sedan tidigare inlagda i fältdatorn. När användaren identifierats och godkänts i iGate-modulen kan källdata tabell överföras till klienten i fält. Användaren väljer då en monteringspunkt som bl.a. definierar att VRS-data i RTCM 2.3-format från SWEPOS (med meddelandetyper och uppdateringsfrekvenser enligt kap 6.1.1) ska överföras till rovern. Monteringspunkten pekar mot IP-porten för den RTCM-generator som förmedlar nätverkskorrektioner från GPSNet-Nord. RTCM-generatorn fungerar alltså i detta fall som en NtripServer och VRS-generatorn, alternativt mottagarmodulerna, som NtripSources (Trimble 2003a). Överföring av RTCM-data sker därefter enligt figur 6.1, men behandlas i övrigt på samma sätt av rovern som vid vanlig GSM-överföring.

### 6.1.3 Testområde

Fältstudien utfördes genom upprepade mätningar på sju välbestämda punkter i Gävle-Älvkarleby-regionen (se figur 6.2). Dessa punkter befinner sig i nätverkstriangeln Gävle-Söderboda-Östervåla och har sedan tidigare etablerats av Lantmäteriet för test av nätverks-RTK (Engfeldt et al. 2003). Punkterna har lokaliserats på ökande avstånd från närmaste referensstation (ca 0, 4, 10, 17, 22, 28, respektive 36 km) för att möjliggöra undersökning av avståndsberoende för noggrannhet och initialiseringstid. Samtliga punkter är markerade i berg i dagen eller jordfasta stenar, och dessutom omgivna av relativt öppen terräng för att minimera sikthinder och flervägsfel.



Figur 6.2: Lantmäteriets testnät för nätverks-RTK i triangeln Gävle-Söderboda-Östervåla (Jonsson & Nordling 2003).

Koordinater (SWEREF 99) i plan och höjd för punkterna har bestämts via upprepade statistiska mätningar med geodetiska GPS-mottagare och högprecisionsantennerna, följt av efterberäkning med hjälp av SWEPOS beräkningstjänst (Engfeldt et al. 2003). Dessa punktkoordinater (se figur 6.3) antas vara felfria och utgör därmed referensvärden för noggrannhetsjämförelser och övrig statistisk analys.

| Punkt-nummer | Markering           | Latitud          | Longitud         | Höjd över ellipsoiden |
|--------------|---------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| 1            | Dubb i sten         | 60°39'55,35360'' | 17°07'47,50924'' | 44,593 m              |
| 2            | Spik i berg         | 60°38'57,53128'' | 17°11'35,46802'' | 47,456 m              |
| 3            | Spik i berg         | 60°35'41,71145'' | 17°15'27,79918'' | 68,106 m              |
| 4            | Rostfri dubb i sten | 60°37'43,54236'' | 17°25'53,67757'' | 30,330 m              |
| 5            | Rör i berg          | 60°33'21,02086'' | 17°28'30,48162'' | 46,580 m              |
| 6            | Rostfri dubb i sten | 60°32'07,90469'' | 17°34'28,03550'' | 40,474 m              |
| 7            | Rostfri dubb i sten | 60°28'25,81490'' | 17°45'21,00268'' | 34,374 m              |

Figur 6.3: Punktförteckning med koordinater i SWEREF 99 över testnätet för nätverks-RTK (Norin 2004).

## 6.2 Utrustning och mätmetod

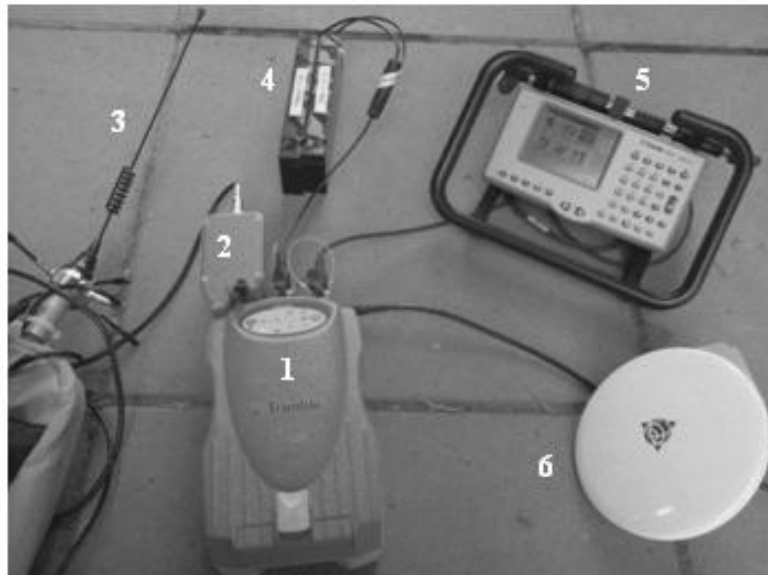
Den RTK-utrustning som användes i fältstudien kan anses som typisk för mätningar i produktionssammanhang, med undantag för det stativ som användes för noggrann centrering. När fältstudien inleddes fanns Ntrip bara implementerat i Trimble-mottagare, men andra fabriker (t.ex. Leica och Topcon) har sedan dess introducerat Ntrip-klienter för Internet-distribution av RTCM-data till GPS-mottagare.

Följande utrustning användes vid mätningarna:

- Trimble 5700 geodetisk GPS-mottagare användes som RTK-rover. Mottagaren har en specificerad mätnoggrannhet på  $\pm 10$  mm + 1 ppm horisontellt, respektive  $\pm 20$  mm + 1 ppm vertikalt för RTK-tillämpningar (Trimble 2004). Tillhörande GSM-modem kan lätt anslutas till GPS-mottagaren som tillsammans med externa batterier transporterades i ryggsäck. Kopplad till GPS-antenn och fältdator enligt figur 6.4.
- Ericsson T39 användes för Internet-uppkoppling och dataöverföring. Mobiltelefonen måste därför vara utrustad med GPRS, samt Bluetooth för trådlös kommunikation med fältdatorn. Bluetooth har en tillverkarspecificerad räckvidd på 10 meter men visade sig under mätningarna vara ytterst

riktnings- och avståndskänslig, antagligen beroende på Bluetooth-kortets placering i fältdatorn. Mot slutet av fältperioden gick T39:an sönder, varför den byttes ut mot en Ericsson 610.

- Trimble ACU (Attachable Control Unit) fältdator har ett Windowsbaserat operativsystem med programvaran Survey Controller (version 10.72 användes i studien) och inbyggd Bluetooth-teknik för trådlös överföring. Survey Controller användes för att styra mätningarna och lagra mätdata. Dessutom definierades mätprofiler för att göra specifika roverinställningar för respektive teknik (GSM/GPRS), t.ex. avseende utsändningsformat, telefonnummer till SWEPOS och IP-adress för NtripCastern. Från Windows-kontrollpanelen gjordes nödvändiga inställningar för Bluetooth-kommunikation mellan fältdatorn och mobiltelefonen.
- Trimble Zephyr-antenn, som centrerades med hjälp av trefot och stativ. Antennhöjden mättes som avståndet mellan markerad punkt och översidan på antennens jordplan. Inställningar i ACU:n korrigerar detta till faktisk antennhöjd (vertikalt avstånd till fascentrum). Trefotens optiska lod kontrollerades och uppfyllde HMK:s krav på ett centreringsfel mindre än 1 mm.



*Figur 6.4: Mottagarsystem för nätverks-RTK med GSM-överföring: GPS-mottagare (1) med GSM-modem (2), GSM-antenn (3), externa batterier (4), ACU/fältdator (5) och GPS-antenn (6). För GPRS-överföring utnyttjades mobiltelefon med Bluetooth istället för GSM-modemet.*

Varje fabrikat av GPS-mottagare har specificerade interna kvalitetstal som är mått på positionsnoggrannheten vid mätning. Dessa kvalitetstal beräknas utifrån faktorer så som satellitkonfiguration och GPS-signalens kvalitet. Gränsvärden för mottagarens kvalitetstal ställdes in i mätprofilerna. Värdena 3 cm horisontellt och 5 cm vertikalt valdes, vilka ansågs rimliga för att undvika grova fel, t.ex. vid felaktiga fixlösningar. Elevationsmask för satelliter sattes till 13 grader. Dessutom ställdes krav på att fixlösningen skulle baseras på minst sex satelliter för godtagbar överbestämning av positionen.

Ett stort antal mätningar bör eftersträvas eftersom det ökar möjligheterna att lokalisera grova eller systematiska fel (se kap. 6.4.1). För att jämföra de två distributionsteknikerna bör även förutsättningarna ifråga om mottagarförhållanden, instrumenthantering, tidsaspekter osv. vara likvärdiga. Det bästa sättet är att använda två GPS-mottagare och utföra simultanmätning på samma rådata via en antensplitter. För detta gjordes försök att låna in en extra GPS-mottagare, dock utan resultat så mätningarna genomfördes med en GPS-mottagare. Kortast möjliga tidsrymd eftersträvades därför mellan mätningar med de två teknikerna för att minimera skillnader i satellit- och atmosfärsförhållanden.

Mätningarna utfördes enligt följande:

- Centrerung av GPS-antenn över känd punkt och mätning av antennhöjd,
- Tio mätningar med GSM eller GPRS. För varje påbörjad mätning klockades tiden från uppringning till erhållen flyt- respektive fixlösning. Om uppkopplingen misslyckades räknades ej detta som mätning. Lagring av koordinater för varje fixlösning i SWEREF 99 skedde i ACU:n som ett medeltal av koordinatvärden avlästa under tre sekunder. Satellitantal och internt kvalitetstal protokollfördes. Mottagaren stängdes av mellan varje mätning. Detta följdes av tio mätningar med den andra tekniken på motsvarande sätt. Mätningen avbröts (dvs. inga koordinater registrerades) om fixlösning ej erhöles inom fem minuter.
- 5 sådana parvisa mätserier utfördes per punkt under perioden juni-juli 2004 (med undantag för punkt 3 och 6, se kap. 7 samt kap. 8). Totalt utfördes 600 mätningar, dock uppnåddes inte fixlösning vid alla försök.

Denna mätstrategi har i stora drag också tillämpats i tidigare tester av nätverks-RTK med SWEPOS (se Wiklund 2001, Jonsson & Nordling 2003, Kempe 2004, Johansson 2004 och Wiklund 2004), vilken möjliggör kvalitativa jämförelser och kontroll av resultat.

## 6.3 Databearbetning

Mätkvaliteten har undersökts via precisionsmätningar där felkällor som kan försvåra statistisk analys i så hög grad som möjligt har eliminerats/minimerats. Genom hela arbetet har SWEREF 99 varit det gällande referenssystemet och för att slippa fel som kan uppstå vid koordinattransformation har inga koordinater transformerats. De inmätta punkternas koordinater erhöles i latitud, longitud samt höjd över ellipsoiden GRS 80.

För varje mätning lagrades koordinatvärden och en uppsättning attributdata i fältdatorn. Dessa data importerades till Trimble Geomatics Office (TGO) version 1.60, en mjukvara som hanterar olika typer av data från geodetisk mätning, bl.a. GPS-data för både RTK och efterberäkning, och som kan användas för vidare export till andra program. Via den grafiska vyn finns möjlighet att radera eller ändra felaktiga punkter och punktbezeichnungar.

Koordinater och attributdata (såsom antal satelliter för fixlösning, RDOP och stopp- och starttid för mätningen) exporterades via textfiler till Microsoft Excel för punktvis bearbetning och analys. Från anteckningar gjorda under fältmätningarna hämtades uppgifter om tid till flyt- och fixlösning.

Avvikelse från sanna värden beräknades för varje mätning för de tre dimensionerna (två i plan och en i höjd). I plan omvandlades därefter avvikelserna för respektive komponent från gradsystemet till meter. Avståndet mellan breddgraderna (latitud) är ungefär lika stort över hela jordklotet. En grads förflyttning resulterar i en sträcka på cirka 11 mil. Eftersom en sekund motsvarar ca 30,9 m så blir då latitudskillnaden i meter:

$$\Delta lat_m = \Delta lat_{sek} \cdot 30,9$$

Avståndet mellan längdgraderna minskar dock för ökande latitud, vilket gör att longitudskillnaden i meter blir:

$$\Delta long_m = \Delta long_{sek} \cdot 30,9 \cdot \cos(lat_{grad})$$

Höjdavvikelse har angetts relativt ellipsoiden. Planavvikelse har angetts som resultatvektorn av respektive komponenter, dvs.

$$\sqrt{(\Delta lat)^2 + (\Delta long)^2}$$

## 6.4 Analysmetod

All statistisk analys har skett i programvarorna Microsoft Excel och Minitab. I kapitel 7 redovisas resultaten från dessa utifrån terminologi som förekommer inom geodetisk felteori. Här nedan följer därför definitioner av fel- och kvalitetsbegrepp. Övriga analysmetoder som använts i studien beskrivs närmare i de bilagor

där respektive resultat presenteras. För en mer omfattande diskussion av statistiska grundbegrepp och metoder, exempelvis hypotesprövning, rekommenderas Körner & Wahlgren (2000) eller motsvarande referenslitteratur.

### 6.4.1 Felbegreppet

I alla mätningar förekommer det alltid fel, det är viktigt att veta det för att kunna behandla och bearbeta dem korrekt. Ingen mätt position kan någonsin bli helt felfri. Ett fel definieras som skillnaden mellan mätt värde och sant värde, vilket här också benämns avvikelse. Felet kan ibland anges utan riktning (tecken) i den mån endast den absoluta storleken på avvikelsen är intressant. Fel kan delas in i tre kategorier beroende på hur de uppstår. Dessa är grova, systematiska och tillfälliga fel.

*Grova* fel kan tyckas vara "onödiga" fel då de uppkommer genom misstag som beror av slarv eller bristande uppmärksamhet. De följer inga kända lagar och kan därför inte bearbetas med statistiska metoder. De kan emellertid konstateras genom kontroller och motverkas genom oberoende upprepningar av mätningarna.

*Systematiska* (regelbundna) fel följer vissa lagar och funktionssamband och påverkas inte av slumpen, vilket gör att de kan elimineras/reduceras med statistiska metoder. En särskild typ av systematiska fel är de konstanta felen som påverkar alla mätresultat lika mycket och i samma riktning.

*Tillfälliga* (slumpmässiga) fel är av slumpen betingade fel och kan alltså inte i förväg beräknas eller korrigeras, utan måste reduceras genom exempelvis upprepade mätningar. Dessa fel brukar antas vara normalfördelade och oberoende då det finns ett samband mellan felens storlek och frekvens.

### 6.4.2 Definitioner av kvalitetsbegrepp

För att beskriva en samling data finns inom statistiken ett flertal olika hjälpmedel. Två mått som är vanligt förekommande är lägesmått och spridningsmått. Ett lägesmått anger hur stort i medeltal något är, medan ett spridningsmått talar om hur mycket de olika värdena skiljer sig åt. I den här rapporten används median och medelavvikelse som lägesmått och noggrannhet och precision som spridningsmått, i enlighet med tidigare studier av nätverks-RTK inom ramen för SWEPOS (Jonsson & Nordling 2003, Kempe 2004, Wiklund 2004 m.fl.). Nedan följer definitioner av dessa begrepp.

*68- och 95 %-avvikelser* anger den största absolutavvikelsen i plan eller höjd för 68% respektive 95 % av alla mätningar efter att dessa sorterats i storleksordning. Dessa mått förekommer ofta som kvalitets- eller signifikansnivåer vid noggrannhetsanalys och kan här



ses som ett komplement till eller sammanfattning av kumulativa fördelningsdiagram. Vid radiella avvikelser bör noteras att 68- eller 95%-värden inte direkt kan översättas till  $\sigma$ -nivåer (se figur 6.6), dvs. antalet standardavvikelser från medelvärdet, eftersom detta förutsätter en normalfördelad variabel i en dimension. Detta gäller t.ex. inte vid radiella avvikelser där  $1\sigma$  motsvarar cirka 40% av observationerna, dvs. sannolikheten att hamna inom den s.k. felellipsen. Motsvarande gäller också för nedanstående spridningsmått.

*Medelavvikelse* (riktighet) är ett medeltal av alla mätningars avvikelser från det sanna värdet, dvs. mätvärdenas genomsnittliga överensstämmelse med det sanna värdet. Medelavvikelsen ska vara så liten som möjligt. När tillräckligt många mätningar ingår bör den närma sig noll. Om så inte är fallet tyder det på att mätningarna är behäftade med systematiska fel. Är medelavvikelsen däremot låg, finns inga systematiska fel. Även om medelavvikelsen ligger nära noll kan spridningen bland mätningarna vara stor. Medelavvikelsen har beräknats enligt:

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

där  $\varepsilon$  = skillnaden mellan mätt värde och sant värde,  $n$  = antal mätningar

*Noggrannhet* beskriver mätningarnas spridning kring det sanna värdet. En god noggrannhet medför god överensstämmelse mellan mätvärde och korrekt värde. Ett mått på noggrannheten har beräknats enligt:

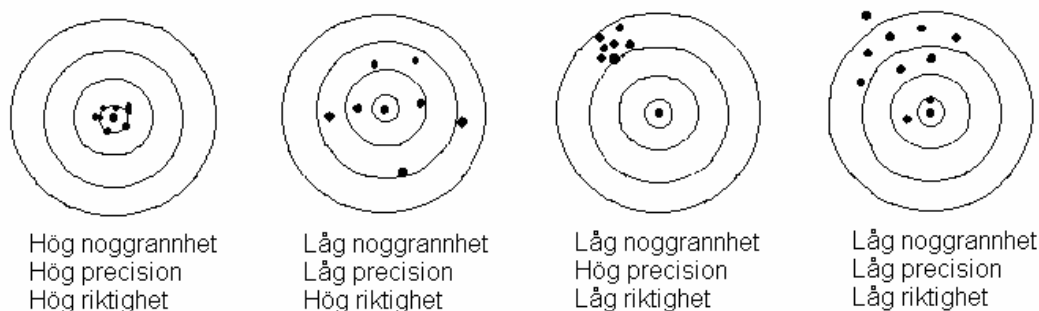
$$\sqrt{\frac{\sum \varepsilon^2}{n}}$$

där  $\varepsilon$  = skillnaden mellan mätt värde och sant värde,  $n$  = antal mätningar

*Precision* (standardavvikelse) visar mätningarnas spridning kring en mätseries medelvärde eller tyngdpunkt. God precision medför små slumpmässiga fel. Även om precisionen är god kan det hända att noggrannheten är låg och då är mätningarna behäftade med systematiska fel, dvs. alla mätningar har ungefär lika stora fel, med samma tecken dessutom. Om precision och noggrannhet däremot har ungefär samma värde tyder det på att medelavvikelsen är nära noll. Precisionen har beräknats enligt:

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

där  $\varepsilon$  = mätningarnas medelvärde,  $n$  = antal mätningar



Figur 6.5: Figuren åskådliggör förhållandet mellan noggrannhet, precision och riktighet. Som bilden visar medför god noggrannheten även god precision och riktighet.

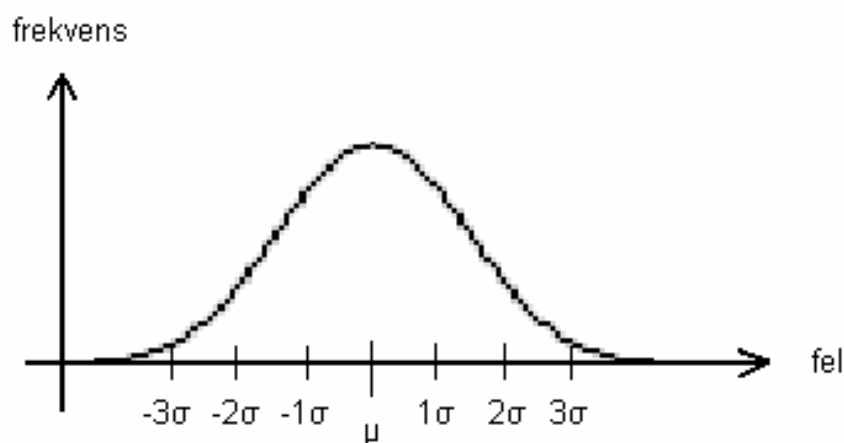
### 6.4.3 Fördelningsanalys

För att närmare kunna studera mätkvalitet så bör rumskomponenternas egenskaper analyseras. Detta görs enklast genom att se hur plan- och höjdkomponenternas avvikelser fördelar sig. En kontinuerlig sannolikhetsfördelning kan karaktäriseras av fyra parametrar:

- Medelvärdet (1:a fördelningsmomentet), som beskriver den centrala tendensen eller läget för symmetriska fördelningar. Vid snedfördelning kan istället medianen vara ett lämpligare mått.
- Standardavvikelsen (2:a fördelningsmomentet), även benämnd som precision.
- Snedhet (3:e fördelningsmomentet), som är ett mått på typvärdets läge i förhållande till medelvärdet, dvs. fördelningens asymmetri. Beroende på om typvärdet befinner sig till vänster eller höger om medelvärdet i en sannolikhetsfördelning så beskrivs denna som negativt eller positivt snedfördelad. Beräknas på motsvarande sätt som precisionen, men med exponenten 3 för den summerade termen.
- Excess (4:e fördelningsmomentet), som är ett mått på fördelningens "toppighet" eller "flathet", dvs. hur frekvent förekommande stora fel är i förhållande till små fel. Beräknas på motsvarande sätt som precisionen, men med exponenten 4 för den summerade termen.

De två sistnämnda måtten är sällan siffermässigt intressanta, men kan ändå tjäna som en vägledning vid jämförelser mellan olika

fördelningar. Många statistiska metoder utgår ifrån att stickprovsdata följer en normalfördelning. Detta gäller exempelvis vissa typer av korrelations- och regressionsanalys, variansanalys och t-test. Normalfördelningen definieras entydigt av populationens medelvärde och standardavvikelse. Även om få studerade variabler uppvisar en exakt normalfördelning, så är den ändå en god approximativ modell för en slumpvariabel. En normalfördelad variabel uppvisar en stark tendens mot medelvärdet (dvs. att "felet noll" är vanligast). Positiva och negativa avvikelser från medelvärdet är lika frekvent förekommande, samt att antalet observationer snabbt avtar när avvikelserna ökar (se figur 6.6).



Figur 6.6: Normalfördelningen är symmetrisk kring sitt medelvärde,  $\mu$ .

Som en följd av centrala gränsvärdessatsen kan summan eller medelvärdet av många oberoende observationer med samma fördelning komma godtyckligt nära denna modell när stickprovet blir tillräckligt stort, även då en underliggande fördelning är icke-normal (Körner & Wahlgren 2000). Eftersom många slumpmässiga faktorer kan tänkas påverka positionsbestämning så är därför normalfördelade rumsvariabler en rimlig nollhypotes.

#### 6.4.3.1 Normalitetstest

Eftersom endast de tillfälliga felen är normalfördelade så kan ett normalitetstest utnyttjas för lokalisering av grova eller systematiska fel vid upprepade mätningar. Då fördelningarnas egenskaper också påverkar de konfidensintervall som används vid hypotesprövning så kan det vara viktigt att pröva normalitetsantagandet. Empiriska metoder är ofta lättbegripliga eftersom de bygger på intuitiva egenskaper hos den sökta fördelningen (som dess grafiska utseende; se t.ex. Alm & Munsin 2003) men bör även kombineras med mer formellt teoretiska angreppssätt. För detta ändamål använder vi den

kumulativa sannolikhetsfunktionen som beskriver sannolikheten att en variabel  $X$  antar ett värde mindre än eller lika med  $x$ :

$$F(x) = P(X \leq x)$$

För att jämföra hur en empirisk och en förväntad kumulativ sannolikhetsfunktion överensstämmer kan ett s.k. Anderson-Darling-test (AD) utnyttjas. Om variabeln är approximativt normalfördelad så bör den logaritmerade kumulativa sannolikhetsfunktionen bilda en rät linje. AD-testet ger ett mått på observationernas genomsnittliga avstånd från den teoretiska fördelningen, och kan anses som mer robust i förhållande till det vanliga Kolmogorov-Smirnov-testet vid jämförelse med en specifik distribution, t.ex. en normalfördelning (Minitab 2003, Romeu 2004). Testhypoteserna för AD formuleras som:

$$\begin{cases} H_0: \text{data följer en specifik sannolikhetsfördelning } F_0 \\ H_1: \text{data följer ej fördelningen } F_0. \end{cases}$$

Testfunktionen för Anderson-Darling definieras enligt:

$$AD = -n - \sum_{i=1}^n \frac{(2i-1)}{n} [\ln F_0(Z_i) + \ln(1 - F_0(Z_{n+1-i}))] \quad (\text{Romeu 2004})$$

där  $F_0$  är den förväntade normalfördelningen och  $Z_i$  är den standardiserade stickprovsvariabeln (dvs.  $Z_i = \frac{x - \mu}{\sigma}$ ) som sorterats i storleksordning enligt  $\{Z_1 \leq Z_2 \leq \dots \leq Z_n\}$ . Kritiska värden  $AD_\alpha$  för givna signifikansnivåer ges av:

|             |       |       |       |       |
|-------------|-------|-------|-------|-------|
| $\alpha$    | 0,1   | 0,05  | 0,025 | 0,01  |
| $AD_\alpha$ | 0,631 | 0,752 | 0,873 | 1,035 |

Om  $AD > AD_\alpha$  så förkastas nollhypotesen på signifikansnivån  $\alpha$ . Minitab och andra statistikprogram kan även ange ett p-värde för testet, vilket då beskriver sannolikheten att erhålla den empiriska fördelningen om nollhypotesen är sann.

#### 6.4.3.2 Jämförelse av varianser och medelvärden

En mätkvalitetsjämförelse mellan de två distributionsteknikerna bör omfatta en analys av väntevärde och spridning hos respektive stickprov. Om spridningsmått (t.ex. precision och noggrannhet) för två olika populationer ska kunna jämföras behöver man veta om de båda stickproven för vilka spridningsmått beräknats kan anses komma från samma fördelning. Vid det vanliga F-testet prövas hypotesen att två stickprov kommer från populationer med samma varianser mot alternativhypotesen att det finns en skillnad i variansen i de underliggande populationerna. Testfunktionen ges av

variationskvoten för två oberoende stickprov, vilket exempelvis använts vid jämförelser mellan mätserier utförda med enkelstations-RTK respektive nätverks-RTK (Alm & Munsin 2003).

Om stickproven inte kan antas vara normalfördelade och det är få ingående värden bör hellre ett icke-parametriskt (fördelningsoberoende) test som Levene-testet användas. Levene-testet är en s.k. envägs variansanalys av mätningarnas absoluta avvikelser från stickprovsmedianerna. Testfunktionen definieras som:

$$L = \frac{(n_{GSM} + n_{GPRS} - 2) \times \left( n_{GSM} \left( \bar{v}_i - \frac{\bar{v}_i + \bar{v}_j}{2} \right) + n_{GPRS} \left( \bar{v}_j - \frac{\bar{v}_i + \bar{v}_j}{2} \right) \right)}{\sum_{i=1}^{n_{GSM}} (v_i - \bar{v}_i)^2 + \sum_{j=1}^{n_{GPRS}} (v_j - \bar{v}_j)^2}$$

där  $v_i = |X_i - \tilde{X}_{GSM}|$ ,  $\tilde{X}_{GSM}$  är medianen för GSM-stickprovets avvikelser,  $\bar{v}_i$  är medelvärdet av alla  $v_i$  och  $n_{GSM}$  är stickprovets storlek. Motsvarande beteckningar gäller för GPRS-stickprovet (med index j). Testvärdet L jämförs sedan med kritiska värden ur en F-fördelning med  $n_{GSM} + n_{GPRS} - 2$  respektive 1 frihetsgrad för signifikansnivån  $\alpha$ .

t-testet används för jämförelse av medelvärden i två stickprov, t.ex. de mätningar som genomförts med respektive distributionsteknik. Förutsättningarna för att medelvärdestest ska kunna användas är att populationerna är approximativt normalfördelade med samma varians och att stickproven är oberoende. t-testet är relativt okänsligt för måttliga avvikelser från dessa antaganden, framför allt vid många observationer/mätningar. Noterbart är att t-testet är identiskt med det vanliga z-testet för större stickprov. Programvaran Minitab saknar dock möjlighet att utföra z-testet. Nollhypotesen för medelvärdesjämförelsen skrivs som:

$$H_0 : \mu_{GSM} - \mu_{GPRS} = \delta_0$$

där  $\delta_0 = 0$ , dvs. att ingen skillnad mellan populationsmedelvärdena föreligger. Den tvåsidiga alternativhypotesen blir då:

$$H_1 : \mu_{GSM} - \mu_{GPRS} \neq \delta_0$$

Om stickproven har samma underliggande varians kan t-testfunktionen uttryckas som:

$$t = \frac{(\bar{x}_{GSM} - \bar{x}_{GPRS}) - \delta_0}{\sqrt{s_p^2 \left( \frac{1}{n_{GSM}} + \frac{1}{n_{GPRS}} \right)}}$$

där n är storleken för respektive stickprov och den sammanvägda variansen (eng. pooled variance) är

$$s_p^2 = \frac{(n_{GSM} - 1)s_{GSM}^2 + (n_{GPRS} - 1)s_{GPRS}^2}{n_{GSM} + n_{GPRS} - 2}$$

med stickprovsvarianserna  $s_{GSM}^2$  och  $s_{GPRS}^2$ . Kritiska värden för testfunktionen  $t$  ges av en t-fördelning med  $n_{GSM} + n_{GPRS} - 2$  frihetsgrader. I den mån tolkningen av t-testet försvåras av fördelningarnas egenskaper så bör ett parameterfritt alternativ användas istället, t.ex. Mann-Whitney-testet (även kallat Wilcoxon's rangsummatest; definition enligt Körner & Wahlgren 2000).

## 6.4.4 Korrelationsanalys

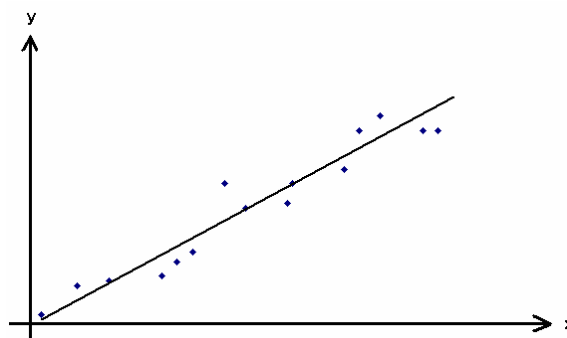
Vid korrelationsanalys analyseras förhållandet mellan två eller flera variabler, där hög korrelation antyder ett starkt samband mellan undersökta variabler. Ofta handlar korrelationsanalysen om att finna funktionssamband som på bästa möjliga sätt stämmer överens med observerade data. Vid regressionsanalys används en eller flera variabler för att "förklara" en annan parameter. En sådan undersökning kan också göras med tiden som förklarande variabel, vilket sker vid autokorrelationsanalys.

### 6.4.4.1 Regressionsanalys

Regressionsanalys beskriver hur en enstaka beroende variabel påverkas av värdet i en eller flera oberoende variabler. Mer specifikt används enkel linjär regressionsanalys för att analysera det linjära sambandet mellan två variabler. Funktionen antar då formen av en rät linjes ekvation:

$$y = ax + b$$

där  $a$  är linjens riktningskoefficient (lutning) som anger hur mycket  $y$  ändras i genomsnitt då  $x$  ökar med en enhet.  $b$  är interceptet (linjens skärning med  $y$ -axeln). I och med att observerade data sällan ligger längs en rät linje beräknas de två variablerna  $a$  och  $b$  så att residualerna, dvs. avstånden i  $y$ -led mellan punkterna i diagrammet och linjen blir så små som möjligt. Detta sker ofta med minsta kvadratmetoden där kvadratsumman för avstånden i  $y$ -led minimeras.



Figur 6.7: Linje anpassad till observerade data med minsta kvadratmetoden.

För att kunna kvantifiera styrkan i det linjära sambandet mellan två variabler kan man använda sig av Pearsons korrelationskoefficient:

$$\rho = \frac{s_{xy}}{s_x s_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)(s_x \times s_y)}$$

där  $s_x$ ,  $s_y$  och  $s_{xy}$  är stickprovens standardavvikelse respektive kovarians. Korrelationskoefficienten kan anta värden mellan -1 och 1. Om de två variablerna tenderar att öka eller minska samtidigt så är koefficienten positiv, i annat fall negativ. R<sup>2</sup>-värdet, den s.k. determinationskoefficienten som ofta anges i samband med linjär regressionsanalys, är ett mått på hur stor del av variansen i variabeln y som förklaras av variansen i variabel x. För att pröva om den teoretiska korrelationskoefficienten uppvisar en signifikant avvikelse från noll formuleras följande tvåsidiga hypotestest:

H<sub>0</sub>:  $\rho = 0$  och H<sub>1</sub>:  $\rho \neq 0$  där  $\rho$  är korrelationskoefficienten mellan ett variabelpar.

För enkel linjär regression är detta korrelationstest ekvivalent med test av regressionslinjens lutning, något som utförts av exempelvis Alm & Munsin (2003) och Jonsson & Nordling (2003) i jämförelsestudier av enkelstations-RTK och nätverks-RTK. Testfunktionen angavs där som den linjära riktningskoefficienten genom dess medelfel. Givet ovanstående definition av  $\rho$  kan testfunktionen skrivas som:

$$t = \frac{a}{s_a} \Rightarrow t = \frac{\rho \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-\rho^2}}$$

som följer en t-fördelning med n-2 frihetsgrader om koefficienten är noll. Ett lågt  $\rho$ -värde för detta test innebär alltså att nollhypotesen kan förkastas till förmån för alternativhypotesen - att det föreligger ett statistiskt signifikant linjärt samband mellan de båda variablerna. Om data innehåller outliers så kommer hypotesprövningen med Pearsons korrelationskoefficient att bli mer osäker. När man har anledning att anta en signifikant avvikelse från normalfördelning bör undersökningen därför kompletteras med ett rangbaserat korrelationstest, t.ex. Spearman-testet.

Medan Pearsons korrelationskoefficient baseras på observerade värden beräknas Spearmans koefficient istället på rangordnade värden. Varje variabel rangordnas separat genom att sortera mätvärdena i storleksordning och numrera dem: det lägsta värdet ges rang ett, det näst lägsta rang två, osv. Om variabeln har två eller fler mätvärden av samma storlek så ges de en medelrang. Korrelationskoefficienten beräknas därefter som:

$$\rho' = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n (r(x_i) - r(y_i))^2}{n(n^2 - 1)}$$

där  $r(x_i)$  och  $r(y_i)$  är respektive rangordning av  $x$  och  $y$  för variabelparet  $i$ . Testfunktionen formuleras därefter på motsvarande sätt som Pearsons korrelationskoefficient. Spearmans rangkorrelationskoefficient ger, i likhet med andra korrelationskoefficienter, ett värde mellan -1 och 1. En positiv korrelation innebär i det här fallet att rangordningen ökar tillsammans för de båda variablerna, medan en negativ korrelation innebär att rangordningen i en variabel tenderar att öka när rangordningen i den andra variabeln minskar. En korrelation nära noll tyder på att inget monotont funktions samband existerar mellan de båda variablerna.

#### 6.4.4.2 Autokorrelation

Vid tidsseriemodellering används en rad olika metoder för att identifiera mönster i residualserier, bl.a. autokorrelationsanalys. Autokorrelation beskriver korrelationen mellan observationerna i en tidsserie som är förskjutna med ett givet tids- eller observationsintervall. Positivt autokorrelerade serier innebär att höga värden tenderar att följa på höga värden och vice versa. Det är sedan tidigare känt att vissa av felkällorna vid GPS-observationer kan vara tidskorrelerade (Vollath et al. 2002). En viktig frågeställning är i det sammanhanget hur autokorrelation kan tänkas påverka positionsbestämning med nätverks-RTK, vilket diskuteras i bl.a. Kjörsvik (2002).

Ett mått på tidsberoende samband i en serie observationer kan ges av autokorrelations-koefficienten  $\rho_k$  för en tidsförskjutning  $k = 1, 2, \dots$  osv:

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})}{\sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (\text{Meko 2005})$$

där  $\bar{x}$  är medelvärdet och  $n$  är antalet observationer i tidsserien. En första ordningens autokorrelationskoefficient ( $k = 1$ ) är således korrelationen mellan de  $n-1$  första och de  $n-1$  sista observationerna i serien. Eftersom den s.k. autokovariansen i en tidsserie definieras som den genomsnittliga produkten av avvikelserna från medelvärdet vid tidsförskjutningen  $t$  respektive  $t+k$ , dvs.

$$c_k = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(x_{t+k} - \bar{x})$$



så kan autokorrelationskoefficienten vid tidsförskjutningen  $k$  även uttryckas som kvoten mellan autokovarianserna vid tidsförskjutningarna  $k$  respektive 0 (där den sistnämnda är lika med stickprovets varians):

$$\rho_k = c_k / c_0 \quad (\text{Meko 2005})$$

Vi ser alltså att autokorrelationskoefficienten  $\rho_k$  på motsvarande sätt som i det allmänna fallet (dvs. Pearson-koefficienten) definieras som stickprovets kovarians genom den totala variansen.

När autokorrelationskoefficienterna ges som en funktion av tidsförskjutningen  $k$  kallas detta för stickprovets autokorrelationsfunktion, eller korrelogram i plottad form. Korrelogram kan bl.a. visa om en serie innehåller oberoende observationer eller ej. För en slumpvariabel väntar vi oss nämligen att tidsförskjutna observationer är okorrelerade och därmed att autokorrelationskoefficienten ska vara approximativt normalfördelad med väntevärdet noll.

Normalt kräver korrelogrammet konstant tidsförskjutning, men autokorrelationsfunktionen kan i princip definieras på samma sätt för förskjutna observationer. I denna studie används därför autokorrelationsfunktionen för att pröva mätningarnas (dvs. avvikelsernas) grad av slumpmässighet eller systematik, dvs. närvaron av signifikant tidsmässig korrelation i mätserierna.

För stora tids- eller observationsintervall bör korrelogrammets konfidensintervall justeras för att ta hänsyn till skenbar korrelation som kan uppstå mellan successiva koefficienter  $\rho_k, \rho_{k+1}$  (Meko 2005). Medelfelet för autokorrelationskoefficienten skrivs därför som

$$\sigma_{\rho_k} = \sqrt{\frac{1 + 2 \sum_{i=1}^{k-1} r_i^2}{n}} \quad (\text{Minitab 2003})$$

Medelfelet vid en given tidsförskjutning kommer alltså att bero av stickprovets storlek och beräknade koefficienter av en lägre ordning. I korrelogrammet kommer detta att synas som ett vidare konfidensintervall för längre tidsförskjutningar, vilket innebär att högre värden för  $\rho_k$  krävs för att påvisa signifikant autokorrelation. Ett tvåsidigt hypotestest formuleras som:

$$H_0: \rho_k = 0 \quad \text{och} \quad H_1: \rho_k \neq 0$$

Testfunktionen formuleras som tidigare:

$$t = \frac{\rho_k}{\sigma_{\rho_k}}$$

Givet nollhypotesen är denna t-fördelad med  $n-2$  frihetsgrader.  
Autokorrelationen kan prövas för valfritt tidsintervall men får anses  
mer osäker för högre  $k$ .

## 7 RESULTAT

I detta kapitel presenteras resultaten av jämförelse mellan distributionsteknikerna GSM och GPRS ifråga om mätkvalitet (kap. 7.1-7.5). Detta omfattar spridningsdiagram och fördelningar av avvikelser samt kvalitetsmått för uppmätta koordinater och initialiseringstider. I diagrammen och tabellerna är resultat i plan skilda från resultat i höjd eftersom de förväntas vara av olika karaktär och storlek. Till kvalitetsjämförelsen hör dessutom en fördjupad analys som underlag för tolkning av dessa resultat (kap. 7.6-7.7). Denna del består av fördelnings- och korrelationsanalys. Fördelningsanalysen omfattar bl.a. normalitetstest och varianstest av plan- och höjdkomponenter. Korrelationsanalysen omfattar regressionstest där sambandet mellan avvikelser och olika bedömbara parametrar utvärderas, samt analys av tidsserier (autokorrelation).

Utöver detta är följande resultat inkluderade i rapporten som bilagor:

- I. Plan- och höjdavvikelser för enskilda punkter, redovisade i form av spridningsdiagram, kvalitetstal och kumulativfördelningar.
- II. Diagram över absoluta positionsförändringar i plan och höjd under genomförda parvisa mätserier (dvs. en mätserie med GSM och en med GPRS, eller vice versa)

## 7.1 Genomförda mätningar

Det mest noterbara i resultatredovisningen är att GPRS-mätningar inte kunde genomföras på två punkter (3 och 6) p.g.a. bristfällig datakommunikation, vilket vi behandlar i kapitel 8. I projektet har därför 600 mätningar utförts, 350 för GSM och 250 för GPRS. Av dessa har i sin tur ett antal mätningar ej resulterat i registrerade mätvärden, vilket beror på att fixlösning ej erhöles inom fem minuter eller att mätningen ej hann lagras innan fixlösningen förlorades. I tabell 7.1 redovisas frekvensen av mätningar utan registrerade mätvärden. Dessutom visas antalet misslyckade uppkopplingar, dvs. uppkopplingar med utebliven eller snabbt avbruten kommunikation med driftcentralen efter påbörjad tidtagning. Misslyckade uppkopplingar räknades *ej* som genomförd mätning (och ingår därför inte i de 600 mätningarna) men noterades i protokoll.

Tabell 7.1: Misslyckade mätningar.

| Misslyckade mätningar    | GSM   | GPRS* |
|--------------------------|-------|-------|
| Ej fixlösning inom 5 min | 6,4%  | 2,0%  |
| Förlorad fixlösning      | 2,3%  | 0     |
| Misslyckad uppkoppling** | 28,6% | 4,9%  |

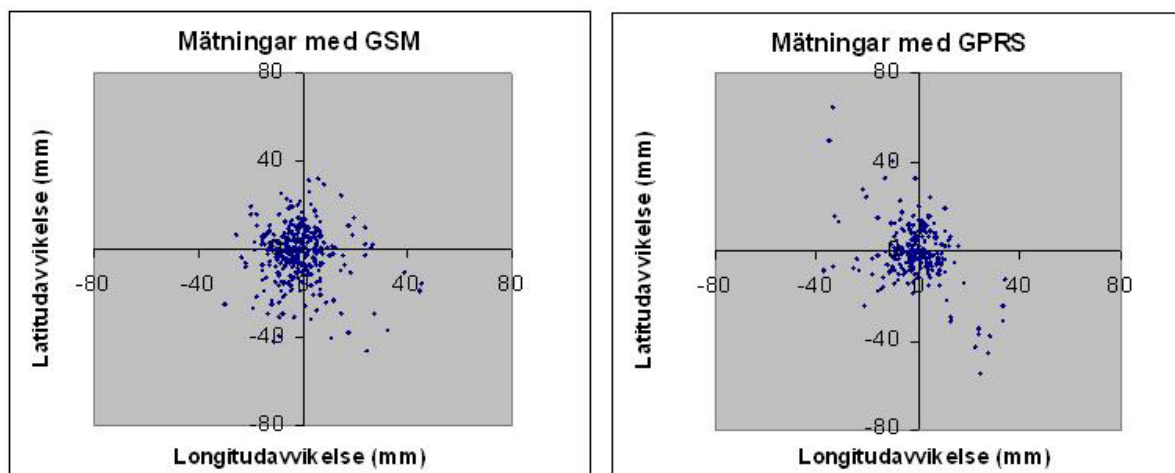
\*inkluderar ej punkt 3 och 6

\*\*av det totala antalet uppringningar

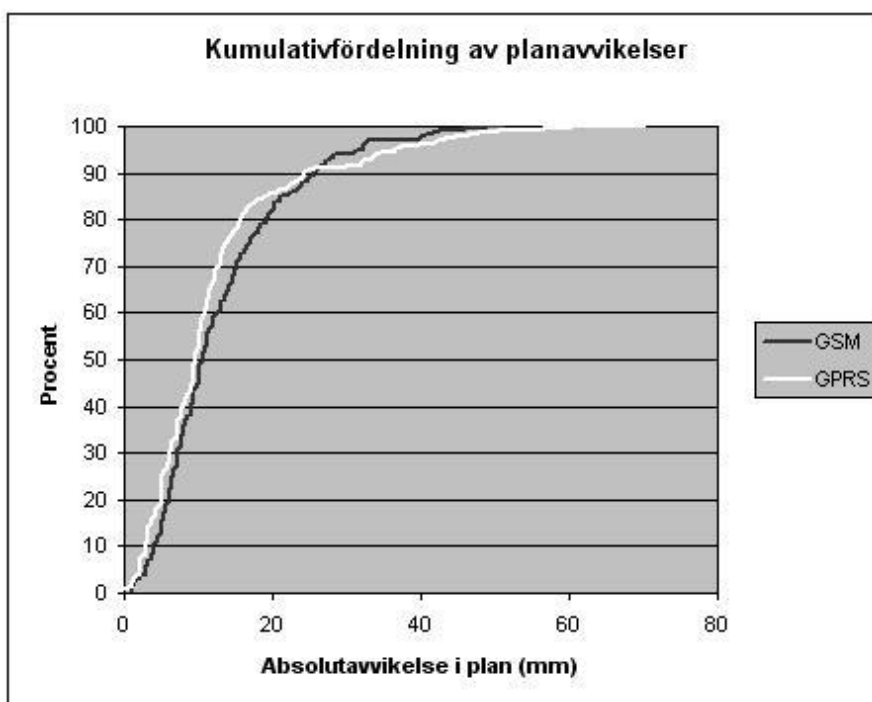
## 7.2 Avvikelser för samtliga mätningar

För varje registrerad mätning har avvikelsen från sant värde i plan och höjd beräknats. Dessa redovisas dels i spridningsdiagram som visar horisontella och vertikala avvikelser för respektive teknik (figur 7.1 och 7.3), dels i kumulativa fördelningsdiagram över absolutavvikelser (figur 7.2 och 7.4). Dessutom redovisas de sorterade absolutavvikelserna på 68- och 95%-nivån (tabell 7.2 och 7.3).

## 7.2.1 Planavvikelser för samtliga mätningar



Figur 7.1: Avvikelser i latitud och longitud från sant värde för respektive metod.

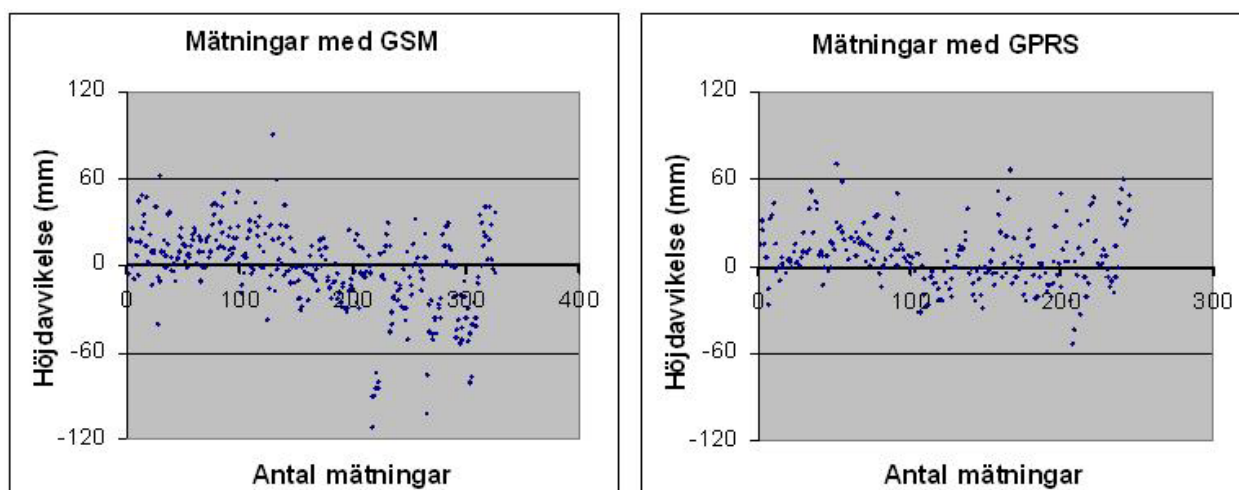


Figur 7.2: Fördelning av sorterade planavvikelser för samtliga mätningar.

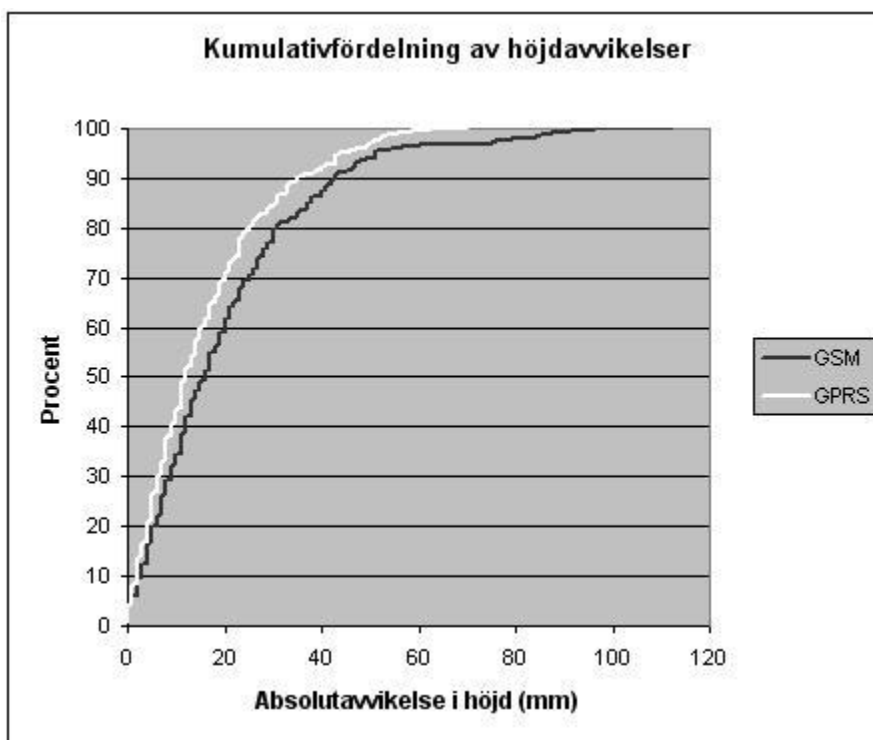
Tabell 7.2: 68- och 95%-avvikelser i plan.

| Planavvikelse | GSM | GPRS |
|---------------|-----|------|
| 68%           | 15  | 12   |
| 95%           | 32  | 36   |
| Största       | 52  | 73   |

## 7.2.2 Höjdavvikelser för samtliga mätningar



Figur 7.3: Avvikelser i höjled från sant värde för respektive metod.



Figur 7.4: Fördelning av sorterade höjdavvikelser för samtliga mätningar.

Tabell 7.3: 68- och 95%- avvikelser i höjd.

| Höjdavvikelse | GSM | GPRS |
|---------------|-----|------|
| 68%           | 24  | 19   |
| 95%           | 51  | 45   |
| Största       | 112 | 70   |

## 7.3 Kvalitetsmått för samtliga mätningar

Medelavvikelse, samt mått på precision och noggrannhet har beräknats för samtliga mätningar och redovisas här i tabellform. För beskrivning av kvalitetsbegreppen, se kap. 6.4.2.

Tabell 7.4: Medelavvikelser för samtliga mätningar.

| Medelavvikelse | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | -2  | 0    |
| Longitud       | -1  | -1   |
| Höjd           | -1  | 7    |

Tabell 7.5: Precision för samtliga mätningar.

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 13  | 13   |
| Longitud       | 10  | 11   |
| Höjd           | 28  | 20   |

Tabell 7.6: Noggrannhet för samtliga mätningar.

| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 16  | 17   |
| Höjd             | 28  | 21   |

## 7.4 Initialiseringstider för samtliga mätningar

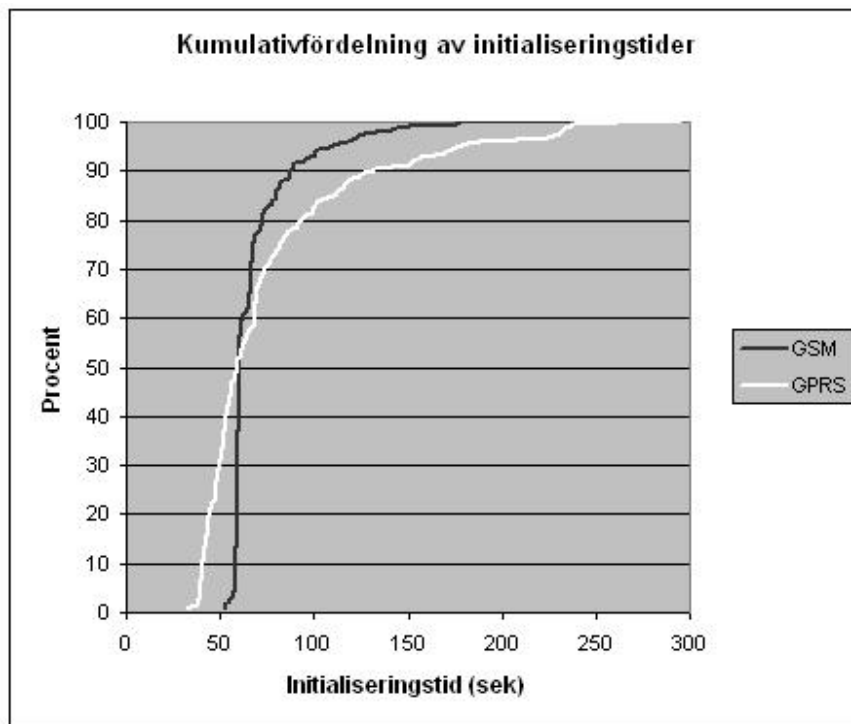
Initialiseringstider för samtliga mätningar har sorterats i storleksordning och redovisas i kumulativt fördelningsdiagram (figur 7.5). Tabellerna 7.7 och 7.8 visar värden för median, 68% och 95%. Initialiseringstiden har som tidigare nämnts räknats från uppringningen till SWEPOS till erhållen fixlösning (centimeternoggrannhet).

Tabell 7.7: Tid till flytlösning för samtliga mätningar.

| Tid till flyt (s) | GSM | GPRS |
|-------------------|-----|------|
| Median            | 46  | 24   |
| 68%               | 46  | 25   |
| 95%               | 47  | 32   |

Tabell 7.8: Tid till fixlösning för samtliga mätningar.

| Tid till fix (s) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Median           | 60  | 59   |
| 68%              | 66  | 72   |
| 95%              | 110 | 180  |



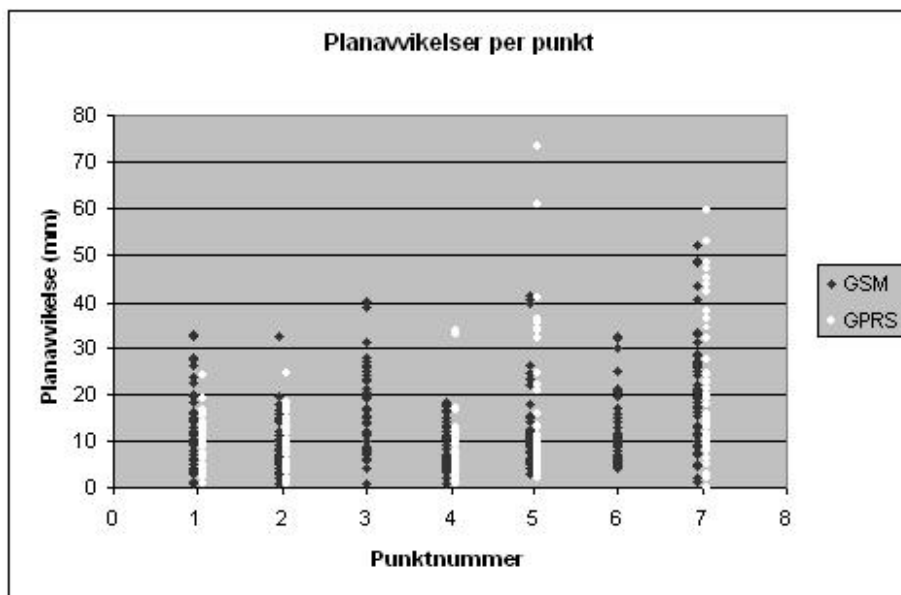
Figur 7.5: Kumulativ fördelning av initialiseringstider för alla mätningar.

## 7.5 Avvikelser och initialiseringstider för enskilda punkter

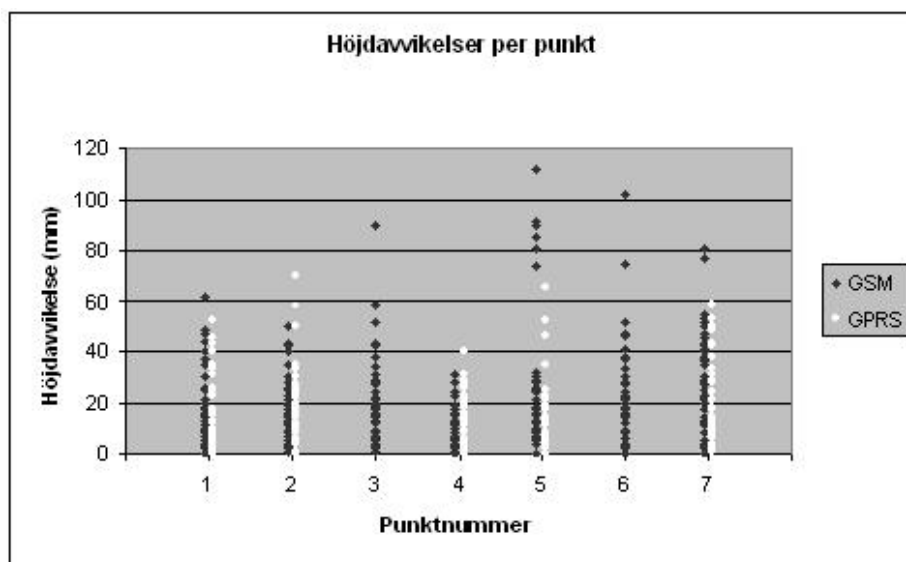
### 7.5.1 Spridningsdiagram

Spridningsdiagrammen (figurerna 7.6-7.8) innefattar plan- och höjdavvikelser samt initialiseringstider för samtliga mätningar, men visas här för varje punkt 1-7. Som ovan saknas här GPRS-resultat för punkterna 3 och 6.

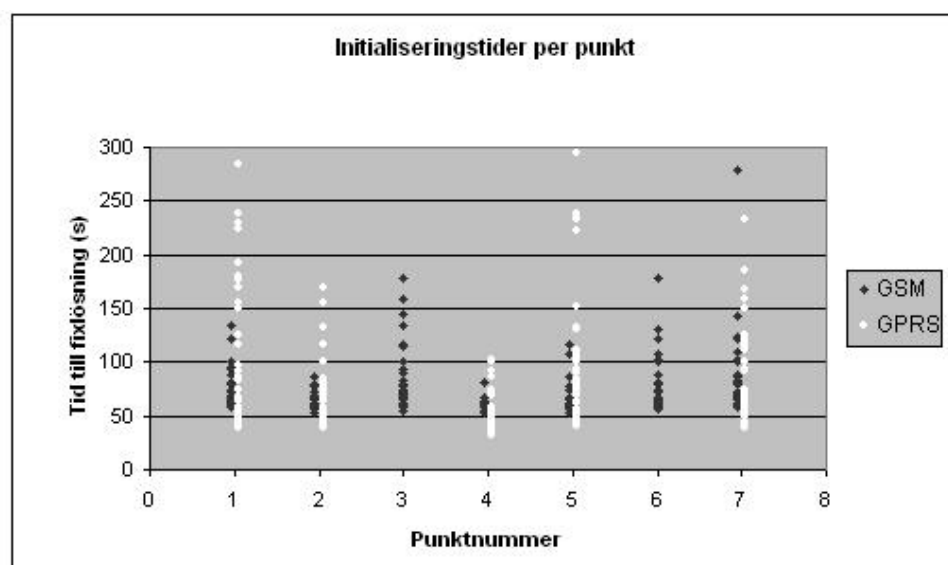




Figur 7.6: Planavvikelser för respektive punkt och teknik (GSM och GPRS).



Figur 7.7: Höjdavvikelser för respektive punkt och teknik (GSM och GPRS).

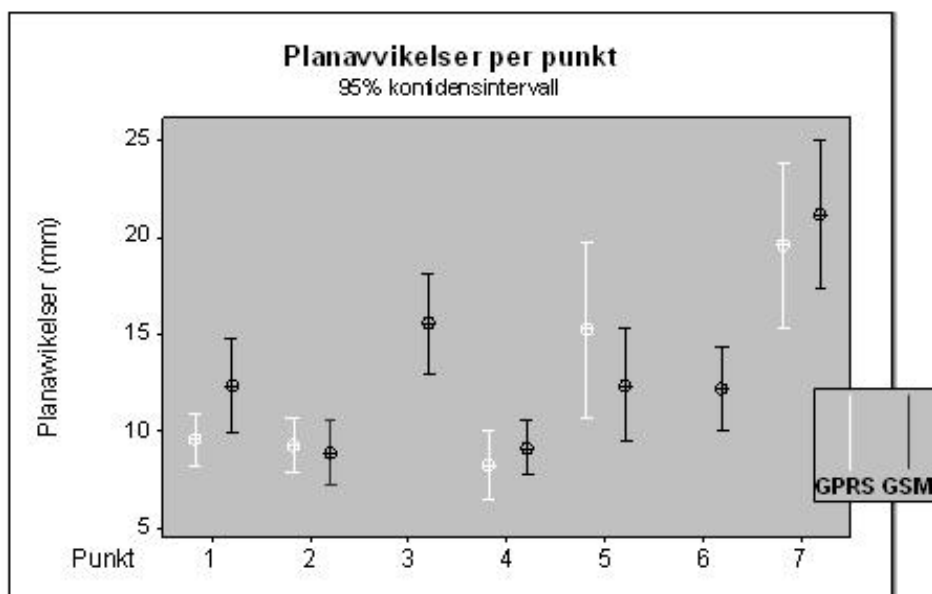


Figur 7.8: Initialiseringstider för respektive punkt och teknik (GSM och GPRS).

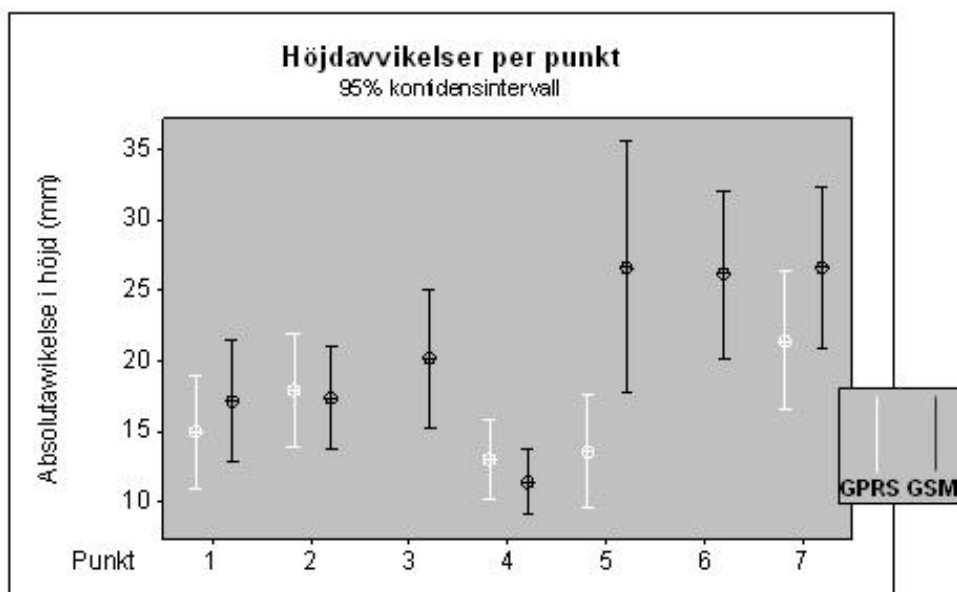
## 7.5.2 Intervalldiagram

Intervalldiagrammen visar spridningen av absoluta avvikelser i plan och höjd samt initialiseringstider för varje punkt och teknik.

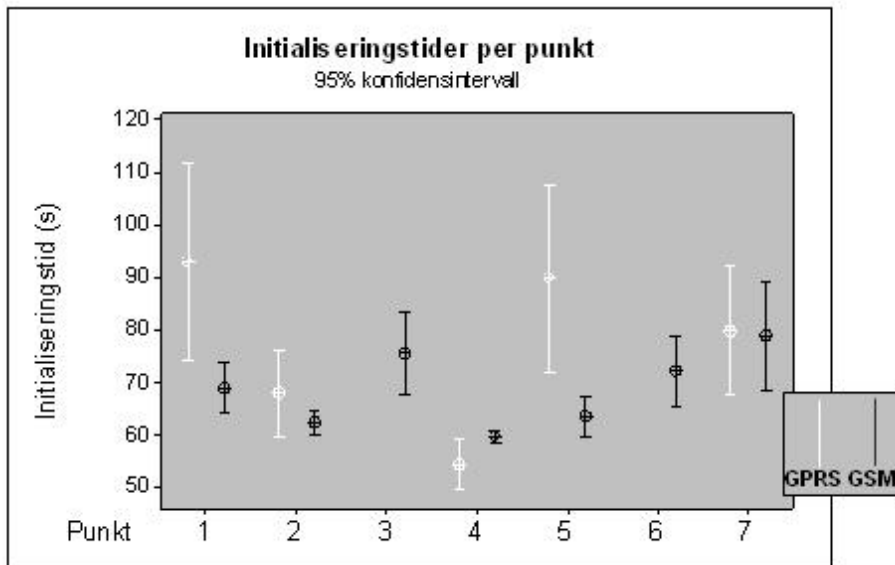
Intervallen definieras utifrån respektive medelvärde (visad som hårkorssymbol) med 95% konfidensintervall. Notera att intervallen i högsta grad påverkas av antalet stora avvikelser, som skulle kunna klassas som outliers. Observera att y-axlarna har olika skalor.



Figur 7.9: Medelvärde och spridning av planavvikelse för varje punkt.



Figur 7.10: Medelvärde och spridning av höjdavvikelse för varje punkt.

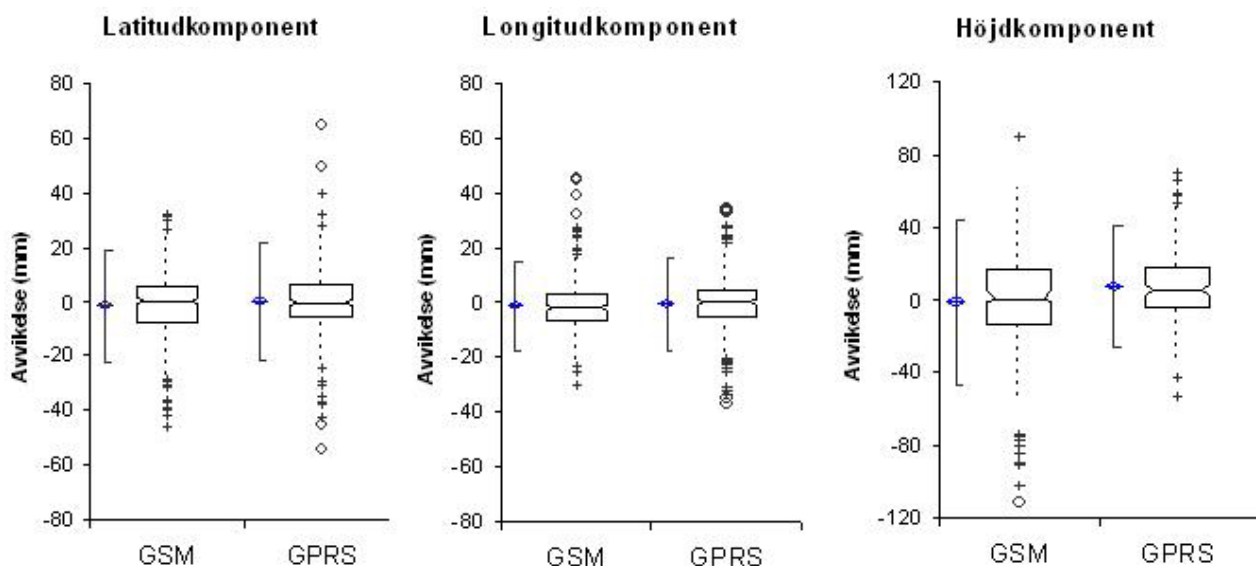


Figur 7.11: Medelvärde och spridning av initialiseringstider för varje punkt.

## 7.6 Fördelningsanalys

### 7.6.1 Sammanställning av avvikelsefördelningar

Boxdiagrammen i figur 7.12 visar läges- och spridningsmått för alla avvikelser, uppdelade på respektive komponent. Medelvärden, med 95 % konfidensintervall, visas som hårtkorssymboler till vänster i diagrammen. Boxarna visar kvartilavstånden, dvs. de värden som befinner sig mellan första och tredje kvartilen (50 % av alla värden). Medianen symboliseras av ett horisontellt streck i varje box. Den vertikala streckade linjen visar median  $\pm 1,5 \times$  kvartilavståndet, vilket för en normalfördelad variabel ska motsvara 100 % av alla värden. Plustecken och ringar symboliserar outliers, där ringarna visar avvikelser med mer än 3 gånger kvartilavståndet från medianen.

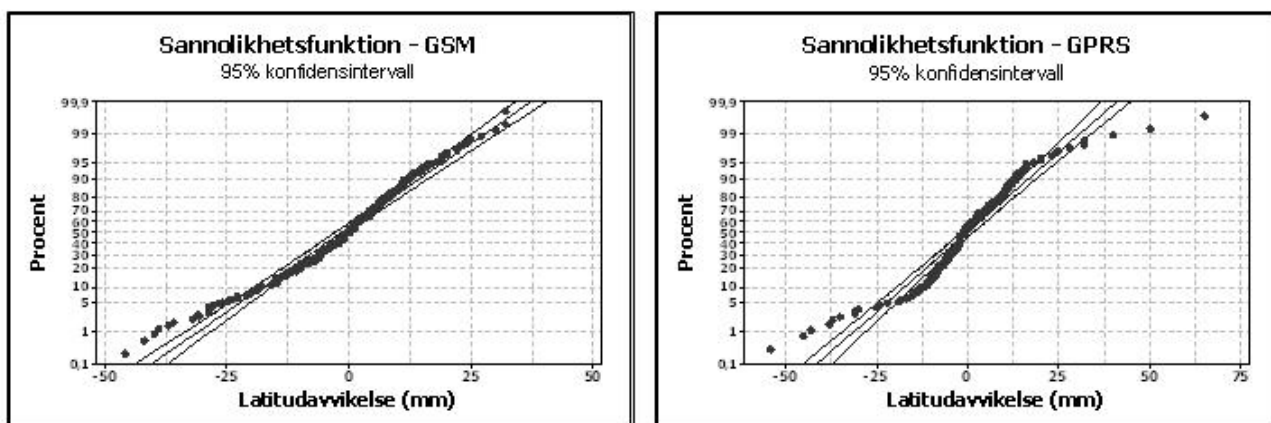


Figur 7.12: Boxplottar av avvikelser i plan och höjd för samtliga mätningar med respektive teknik.

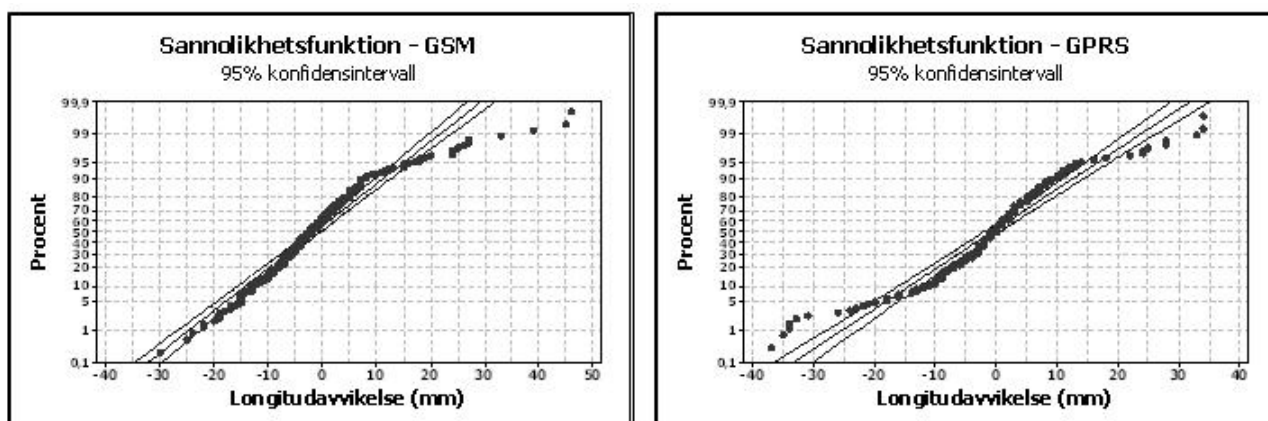
## 7.6.2 Normalitetstest

Kumulativa sannolikhetsfördelningar för samtliga avvikelser redovisas i figurerna 7.13-7.15. Sannolikhetsfunktionerna beskriver den (empiriska) fördelningen av avvikelser för respektive plan/höjd-komponent och teknik, sorterade i storleksordning. Notera att skalan för kumulativa procent är logaritmisk. Den teoretiska normalfördelningen ges då av en rät linje, som i diagrammen syns tillsammans med gränslinjer för ett 95-procentigt konfidensintervall.

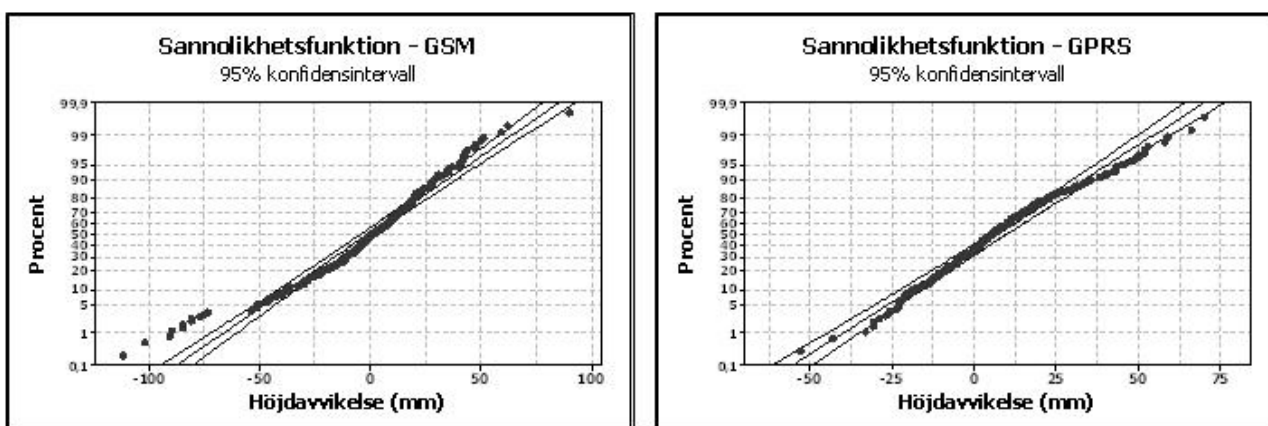
Ur sannolikhetsfunktionerna har kritiska värden för Anderson-Darling-testet beräknats (tabell 7.9), vilket visar huruvida signifikanta avvikelser från normalfördelningshypotesen föreligger. Snedhets- och excessvärden har beräknats enligt kap. 6.4.3, dock utan att signifikansprövas gentemot hypotes om normalfördelning.



Figur 7.13 Kumulativa fördelningar av latitudavvikelser för respektive teknik.



Figur 7.14 Kumulativa fördelningar av longitudavvikelser för respektive teknik.



Figur 7.15 Kumulativa fördelningar av höjdavvikelser för respektive teknik

Tabell 7.9: Anderson-Darlings normalitetstest.

|          | GSM (n=326) |        | GPRS (n=245) |        |
|----------|-------------|--------|--------------|--------|
|          | Testvärde   | P      | Testvärde    | P      |
| Latitud  | 2,64        | <0,005 | 4,92         | <0,005 |
| Longitud | 5,10        | <0,005 | 5,19         | <0,005 |
| Höjd     | 3,23        | <0,005 | 1,34         | <0,005 |

Tabell 7.10: Snedhetsvärden (3:e fördelningsmomentet).

| Snedhet  | GSM   | GPRS  |
|----------|-------|-------|
| Latitud  | -0,55 | 0,08  |
| Longitud | 1,16  | -0,20 |
| Höjd     | -0,81 | 0,40  |

Tabell 7.11: Excessvärden (4:e fördelningsmomentet).

| Excess   | GSM  | GPRS |
|----------|------|------|
| Latitud  | 1,05 | 4,84 |
| Longitud | 3,99 | 2,87 |
| Höjd     | 1,84 | 0,40 |

### 7.6.3 Varianser och medelvärden

Test för ekvivalenta varianser för respektive teknik har utförts på latitud-, longitud- och höjddkomponenter, dels med vanligt F-test och dels med det parameterfria Levene-testet. Medelvärden har jämförts med t-test. Testvärden och sannolikheter (p-värden) för angivna nollhypoteser är redovisade i tabell 7.12 respektive 7.13. Antalet frihetsgrader är 569 ( $n_{GPRS} + n_{GSM} - 2 = 326 + 245 - 2$ ).

Tabell 7.12: Jämförelse av varianser,  $H_0: Var_{GSM} = Var_{GPRS}$

|          | F-test    |        | Levene    |        |
|----------|-----------|--------|-----------|--------|
|          | Testvärde | P      | Testvärde | P      |
| Latitud  | 0,90      | 0,357  | 0,26      | 0,612  |
| Longitud | 0,89      | 0,342  | 0,08      | 0,773  |
| Höjd     | 1,91      | <0,001 | 13,33     | <0,001 |

Tabell 7.13: Jämförelse av medelvärden,  $H_0: \delta_0 = \mu_{GSM} - \mu_{GPRS} = 0$

|          | 95 %                                | t-värde | P       |
|----------|-------------------------------------|---------|---------|
| Latitud  | $[-3,55 \leq \delta_0 \leq 0,72]$   | -1,30   | 0,195   |
| Longitud | $[-2,36 \leq \delta_0 \leq 1,03]$   | -0,78   | 0,438   |
| Höjd     | $[-12,60 \leq \delta_0 \leq -4,66]$ | -4,27   | <0,001* |

\* P-värdet för parameterfritt Mann-Whitney-test beräknades till  $\sim 0,005$

## 7.7 Korrelationsanalys

### 7.7.1 Samband mellan plan- och höjdavvikelser

Korrelation mellan absolutavvikelser i plan respektive höjd har uppskattats och signifikansprövats (se kap. 6.4.4.1). Testvärden och sannolikheter för nollhypotesen har dels beräknats med Pearsonkoefficienten och dels med det rangordnade Spearmanestet.

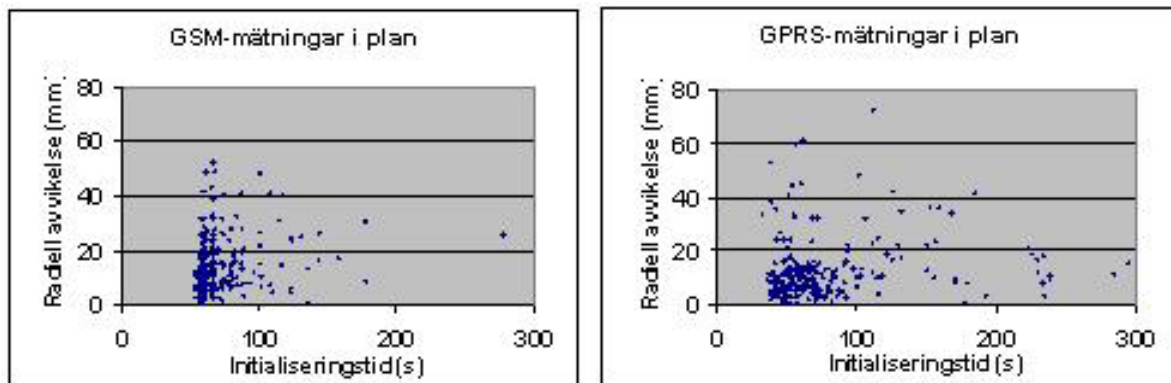
Digrammen över absoluta positionsförändringar i bilaga A ger ytterligare möjlighet att utvärdera sambandet, eftersom dessa visar variationen i plan- och höjddkomponenten under varje mätserie.

Tabell 7.14: Korrelation mellan absolutavvikelser i plan respektive höjd,  $H_0: \rho = 0$

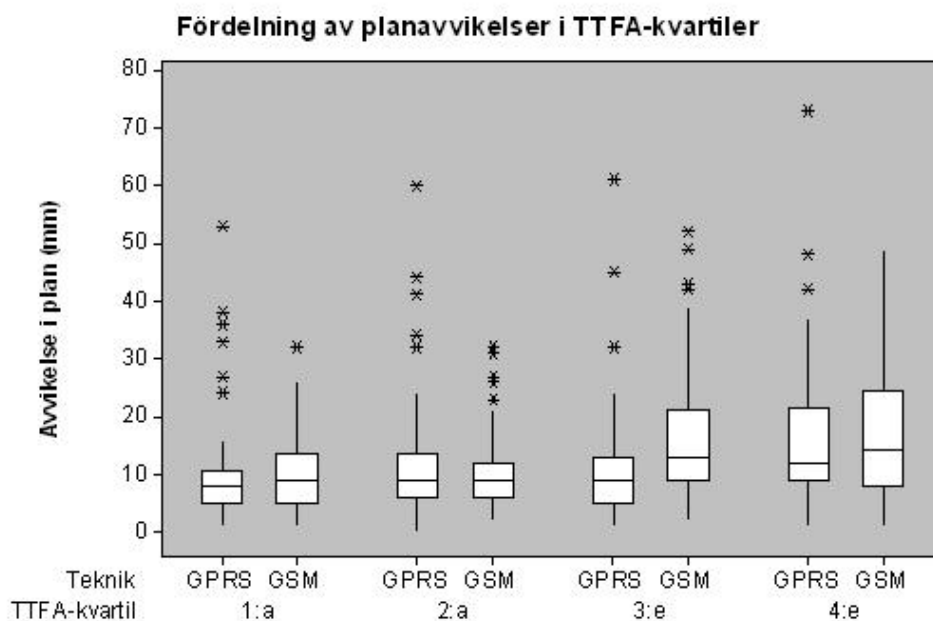
|                   |          | $\rho$ | 95 %<br>konfidensintervall   | Testvärde | P      |
|-------------------|----------|--------|------------------------------|-----------|--------|
| GSM<br>(n = 326)  | Pearson  | 0,33   | $[0,23 \leq \rho \leq 0,42]$ | 6,29      | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,28   | $[0,17 \leq \rho \leq 0,37]$ | 5,25      | <0,001 |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,37   | $[0,25 \leq \rho \leq 0,47]$ | 6,21      | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,25   | $[0,13 \leq \rho \leq 0,36]$ | 4,02      | <0,001 |

### 7.7.2 Samband mellan initialiseringstider och avvikelser i plan respektive höjd

Som framgår av nedanstående spridningsdiagram (figurerna 7.16 och 7.18) är sambandet mellan uppmätt tid till fixlösning och plan- respektive höjdavvikelser inte av den karaktären att den kan beskrivas via enkel linjär regression. Eventuella samband analyseras istället genom att titta på olika avsnitt av fixtids-fördelningen (figurerna 7.17 och 7.19, samt tabellerna 7.15 och 7.16). Förkortningen TTFA (*Time To Fix Ambiguities*) används här synonymt med initialiseringstid, dvs. den uppmätta tiden från uppringning av SWEPOS till erhållen fixlösning. Den första TTFA-kvartilen i figurerna 7.17 och 7.19 avser de första 25% av fixtiderna sorterade i storleksordning osv. Asteriskerna markerar outliers, dvs. avvikelser som är större än medianvärdet plus 1,5 gånger kvartilavståndet. I övrigt gäller samma symbolbetydelse som i figur 7.12.



Figur 7.16: Radiella avvikelser som funktion av initialiseringstider för respektive teknik.

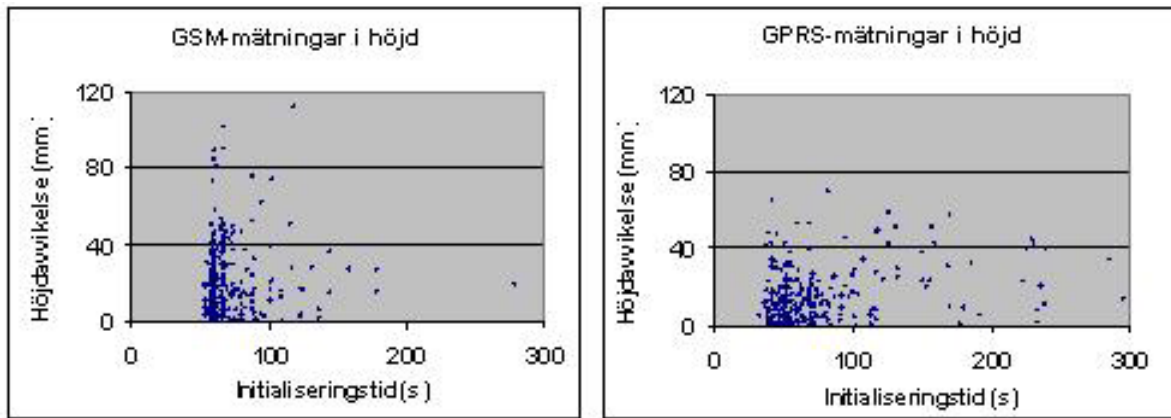


Figur 7.17: Planavvikelse som funktion av initialiseringstider (tider till fixlösning, uppdelade i kvartiler).

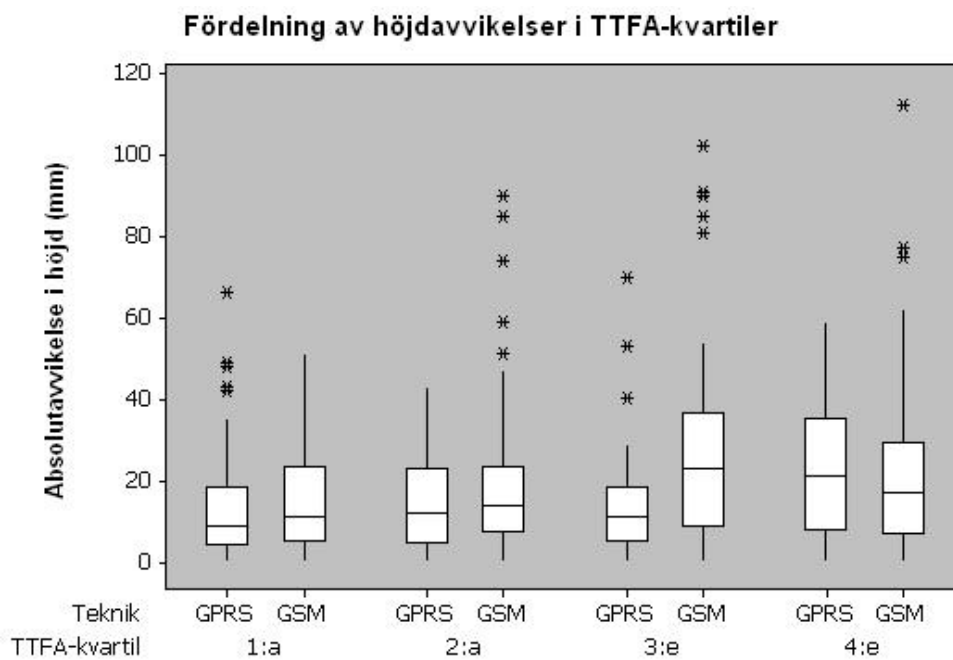
Tabell 7.15: Planavvikelse i mm för korta respektive långa initialiseringstider.

|        | GSM |     | GPRS |     |
|--------|-----|-----|------|-----|
|        | 68% | 95% | 68%  | 95% |
| TTFA < | 11  | 21  | 11   | 33  |
| TTFA > | 18  | 40  | 13   | 36  |





Figur 7.18: Höjdavvikelser som funktion av initialiseringstider för respektive teknik.



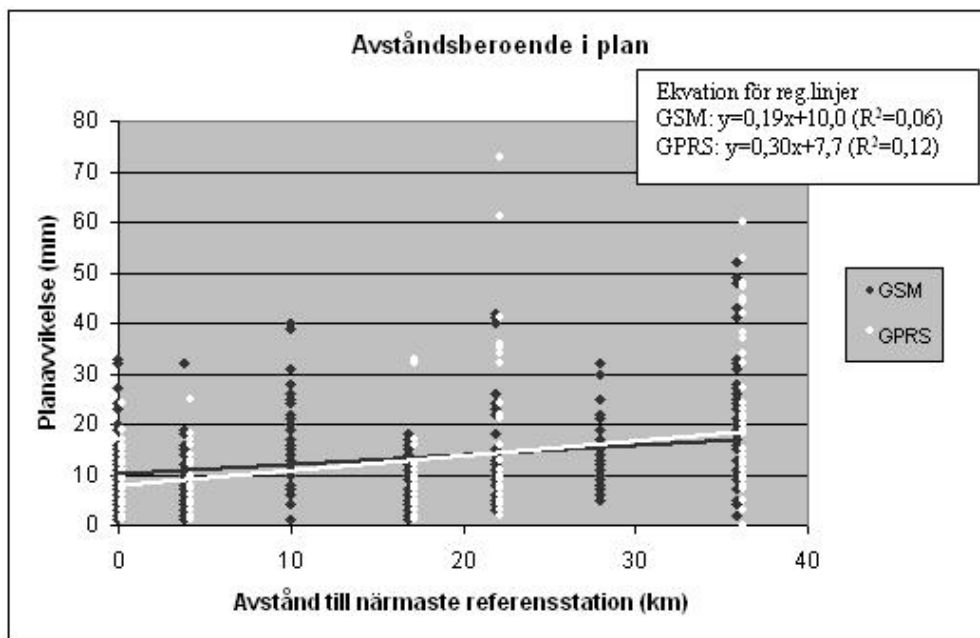
Figur 7.19: Höjdavvikelser som funktion av initialiseringstider (tider till fixlösning, uppdelade i kvartiler).

Tabell 7.16: Höjdavvikelser i mm för korta respektive långa initialiseringstider.

|        | GSM |     | GPRS |     |
|--------|-----|-----|------|-----|
|        | 68% | 95% | 68%  | 95% |
| TTFA < | 20  | 43  | 16   | 35  |
| TTFA > | 28  | 62  | 22   | 50  |

### 7.7.3 Avstånd till närmaste referensstation

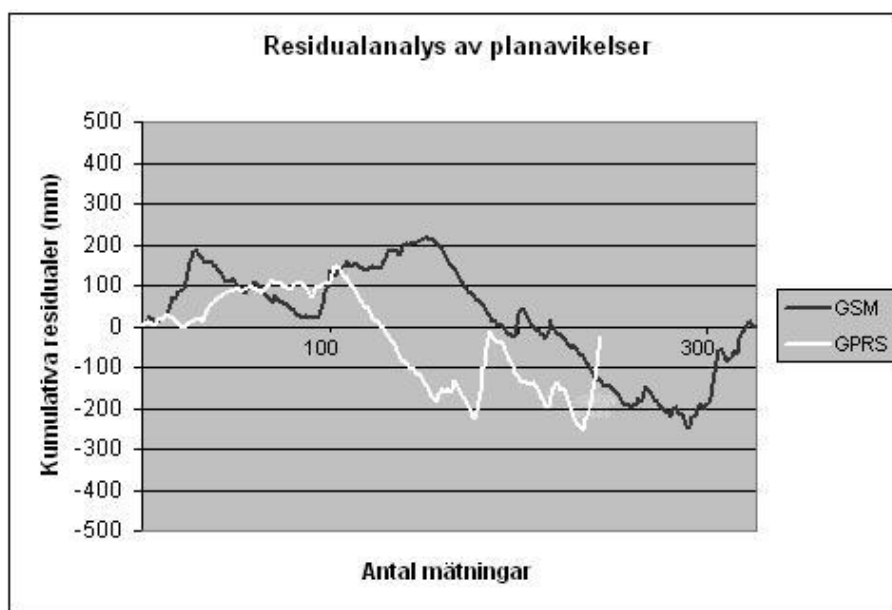
Avståndet till närmaste referensstation (dvs. GPS-mottagare med känd position) är en kritisk faktor för enkelstations-RTK. Avståndsberoendet vid positionering med nätverks-RTK är mindre klarlagt. Diskussion av detta har skett i samband med etableringsprojekt och studier av nätverks-RTK i SWEPOS (t.ex. Alm & Munsin 2003, Kempe 2004 och Wiklund 2004). Jonsson & Nordling (2003) har även signifikansprövat avståndskorrelationen. Gemensamt för dessa studier är att man utgått från en linjär regressionsanalys. En sådan analys redovisas här nedan i form av vanligt korrelationstest, kompletterat med residualanalys för att utvärdera den linjära modellen. Diagrammen i figur 7.21 och 7.23 visar de kumulativa residualerna i plan och höjd från respektive regressionsmodell, dvs. summan av avstånden i y-led mellan varje observation och regressionskurvan. Om observationerna approximativt överensstämmer med den linjära modellen bör de kumulativa residualerna variera icke-systematiskt kring noll.



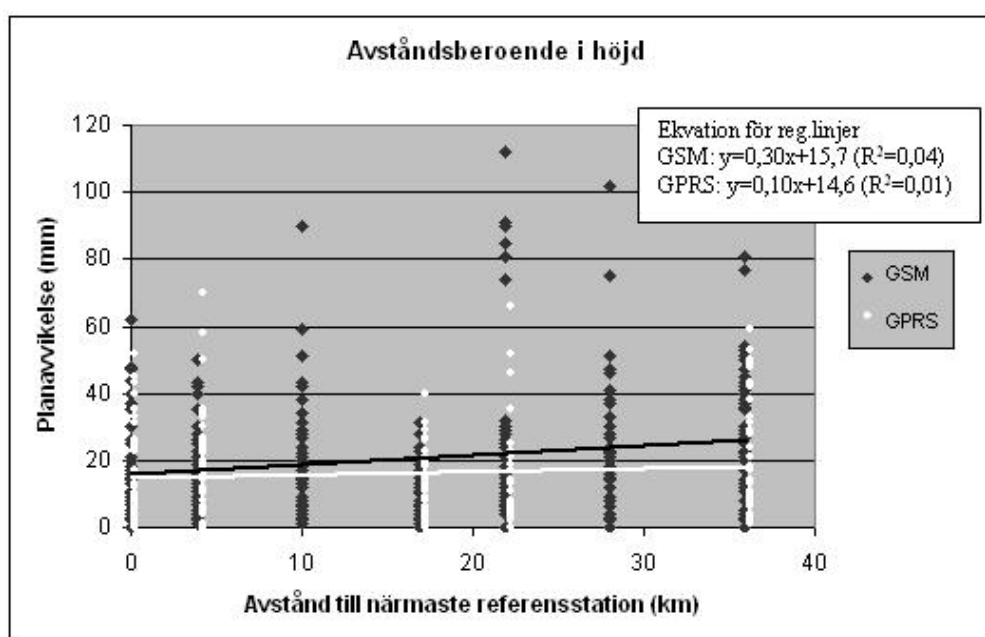
Figur 7.20: Planavvikelser som funktion av avstånd till referensstation.

Tabell 7.17 Korrelation mellan planavvikelser och avstånd till närmaste referensstation,  $H_0: \rho = 0$

|                   |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall      | P      |
|-------------------|----------|--------|------------------------------|--------|
| GSM<br>(n = 326)  | Pearson  | 0,25   | $[0,14 \leq \rho \leq 0,35]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,20   | $[0,09 \leq \rho \leq 0,30]$ | <0,001 |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,35   | $[0,23 \leq \rho \leq 0,45]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,22   | $[0,10 \leq \rho \leq 0,34]$ | <0,001 |



Figur 7.21: Kumulativsumma av residualer från regressionen i figur 7.20.



Figur 7.22: Höjdavvikelser som funktion av avstånd till referensstation.

Tabell 7.18 Korrelation mellan höjdavvikelser och avstånd till närmaste referensstation,  $H_0: \rho = 0$

|                   |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall  | P      |
|-------------------|----------|--------|--------------------------|--------|
| GSM<br>(n = 326)  | Pearson  | 0,19   | [0,08 ≤ $\rho$ ≤ 0,29 ]  | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,17   | [0,06 ≤ $\rho$ ≤ 0,27]   | 0,002  |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,09   | [-0,03 ≤ $\rho$ ≤ 0,22 ] | 0,148  |
|                   | Spearman | 0,06   | [-0,06 ≤ $\rho$ ≤ 0,18]  | 0,342  |



Figur 7.23 Kumulativsumma av residualer från regressionen i figur 7.22.

## 7.7.4 Satellitförhållanden

Antalet satelliter och deras konfiguration i förhållande till rovern påverkar noggrannheten i positionsbestämningen. Minst fem gemensamma satelliter mellan referens och rover är nödvändigt för att kunna lösa periodobekanta "on-the-fly" i RTK. I fältstudien användes dock inte färre än sex satelliter för godkänd mätning. Diskussion av satellitantalets betydelse för noggrannheten har skett i samband med SWEPOS-studier (Johansson 2004 och Kempe 2004). Korrelationstest av sambandet mellan plan-/höjdavvikelser och antalet satelliter redovisas i tabellerna 7.19 och 7.21, men detta skall tolkas med stor försiktighet eftersom satellitantalet är en diskret variabel. Korrelationstest har även utförts för att se hur väl plan- och höjdavvikelser förutsågs av RDOP-tal. RDOP är ett mått på

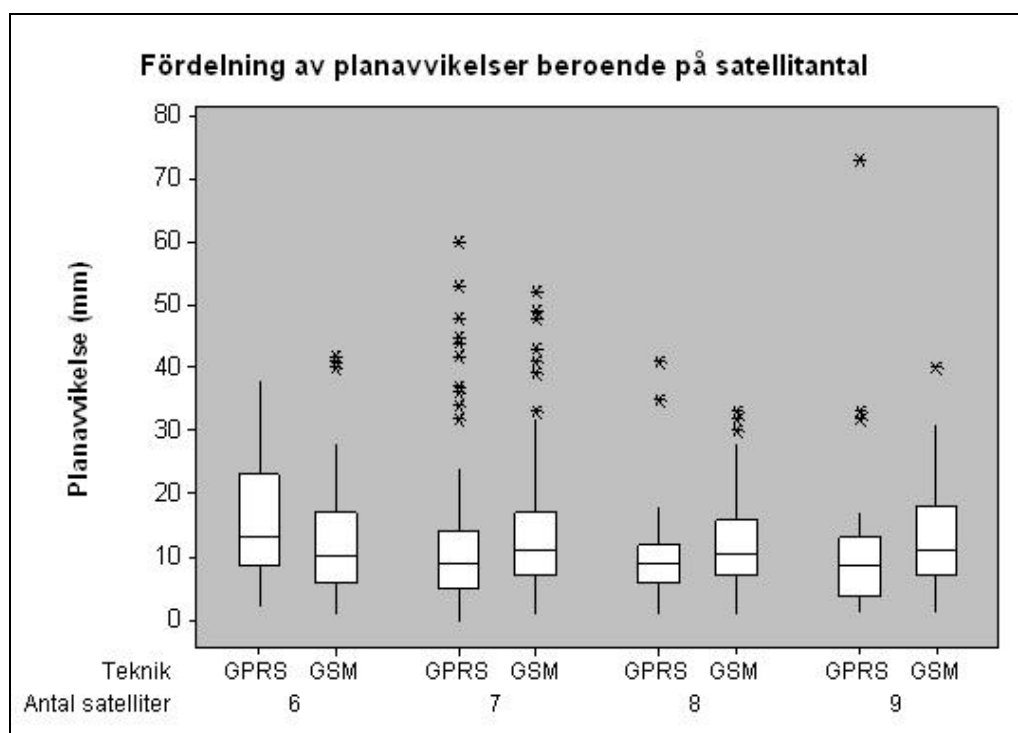
satellitgeometrins inverkan på osäkerheten vid dubbel-differensbildning och loggades i fältdatorn vid mätning.

Tabell 7.19: Korrelation mellan planavvikelse och satellitantal,  $H_0: \rho = 0$

|                 |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall       | P     |
|-----------------|----------|--------|-------------------------------|-------|
| GSM<br>(n=316)  | Pearson  | -0,01  | $[-0,12 \leq \rho \leq 0,10]$ | 0,839 |
|                 | Spearman | 0,01   | $[-0,10 \leq \rho \leq 0,12]$ | 0,905 |
| GPRS<br>(n=244) | Pearson  | 0,03   | $[-0,10 \leq \rho \leq 0,15]$ | 0,642 |
|                 | Spearman | -0,07  | $[-0,19 \leq \rho \leq 0,06]$ | 0,306 |

Tabell 7.20: Korrelation mellan planavvikelse och RDOP,  $H_0: \rho = 0$

|                 |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall       | P     |
|-----------------|----------|--------|-------------------------------|-------|
| GSM<br>(n=316)  | Pearson  | -0,03  | $[-0,14 \leq \rho \leq 0,08]$ | 0,647 |
|                 | Spearman | -0,02  | $[-0,13 \leq \rho \leq 0,09]$ | 0,689 |
| GPRS<br>(n=244) | Pearson  | 0,06   | $[-0,07 \leq \rho \leq 0,18]$ | 0,346 |
|                 | Spearman | 0,07   | $[-0,06 \leq \rho \leq 0,19]$ | 0,277 |



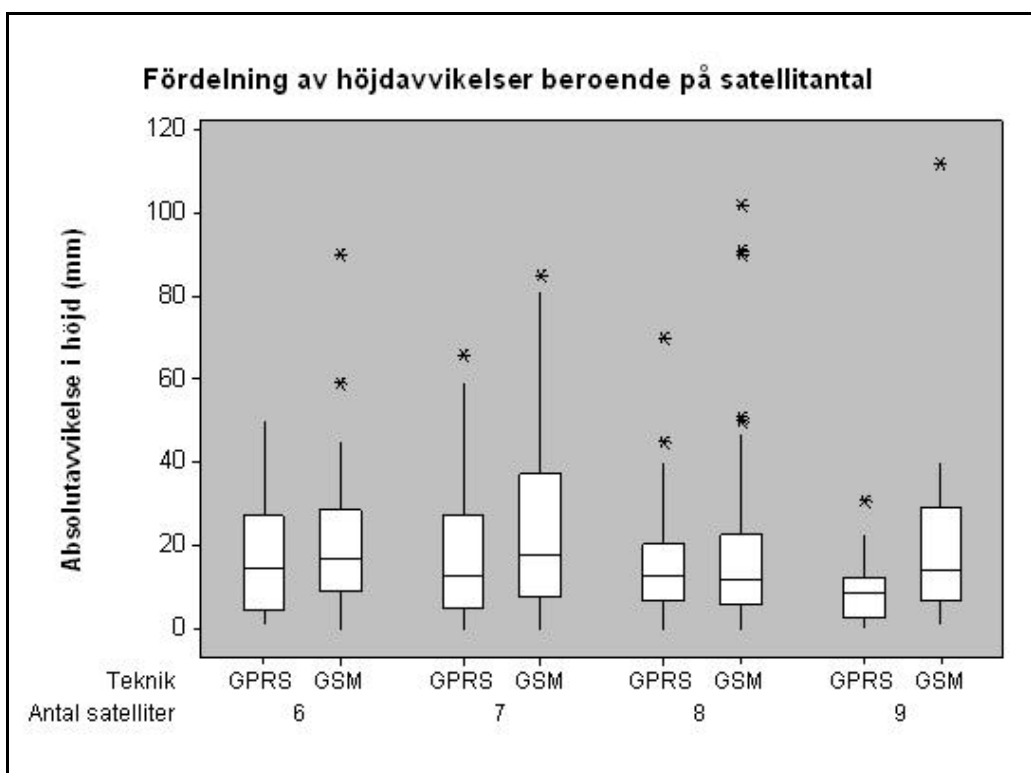
Figur 7.24: Fördelning av planavvikelse för olika satellitantal och teknik.

Tabell 7.21: Korrelation mellan höjdavvikelser och satellitantal,  $H_0: \rho = 0$

|                 |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall       | P     |
|-----------------|----------|--------|-------------------------------|-------|
| GSM<br>(n=326)  | Pearson  | -0,05  | $[-0,16 \leq \rho \leq 0,06]$ | 0,348 |
|                 | Spearman | -0,09  | $[-0,20 \leq \rho \leq 0,02]$ | 0,096 |
| GPRS<br>(n=245) | Pearson  | 0,14   | $[-0,26 \leq \rho \leq 0,01]$ | 0,031 |
|                 | Spearman | 0,13   | $[-0,26 \leq \rho \leq 0,01]$ | 0,036 |

Tabell 7.22: Korrelation mellan höjdavvikelser och RDOP,  $H_0: \rho = 0$

|                 |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall       | P     |
|-----------------|----------|--------|-------------------------------|-------|
| GSM<br>(n=316)  | Pearson  | -0,06  | $[-0,16 \leq \rho \leq 0,06]$ | 0,326 |
|                 | Spearman | -0,02  | $[-0,13 \leq \rho \leq 0,09]$ | 0,700 |
| GPRS<br>(n=244) | Pearson  | 0,06   | $[-0,06 \leq \rho \leq 0,19]$ | 0,317 |
|                 | Spearman | 0,06   | $[-0,07 \leq \rho \leq 0,18]$ | 0,370 |



Figur 7.25: Fördelning av höjdavvikelser för olika satellitantal och teknik.

## 7.7.5 Kvalitetstal

GPS-mottagaren Trimble 5700 visar interna kvalitetstal för horisontell respektive vertikal komponent, vilka är tänkta som mått på noggrannhet/precision i positionsbestämningen.

Korrelationskoefficienter för sambandet mellan GPS-mottagarens interna kvalitetstal och faktiska avvikelser har uppskattats och signifikansprövats, vilket redovisas i tabellerna 7.23-7.25. I figur 7.26 visar spridningsdiagrammet differensen mellan internt kvalitetstal i plan/höjd och sann plan-/höjdavvikelse (dvs. kvalitetstalet minus avvikelser) för varje mätning. Tabell 7.26 visar därefter hur dessa differenser fördelar sig i olika kvadranter, vilket beror på huruvida respektive differens i plan (dX) och höjd (dY) är positiv eller negativ.

Tabell 7.23: Korrelation mellan planavvikelser och horisontella kvalitetstal,  $H_0: \rho = 0$

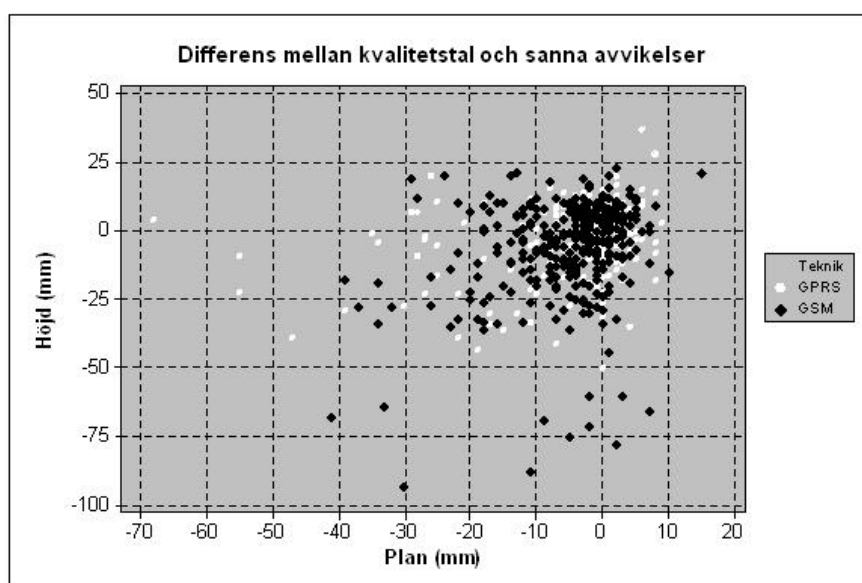
|                   |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall      | P      |
|-------------------|----------|--------|------------------------------|--------|
| GSM<br>(n = 316)  | Pearson  | 0,42   | $[0,32 \leq \rho \leq 0,51]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,36   | $[0,26 \leq \rho \leq 0,45]$ | <0,001 |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,34   | $0,22 \leq \rho \leq 0,44]$  | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,25   | $[0,13 \leq \rho \leq 0,37]$ | <0,001 |

Tabell 7.24: Korrelation mellan höjdavvikelser och vertikala kvalitetstal,  $H_0: \rho = 0$

|                   |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall      | P      |
|-------------------|----------|--------|------------------------------|--------|
| GSM<br>(n = 316)  | Pearson  | 0,21   | $[0,10 \leq \rho \leq 0,31]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,18   | $[0,07 \leq \rho \leq 0,28]$ | 0,001  |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,37   | $[0,25 \leq \rho \leq 0,47]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,24   | $[0,12 \leq \rho \leq 0,36]$ | <0,001 |

Tabell 7.25: Korrelation mellan horisontella och vertikala kvalitetstal,  $H_0: \rho = 0$

|                   |          | $\rho$ | 95 % konfidensintervall      | P      |
|-------------------|----------|--------|------------------------------|--------|
| GSM<br>(n = 316)  | Pearson  | 0,84   | $[0,80 \leq \rho \leq 0,87]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,76   | $[0,71 \leq \rho \leq 0,80]$ | <0,001 |
| GPRS<br>(n = 245) | Pearson  | 0,95   | $[0,93 \leq \rho \leq 0,96]$ | <0,001 |
|                   | Spearman | 0,92   | $[0,90 \leq \rho \leq 0,94]$ | <0,001 |



Figur 7.26 Kvalitetstal minus avvikelse i plan respektive höjd.

Tabell 7.26: Fördelning av differenser i figur 5.26

| Kvadrant *             | GSM   | GPRS  |
|------------------------|-------|-------|
| 1 ( $dX > 0, dY > 0$ ) | 15,3% | 19,3% |
| 2 ( $dX > 0, dY < 0$ ) | 10,8% | 12,3% |
| 3 ( $dX < 0, dY < 0$ ) | 47,2% | 38,2% |
| 4 ( $dX < 0, dY > 0$ ) | 26,7% | 30,2% |

\*  $dX$ =differens i plan,  $dY$ =differens i höjd

## 7.7.6 Autokorrelation

Den inbördes korrelationen i varje par av mätserier (GSM följt av GPRS, eller vice versa) har uppskattats med hjälp av autokorrelationsfunktionen (se kap. 6.4.4.2). Signifikansprövning av korrelationskoefficienten för respektive rumskomponent har därefter utförts för de tre första observationsförskjutningarna, vilket redovisas i tabell 7.27 med autokorrelationskoefficient och sannolikhet för felaktigt förkastad nollhypotes (dvs. korrelationen noll). Motsvarande analys har även skett med GSM-mätningarna på punkt 3 och 6, men där endast för det första observationsintervallet p.g.a. den större osäkerheten (tabell 7.28).



Tabell 5.27: Test av autokorrelation i rumskomponenter för punkterna 1, 2, 4, 5 och 7 ( $H_0: \rho_k = 0$ ).

|         |   | Latitud  |       | Longitud |       | Höjd     |       |       |
|---------|---|----------|-------|----------|-------|----------|-------|-------|
| Serie   | k | $\rho_k$ | P     | $\rho_k$ | P     | $\rho_k$ | P     |       |
| Punkt 1 | 1 | 1        | 0,47  | 0,024    | 0,38  | 0,053    | 0,35  | 0,066 |
|         |   | 2        | 0,05  | 0,430    | -0,04 | 0,567    | -0,22 | 0,802 |
|         |   | 3        | -0,38 | 0,916    | -0,15 | 0,732    | -0,45 | 0,949 |
|         | 2 | 1        | 0,74  | 0,002    | 0,27  | 0,125    | 0,48  | 0,023 |
|         |   | 2        | 0,55  | 0,052    | 0,53  | 0,020    | 0,51  | 0,038 |
|         |   | 3        | 0,51  | 0,092    | 0,34  | 0,129    | 0,26  | 0,211 |
|         | 3 | 1        | 0,48  | 0,026    | 0,37  | 0,064    | 0,22  | 0,178 |
|         |   | 2        | 0,05  | 0,426    | 0,04  | 0,437    | -0,37 | 0,928 |
|         |   | 3        | -0,09 | 0,627    | 0,17  | 0,259    | -0,16 | 0,722 |
|         | 4 | 1        | 0,66  | 0,006    | 0,15  | 0,262    | 0,43  | 0,042 |
|         |   | 2        | 0,26  | 0,218    | 0,29  | 0,126    | 0,21  | 0,232 |
|         |   | 3        | 0,07  | 0,414    | 0,10  | 0,351    | 0,01  | 0,484 |
|         | 5 | 1        | 0,69  | 0,004    | 0,30  | 0,102    | 0,11  | 0,322 |
|         |   | 2        | 0,54  | 0,056    | -0,23 | 0,817    | -0,17 | 0,762 |
|         |   | 3        | 0,40  | 0,148    | 0,15  | 0,281    | -0,05 | 0,586 |
| Punkt 2 | 1 | 1        | 0,22  | 0,168    | 0,43  | 0,035    | 0,26  | 0,127 |
|         |   | 2        | -0,06 | 0,605    | 0,13  | 0,319    | 0,19  | 0,223 |
|         |   | 3        | -0,25 | 0,853    | 0,07  | 0,395    | 0,11  | 0,326 |
|         | 2 | 1        | 0,23  | 0,176    | 0,46  | 0,033    | -0,13 | 0,705 |
|         |   | 2        | -0,08 | 0,627    | 0,11  | 0,347    | -0,07 | 0,616 |
|         |   | 3        | 0,15  | 0,282    | 0,09  | 0,380    | 0,18  | 0,229 |
|         | 3 | 1        | -0,37 | 0,938    | -0,15 | 0,735    | 0,23  | 0,168 |
|         |   | 2        | 0,12  | 0,329    | 0,04  | 0,434    | -0,23 | 0,822 |
|         |   | 3        | -0,08 | 0,616    | -0,18 | 0,774    | -0,40 | 0,936 |
|         | 4 | 1        | 0,02  | 0,461    | 0,82  | 0,001    | 0,61  | 0,007 |
|         |   | 2        | -0,16 | 0,760    | 0,63  | 0,041    | 0,49  | 0,057 |
|         |   | 3        | 0,30  | 0,107    | 0,48  | 0,123    | 0,37  | 0,143 |
|         | 5 | 1        | 0,50  | 0,021    | 0,70  | 0,003    | -0,08 | 0,635 |
|         |   | 2        | 0,20  | 0,250    | 0,63  | 0,035    | -0,30 | 0,891 |
|         |   | 3        | 0,11  | 0,358    | 0,42  | 0,141    | -0,34 | 0,904 |

Tabell 5.27 forts.

| Serie   | k | Latitud |       | Longitud |       | Höjd   |       |       |
|---------|---|---------|-------|----------|-------|--------|-------|-------|
|         |   | $\rho$  | P     | $\rho$   | P     | $\rho$ | P     |       |
| Punkt 4 | 1 | 1       | 0,64  | 0,008    | 0,67  | 0,006  | 0,17  | 0,238 |
|         |   | 2       | 0,23  | 0,241    | 0,37  | 0,134  | -0,35 | 0,918 |
|         |   | 3       | 0,05  | 0,437    | 0,08  | 0,411  | -0,05 | 0,570 |
|         | 2 | 1       | 0,48  | 0,029    | 0,25  | 0,157  | 0,52  | 0,021 |
|         |   | 2       | 0,43  | 0,074    | -0,06 | 0,593  | 0,16  | 0,298 |
|         |   | 3       | 0,30  | 0,183    | -0,04 | 0,570  | -0,36 | 0,876 |
|         | 3 | 1       | 0,46  | 0,027    | 0,35  | 0,068  | 0,25  | 0,141 |
|         |   | 2       | 0,27  | 0,168    | 0,35  | 0,089  | 0,22  | 0,180 |
|         |   | 3       | 0,01  | 0,480    | 0,07  | 0,399  | -0,08 | 0,627 |
|         | 4 | 1       | 0,58  | 0,011    | 0,61  | 0,008  | 0,37  | 0,062 |
|         |   | 2       | 0,45  | 0,075    | 0,43  | 0,087  | 0,21  | 0,212 |
|         |   | 3       | 0,20  | 0,275    | 0,21  | 0,275  | -0,01 | 0,520 |
|         | 5 | 1       | 0,35  | 0,067    | 0,43  | 0,034  | 0,24  | 0,147 |
|         |   | 2       | 0,00  | 0,508    | -0,07 | 0,597  | -0,25 | 0,853 |
|         |   | 3       | -0,15 | 0,725    | -0,09 | 0,631  | -0,27 | 0,855 |
| Punkt 5 | 1 | 1       | 0,38  | 0,067    | 0,51  | 0,027  | 0,60  | 0,012 |
|         |   | 2       | 0,06  | 0,422    | 0,38  | 0,113  | 0,43  | 0,097 |
|         |   | 3       | -0,10 | 0,634    | 0,23  | 0,244  | 0,19  | 0,299 |
|         | 2 | 1       | 0,63  | 0,007    | 0,64  | 0,006  | 0,34  | 0,076 |
|         |   | 2       | 0,12  | 0,354    | 0,33  | 0,152  | -0,02 | 0,539 |
|         |   | 3       | -0,25 | 0,785    | -0,04 | 0,547  | -0,23 | 0,810 |
|         | 3 | 1       | 0,54  | 0,016    | 0,45  | 0,032  | -0,04 | 0,570 |
|         |   | 2       | 0,25  | 0,204    | -0,13 | 0,681  | 0,19  | 0,206 |
|         |   | 3       | 0,02  | 0,469    | -0,40 | 0,917  | -0,38 | 0,934 |
|         | 4 | 1       | 0,58  | 0,016    | 0,48  | 0,033  | 0,73  | 0,005 |
|         |   | 2       | 0,61  | 0,035    | 0,46  | 0,071  | 0,52  | 0,078 |
|         |   | 3       | 0,29  | 0,224    | 0,29  | 0,202  | 0,33  | 0,204 |
|         | 5 | 1       | 0,24  | 0,156    | 0,38  | 0,057  | 0,70  | 0,004 |
|         |   | 2       | -0,04 | 0,563    | 0,39  | 0,077  | 0,35  | 0,148 |
|         |   | 3       | -0,14 | 0,719    | 0,21  | 0,238  | 0,11  | 0,376 |

Tabell 5.27 forts.

|         |   | Latitud |       | Longitud |       | Höjd   |       |       |
|---------|---|---------|-------|----------|-------|--------|-------|-------|
| Serie   | k | $\rho$  | P     | $\rho$   | P     | $\rho$ | P     |       |
| Punkt 7 | 1 | 1       | 0,59  | 0,010    | 0,28  | 0,118  | -0,31 | 0,903 |
|         |   | 2       | 0,51  | 0,054    | -0,21 | 0,799  | -0,21 | 0,794 |
|         |   | 3       | 0,30  | 0,196    | -0,15 | 0,711  | 0,17  | 0,262 |
|         | 2 | 1       | 0,28  | 0,12     | 0,33  | 0,078  | 0,45  | 0,029 |
|         |   | 2       | -0,10 | 0,66     | 0,19  | 0,229  | 0,28  | 0,156 |
|         |   | 3       | 0,03  | 0,45     | 0,00  | 0,508  | 0,27  | 0,177 |
|         | 3 | 1       | 0,55  | 0,014    | 0,76  | 0,002  | 0,86  | 0,001 |
|         |   | 2       | 0,02  | 0,473    | 0,51  | 0,073  | 0,67  | 0,041 |
|         |   | 3       | -0,10 | 0,635    | 0,37  | 0,173  | 0,45  | 0,150 |
|         | 4 | 1       | 0,65  | 0,005    | 0,51  | 0,017  | 0,58  | 0,009 |
|         |   | 2       | 0,42  | 0,091    | 0,38  | 0,094  | 0,47  | 0,060 |
|         |   | 3       | 0,23  | 0,246    | -0,08 | 0,609  | 0,06  | 0,426 |
|         | 5 | 1       | 0,68  | 0,004    | 0,59  | 0,008  | 0,43  | 0,036 |
|         |   | 2       | 0,45  | 0,081    | 0,25  | 0,206  | 0,04  | 0,441 |
|         |   | 3       | 0,37  | 0,147    | 0,00  | 0,500  | -0,06 | 0,597 |

Tabell 5.28: Test av autokorrelation i rumskomponenter för punkterna 3 och 6 ( $H_0: \rho_1 = 0$ ).

|         |   | Latitud |       | Longitud |       | Höjd   |       |
|---------|---|---------|-------|----------|-------|--------|-------|
| Serie   | k | $\rho$  | P     | $\rho$   | P     | $\rho$ | P     |
| Punkt 3 | 1 | 0,18    | 0,292 | 0,42     | 0,112 | 0,45   | 0,095 |
|         | 2 | -0,10   | 0,614 | -0,18    | 0,700 | 0,53   | 0,079 |
|         | 3 | 0,21    | 0,267 | 0,35     | 0,148 | 0,52   | 0,069 |
|         | 4 | 0,24    | 0,232 | -0,32    | 0,831 | -0,37  | 0,862 |
|         | 5 | 0,16    | 0,315 | 0,24     | 0,232 | -0,61  | 0,955 |
| Punkt 6 | 1 | 0,37    | 0,140 | 0,53     | 0,066 | 0,56   | 0,058 |
|         | 2 | -0,02   | 0,527 | -0,01    | 0,508 | -0,56  | 0,902 |
|         | 3 | 0,68    | 0,031 | 0,46     | 0,091 | 0,23   | 0,243 |
|         | 4 | -0,12   | 0,639 | 0,13     | 0,351 | 0,42   | 0,126 |
|         | 5 | 0,36    | 0,142 | 0,23     | 0,246 | 0,18   | 0,289 |

## 8 DISKUSSION

Syftet med detta arbete har varit att göra en kvalitativ jämförelse av två distributionstekniker för SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst: befintlig GSM-överföring och alternativ GPRS-överföring. Från ett slutanvändarperspektiv eftersträvas framför allt hög noggrannhet, tillgänglighet och integritet, enkelt nyttjande och låga kostnader. Diskussionen av resultaten gäller först och främst jämförelsen av de två distributionsteknikerna utifrån dessa aspekter. I detta kapitel diskuteras även generella frågor kring positionsbestämning med nätverks-RTK, samt förslag till fortsatta studier på området.

### 8.1 GPRS-täckning och tillgänglighet

På alla sju punkter i testnätet har mätningar med de två teknikerna GSM och GPRS utförts, dock med undantag för punkt 3 i Mårtsbo och punkt 6 längs väg 76 mellan Älvkarleby och avtagsvägen till Nöttö (Karlholmsbruk). Vid dessa punkter uppstod stora problem vid GPRS-överföring. I samband med den första mätserien registrerades ett fåtal mätningar vid punkt 6, dock med långa initialiseringstider. De allra flesta försöken ledde emellertid till att mätningarna fick avbrytas eftersom fixlösning inte uppnåddes inom fem minuter. Därefter gjordes alltid inledande försök med GPRS på dessa två punkter, men det visade sig att problemen kvarstod trots att försöken utfördes vid varierande tidpunkter på dygnet och vid olika väder- och satellitförhållanden.

Kompletterande mätningar utfördes i februari 2005 för att konstatera att/om problemen vid punkt 3 och 6 kvarstod. Under sommaren 2004 då mätningarna utfördes fanns NTRIP endast implementerat hos Trimble, men nu har även Leica en Ntrip-klient inbyggd i sin nya GPS-mottagare Leica GPS 1200. Leica-mottagaren konfigurerades för GPRS-överföring, men tyvärr skedde upprepade avbrott i kommunikationen med NtripCastern vid testtillfället. GPS-mottagaren användes trots detta för vanlig GSM-överföring eftersom ålder på mottagen referensdata kan kontrolleras. GSM-länkens kvalitet vid punkt 3 och 6 var något sämre än vid punkt 2 och 5 (som testades för jämförelse). Tidsfördröjningen var mellan två och fyra sekunder för samtliga punkter, dock utan noterbara skillnader för problempunkterna.

GSM/GPRS-operatören har konsulterats i frågan. I mars 2005 genomförde Telia testmätningar av GPRS-trafiken i den aktuella regionen (Telia 2005). Punkt 3 är belägen i kuperad halvöppen skogsterräng i närheten av Mårtsbo, i en miljö där man kan vänta sig radio/mobil-skugga. Närområdet till Mårtsbo visade sig mycket

riktigt ha dålig GPRS-täckning (med svaga signaler och kort räckvidd) vid testmätning, vilket skulle förklara problemen vid den punkten. Vid Nöttö/Karlholmsbruk konstaterades däremot inga problem med GPRS-kommunikation i jämförelse med kretskopplad GSM. Telia har inte heller upptäckt några fel i området när man undersökt den mobiltrafik som loggats under hösten. Det finns ingen uppenbar anledning att misstänka lokalt dåliga mottagningsförhållanden precis vid punkt 6. Punkten är markerad på ett mindre hygge ett fåtal meter från väg 76, på förhållandevis kort avstånd från allmän bebyggelse och dessutom bara några kilometer från punkt 5 där GPRS-överföring fungerade utmärkt - i en snarlik miljö.

Eventuella begränsningar när det gäller mobilutrustning eller GPRS-nät är svåra att påvisa, men är förstås viktiga för en korrekt utvärdering av överföringstekniken. Vid Telias test utnyttjades nya GPRS-mobiler. I lite äldre mobiltelefoner, som Ericsson T39, sker allokeringen av tidsluckor på ett annat sätt, vilket skulle kunna medföra fördröjningar i framför allt nerlänk, dvs. från cell till mobil (Telia 2005). Begränsningar i nätet beror i första hand på att datasamtal har lägre prioritet än röstsamtal, samt att antalet samtidiga användare kopplade till en specifik basstation begränsar den enskilda GPRS-kapaciteten. Överföringshastigheten påverkas också av signalstyrkan. Vid svagare signal används ett s.k. kodningsschema med lägre datahastighet för säkrare dataöverföring (Chen et al. 2004).

Vidare finns det frågetecken kring hur TCP-kopplingar fungerar över GPRS. TCP är det mest populära protokollet för hantering av pakettransporten över Internet och överlagras av protokoll på applikationsnivå, t.ex. HTTP och NTRIP (Yan 2004). TCP är dock huvudsakligen utvecklat och anpassat för fasta Internetförbindelser, och har därför egenskaper som kan medföra vissa problem vid trådlös dataöverföring. T.ex. visar TCP ibland en tendens att orsaka köbildning, vilket för större datamängder kan medföra fördröjningar på uppemot 30 sekunder innan länken är "rensad" (Chakravorty et al. 2002). Jämförande studier av TCP-överföring via GSM respektive GPRS antyder att TCP samverkar bra med det radiolänksprotokoll som används i GSM, också vid dåliga signalförhållanden, men att den ovan nämnda resursallokeringen och dåligt optimerad bufferhantering av data medför försämrad prestanda för GPRS (Wennström 2004).

Mobilutrustningen har antagligen viss betydelse för dataöverföringen eftersom antalet tillgängliga kanaler i upp- respektive nerlänk skiljer sig åt mellan olika mobilmodeller. Praktiska studier har visat på relativt varierande bandbredd med GPRS-telefoner som utnyttjar 3+1 tidsluckor, exempelvis Ericsson T39, med maximalt 1,5 KB/s i upplänk och drygt 4 KB/s i nerlänk.

Paketfördröjningar kan i typfallet vara på drygt en halv sekund i nerlänk, men fördröjningar på mellan en och tre sekunder förekommer (Chakravorty & Pratt 2002). Peterzons (2004) fördröjningstest av RTCM-meddelanden via GPRS gav tider på i genomsnitt ca 3 sekunder från SWEPOS till BKG:s NtripCaster i Frankfurt och tillbaka, vilket är ungefär dubbelt så lång tid som för fasta LAN-förbindelser.

Resultaten från fältmätningarna antyder att flaskhalsen framför allt gäller mottagning av RTCM-data (nerlänk) eftersom de flesta försöken med GPRS-överföring vid punkt 3 och 6 gav flytlösning, även om tiderna var långa. Viss fördröjning vid uppkopplingen mot SWEPOS kunde dock konstateras vid några tillfällen, särskilt vid punkt 3.

GPRS-länken har i vissa studier också visat sig vara något instabil i jämförelse med vanlig GSM när rovern rör sig snabbt, främst på grund av upprepade omkopplingar mellan basstationer (Chen et al. 2004). Det har dock visat sig att länkbortfall på 5-40 sekunder kan förekomma också under stationära förhållanden, även vid måttligt försämrade mottagningsförhållanden (Chakravorty et al. 2002). Även om paketförluster är relativt sällsynta i det stationära fallet så kan en sådan fördröjning orsaka avsevärda problem. Exempelvis har Trimble-mottagarens initialiseringsalgoritm en tidsspärr som gör att initialiseringen avbryts om RTCM-data är äldre än tio sekunder (Arrhén 2004). Dessutom krävs en relativt hög uppdateringsfrekvens för lösning av periodobekanta, särskilt vid långa baslinjer. Periodbortfall och flervägsfel är lokalrelaterade problem som kan medföra långa "normala" initialiseringstider och relativt stora datamängder i förhållande till vanliga GPRS-tillämpningar.

Om en eller flera av ovannämnda faktorer orsakar en okontrollerad fördröjning i dataöverföringen med GPRS, kan det medföra att en tidsbegränsad applikation som nätverks-RTK misslyckas (för vidare diskussion, se Hada et al. 2000). En intressant detalj är att initialiseringstiderna vid vanlig GSM-överföring är mer spridda för mätningarna på punkterna 3 och 6 i jämförelse med övriga punkter (se figurerna 7.8 och 7.11). På motsvarande sätt tycks goda satellit- och radiomottagningsförhållanden (t.ex. vid punkt 4) medföra liten spridning av initialiseringstider vid GSM-överföring, vilket korrelerar med liten spridning vid GPRS-överföring. Lokala faktorer, framför allt GSM-skugga och störda satellitsignaler, kan därför antas vara en starkt bidragande orsak till kommunikationsproblemen vid punkterna 3 och 6, men att det huvudsakliga problemet troligen är TCP-implementeringen för GPRS-länken.

Frågetecknen för GPRS-överföring av GNSS-data verkar alltså framför allt gälla tillgängligheten. Det är därför viktigt att den aktuella mobiloperatören tydligt kan specificera GPRS-funktionaliteten. Om kommunikationsproblem uppstår godtyckligt

kan inte GPRS-överföring rekommenderas vid produktionsmätning. Tekniken måste vara tillgänglig och tillförlitlig på alla platser där GSM-täckning finns om den ska kunna anses som ett fullgott alternativ. Som användare av en positioneringstjänst kan man dock omöjligen erbjudas en absolut garanti för tillgänglighet. Vid distribution via mobilt Internet saknas i regel praktisk möjlighet att kontrollera den väg som datapaketet går från driftcentral till användare och omvänt, än mindre möjlighet att utlova "minimi-överföring" (Stöcker 2004). Lägg därtill täckningsfrågan så framstår tillgängligheten som den i dagsläget största nackdelen när det gäller distribution via mobilt Internet.

Möjligen är detta ett problem som kommer att avhjälpas i och med den planerade utbyggnaden av GSM-nätet i kombination med s.k. EDGE-teknik (som förbättrar GPRS-kapaciteten). Introduktionen av 3:e generationens mobiltelefoni (UMTS) kommer dock troligen inte att förbättra situationen på de platser där man redan idag har täckningsproblem. RTK-rovers bör ändå kunna utrustas med 3G-modem för att dra nytta av större överföringshastigheter i mån av 3G-täckning, med möjlighet att växla till GSM-nätet. Ett annat distributionsalternativ som för närvarande undersöks för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst är satellittelefoni, vilket framför allt är intressant i områden där inget GSM-nät finns tillgängligt.

När det gäller VRS-tekniken som idag används vid SWEPOS nätverks-RTK-tjänst innebär de mindre datamängderna i RTCM 3.0 att GPRS på sikt kan erbjuda påtagliga fördelar gentemot traditionell GSM-överföring vad gäller kostnaden, men också i fråga om tillgänglighet eftersom den minskade datamängden ökar räckvidden för GPRS-kommunikation. I fallet SWEPOS bör vidare samtal kring detta ske med aktuella mobiloperatörer.

## 8.2 Jämförelse av mätkvalitet

Ett grundantagande för kvalitetsjämförelsen mellan GSM- och GPRS-distribution är att de koordinater som mätts in statistiskt är korrekta, i alla fall att de ytterst små fel som kan tänkas förekomma inte påverkar kvalitetsmåten i någon större utsträckning. Detta antagande gör att vi lättare kan analysera mätresultaten och ringa in specifika felkällor.

En viktig frågeställning gäller i vilken utsträckning kvalitetsjämförelsen påverkas av att GPRS-mätningar inte kunde utföras vid två av punkterna. Vilken betydelse har detta för avvikelsefördelningar och kvalitetsmått? På motsvarande sätt kan man konstatera att GSM- och GPRS-mätningar utnyttjade icke-identiska data och fråga sig vilka konsekvenser detta har för en jämförelse.

Det ideala hade förstås varit att utföra simultanmätningar med två GPS-mottagare av samma modell (Schneider & Schöffel 2004), vilket skulle möjliggöra en djupare analys av hur skillnader i överföringskapacitet mellan teknikerna påverkar observationerna med nätverks-RTK. Ju fler oberoende mätningar som utförts med varje teknik under skiftande förhållanden, desto mer statistiskt tillförlitligt är naturligtvis resultatet. Det stora antalet mätserier, 25 stycken med GPRS-överföring, får anses vara ett gott underlag för en jämförelse och kompenserar åtminstone delvis bortfallet av mätningar. Att lokala förhållanden vid punkterna påverkar felfördelningen råder det dock inget tvivel om. Detta gör det extra viktigt att komplettera en sammanställning av mätfelen med analys av enskilda punkter.

### 8.2.1 Avvikelser i plan och höjd

Resultaten visar att GPRS-distribution inte medför någon kvalitativ försämring av positionsbestämningen i jämförelse med befintlig GSM-distribution.

För latitud- och longitudkomponenterna är medelavvikelser och precision i det närmaste identiska för GPRS- och GSM-mätning, och därmed också noggrannheten i plan. Detta gäller samtliga mätlokaler, med undantag för punkt 5 som uppvisar viss skillnad i spridning och systematiska avvikelser p.g.a. enstaka avvikande mätserier. Hypotesprövning av varianser och medelvärdesskillnad bekräftar också att mätningar med respektive teknik ger statistiskt likvärdig noggrannhet i plan. GPRS-mätningarna uppvisar dock en mer distinkt skillnad mellan små och stora avvikelser, vilket bl.a. syns i tabell 7.2 där 68 %-avvikelsen i plan är mindre - men 95 %-avvikelsen större - jämfört med GSM-mätningarna.

I höjd framstår GPRS-mätningarna som något bättre än GSM-mätningarna. Hypotesprövning visar här på signifikant skillnad mellan varianserna, samt att den förväntade avvikelsen (medelvärdet) är större vid GSM-mätning. Här kan man konstatera att ett antal mätserier vid punkterna 5-7 har relativt stora negativa avvikelser, vilket fått genomslag i totalstatistiken och fått mätningarna med GSM att framstå som något sämre än vad som i själva verket är fallet. Exempelvis ligger 95%-värdet i höjd på 51 mm, vilket kan jämföras med 44 mm för Jonsson & Nordling (2003) med samma mätutrustning och metod.

Mätningarna vid punkt 1 och 2 uppvisar systematiskt positiva avvikelser i höjd för både GPRS- och GSM-överföring (med identiska medelavvikelser på 12 mm respektive 17 mm). Denna trend kan ses för i stort sett samtliga mätserier vid punkterna, men är särskilt noterbar vid punkt 2 där precisionen i höjd är förhållandevis god. En möjlig orsak kan vara att de sanna värden som bestämts via två



statiska mätningar med efterberäkning (Engfeldt et al 2002) är något oprecisa i höjd. De systematiskt positiva avvikelserna vid punkterna 1-3 medför att den totala medelavvikelsen i höjd för GSM-mätningar ligger nära noll, medan den för GPRS-mätningar ligger på 7 mm (vilket utifrån antagandet ovan skulle vara ett mer korrekt resultat).

Fördelningsanalysen visar att spridningen för båda tekniker är större (dvs. sämre precision) i latitud- än i longitudkomponent. Med tanke på den sämre satellittäckningen i nord-syd är detta ett väntat resultat som överensstämmer med andra studier av nätverks-RTK på nordliga breddgrader (Kjørsvik 2002, Chen et al. 2004, Häkli 2004).

Man kan vidare notera systematiska avvikelser från normalfördelningshypotesen. I de flesta fall tenderar fördelningarna att vara symmetriska, vilket är mest tydligt för plankomponenterna vid GPRS-mätning (figur 7.15). Detta innebär att andelen positiva och negativa avvikelser av samma storlek är ungefär lika stora. Men man ser också att sannolikhetsfunktionerna är mer "toppiga" än i normalfördelningsfallet, dvs. att små till medelstora fel dominerar i fördelningen (även synligt i form av höga excessvärden i tabell 7.11). Likaså tenderar de största felen att vara oproportionellt många, som en följd av starkt korrelerade mätningar inom enskilda mätserier (se kap. 8.3).

Slutsatsen blir därför att felfördelningen inte är slumpmässig, vilket måste beaktas i fortsatt analys. Resultaten visar också en relativt hög korrelation mellan absoluta plan- och höjdvavikelser, vilket blir särskilt tydligt om man studerar storleken på positionsförändringarna (bilaga II) under varje par av mätserier. Stora plandifferenser mellan två mätningar tenderar alltså att korrelera med stora höjddifferenser och vice versa. Denna trend är tydlig för båda teknikerna.

Sammanfattningsvis verkar nätverks-RTK i SWEPOS med GPRS-distribution vara helt jämförbar med befintlig teknik med avseende på noggrannheten. Detta är också i överensstämmelse med Schneider & Schöffel (2004), som erhöll RMS-värden på 14 och 18 mm i plan respektive höjd för såväl GPRS ("NTRIP") som GSM vid oberoende positionsbestämningar med tre minuter långa observationer. Övriga jämförelser med denna studie bör dock ske med viss försiktighet, eftersom den skedde under helt skilda lokal- och kommunikationsförhållanden, med annan utrustning, och med annan korrektionsdata (RTCM-meddelandetyper 20 och 21 med FKP, dvs. omkodat meddelande 59).

## 8.2.2 Initialiseringstider

Vad gäller initialiseringstiderna så kan vi förvänta oss en skillnad mellan GSM och GPRS i och med att dataöverföringen sker på olika vis. Tyvärr användes inte samma data för de båda teknikerna. Hade en extra GPS-mottagare funnits att tillgå hade det varit möjligt att via en antennsplitter utföra simultanmätningar på samma data, men så var inte fallet. Studien hade förstås varit mer relevant i ett sådant fall, men i och med att mätningarna med de olika teknikerna utförts med så pass korta tidsintervall får jämförelserna ändå anses godtagbara.

Vid ett flertal tillfällen avbröts uppkopplingsförsöket mot driftledningscentralen (se tabell 7.1). När så skedde gjordes nya försök att koppla upp ända tills det lyckades. Hela 28,6 % av alla GSM-uppringningar misslyckades. Motsvarande siffra för GPRS var 4,9 %. Klar fördel för GPRS alltså i och med att detta är något som kan upplevas ganska irriterande.

Här ligger problemet förmodligen i upplänk. Vad gäller GSM kan det i det här fallet vara så att ingen reserverad kanal fanns tillgänglig just i den stunden när data skulle skickas. En annan möjlig orsak är att modemmet helt enkelt var tillfälligt ur funktion. Något som kan förklara den lägre frekvensen för GPRS är att när dataöverföringen stöter på problem (vid exempelvis de tillfällen då kapaciteten är nedsatt på grund av många samtidigt användare anslutna till den aktuella basstationen) så görs försök att skicka data ända till dess bekräftelse från mottagaren erhållits.

Av alla utförda mätningar lyckades inte koordinater lagras varje gång. Detta inträffade i regel i två olika situationer. I det ena fallet lyckades initialiseringen men koordinater hann inte registreras innan fixlösningen förlorades. Detta skedde endast ett fåtal gånger vid GSM-mätning (2,3 %) och aldrig vid mätning med GPRS, vilket troligtvis är en ren tillfällighet. I det andra fallet uppnåddes inte fixlösning inom den uppsatta gränsen på 300 sekunder. Vid dessa tillfällen avbröts uppkopplingsförsöket och nästa mätning inleddes. Till skillnad från tidigare nämnda problem (avbrutna uppkopplingsförsök) ligger begränsningen nu i nerlänk. Men orsakerna är antagligen desamma.

Tidiga analyser av nätverks-RTK med VRS-teknik (Vollath et al. 2000) antydde att tiden för on-the-fly-initialiseringar vid långa baslinjer halverades i jämförelse med enkelstations-RTK, vilket därefter bekräftats i ett flertal studier (ex. Jonsson & Nordling 2003). I den här fältstudien har tiden till fixlösning mätts från uppringningen av SWEPOS-driften till fixlösning av roverpositionen. För GPRS-tekniken inkluderar detta även nedladdning av källtabell och val av korrektionsdatatyp. Alternativet att istället mäta tiden från flyt- till fixlösning har liten praktisk betydelse. Som framgår av tabell 7.7 är

tiden till flytlösning i stort sett konstant, dock med 15-20 sekunder kortare tider för GPRS än med GSM.

Vid över 70 % av mätningarna med GSM är initialiseringstiden vid "kallstart" på mellan 58 till 68 sekunder. Spridningen är större för GPRS vid samtliga punkter. Minst spridning och kortaste tider för båda teknikerna uppmättes vid punkt 4, som befinner sig i öppen terräng i tätortsmiljö. Som tidigare nämnts är spridningen av tider vid GSM-överföring störst för problempunkterna 3 och 6. Den största spridningen vid fungerande GPRS-överföring förekommer vid punkterna 1, 5 och 7. Noterbart är att den relativa spridningen i fixtid mellan olika punkter verkar vara densamma för båda distributionsteknikerna, med undantag för punkt 5 (p.g.a. av en GPRS-serie med ovanligt långa tider), vilket antyder att initialiseringstiderna påverkas av lokala förhållanden.

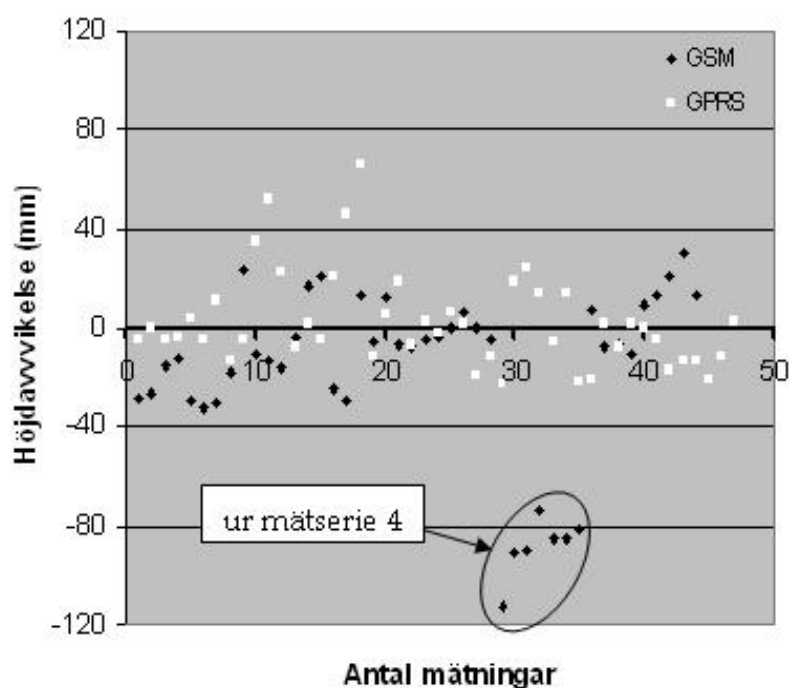
Korta tider till flytlösning med GPRS tyder på att uppringningen till SWEPOS-driften går snabbt, men att de förhållandevis stora datamängderna i nerlänk (5-10 gånger större än i upplänk) medför att den efterföljande tiden till fixlösning tar längre tid än med GSM. Större typvärde och spridning av fixtider för mer avlägset belägna punkter kan anas i figurerna 7.8 och 7.11, men uppenbarligen har lokalberoende faktorer minst lika stor betydelse. Exempelvis befinner sig punkt 1 endast ett hundratal meter från närmaste referensstation och med förmodat goda mottagningsförhållanden för mobilkommunikation.

## **8.3 Problematiska mätserier och autokorrelation**

Av alla mätserier gjorda i projektet (35 för GSM och 25 för GPRS, med tio mätningar i varje) är det några som utmärker sig genom att nästan alla mätningar i dessa serier uppvisar relativt stora avvikelser från det sanna värdet. Som nämnts ovan påverkar detta i högsta grad fördelningen av avvikelser, och kan därmed också försvåra statistisk analys, t.ex. signifikansprövning och lokalisering av grova fel. Liknande observationer har även gjorts i tidigare SWEPOS-studier, även om de inte har analyserats i detalj. Exempelvis konstaterar Kempe (2004) " ... någon form av systematiska avvikelser mellan de olika mätserierna". I detta avsnitt förs en diskussion om orsakerna utifrån ett par exempel på avvikande mätserier.

### **8.3.1 Två exempel**

Vi tar två mätserier som exempel: punkt 5, fjärde mätserien med GSM (som avviker i höjd, se figur 8.1) samt punkt 7, femte mätserien med GPRS (som avviker i såväl plan som höjd, se figur 8.3).



Figur 8.1: Avvikande mätserie i höjd för GSM vid punkt 5.

Tabell 8.1: Avvikelser i plan och höjd, samt data som registrerats i fältdatorn för varje mätning (t.ex. GPS-mottagarens kvalitetstal och ett RMS-värde för koordinaternas interna precision) med GSM vid punkt 5, mätserie 4.

| dLat (mm) | dLong (mm) | dHöjd (mm) | Kv.tal i plan (mm) | Kv.tal i höjd (mm) | RMS (mm) | RDOP | Antal satelliter | Tid till fixlösning (s) |
|-----------|------------|------------|--------------------|--------------------|----------|------|------------------|-------------------------|
| -4        | -24        | 0          | 10                 | 20                 | 7        | 1,81 | 10               | 78                      |
| -7        | -22        | -5         | 8                  | 15                 | 7        | 1,76 | 10               | -                       |
| -         | -          | -          | -                  | -                  | -        | -    | -                | -                       |
| -29       | 27         | -112       | 10                 | 19                 | 7        | 1,27 | 9                | 117                     |
| -4        | 4          | -91        | 13                 | 25                 | 10       | 2,11 | 8                | 66                      |
| -2        | 5          | -90        | 7                  | 12                 | 4        | 1,20 | 8                | 60                      |
| 4         | 8          | -74        | 7                  | 14                 | 4        | 1,46 | 7                | 59                      |
| -8        | 1          | -85        | 6                  | 14                 | 4        | 2,82 | 7                | 59                      |
| -9        | 0          | -85        | 4                  | 10                 | 1        | 2,00 | 7                | 60                      |
| -13       | 7          | -81        | 5                  | 12                 | 1        | 2,84 | 7                | 60                      |

I den förstnämnda serien kan de två första mätningarna anses ha normalstora höjdavvikelser. Vid den tredje mätningen kunde inga koordinater lagras p.g.a. att tidsgränsen på fem minuter för fixlösning överskreds. Därefter är resterande sju mätningar av betydligt sämre kvalitet. Höjdvärdena avviker allihop från det sanna värdet med 74 mm eller mer. Dessutom har de alla en negativ avvikelse, vilket gör att man kan misstänka systematiskt fel.

Felaktig mätning av antennhöjd vid centrering av stativet skulle kunna vara en tänkbar felkälla. Lutande höjd mättes med tumstock från markerad punkt till översidan av jordplanet på GPS-antennen, vilket kan vara svårt att göra entydigt. Men alla mätningar i serien skulle då förväntas ha ungefär lika stora fel i höjd, även de två första. Dessutom skulle serien med GPRS som mättes på samma centrering uppvisa motsvarande avvikelser, vilket inte är fallet.

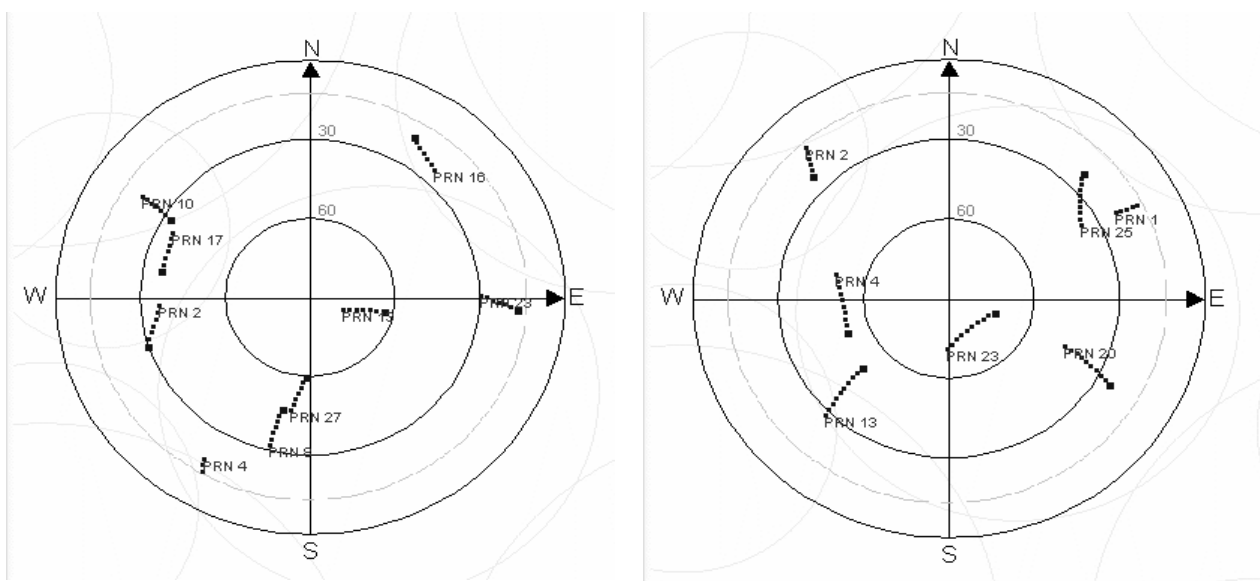
Figur 8.2 visar den ungefärliga satellitgeometrin under det tidsintervall som mätningarna utfördes. Vi ser totalt nio satelliter som är relativt väl spridda över himlen men också att många av dem under hela tidsintervallet befann sig på låga elevationer (nära elevationsmasken på 13 grader). RDOP är som tidigare nämnts ett mått på satellitgeometrins inverkan på precisionen vid dubbeldifferensbildning och bör i teorin vara lågt för god positionsnoggrannhet. För denna serie är RDOP-talen dock inte på något sätt utmärkande i förhållande till andra serier med bättre noggrannhet. Det är till och med så att de största avvikelserna har de lägsta RDOP-talen, p.g.a. av den goda spridningen av satelliter.

Trots detta säger erfarenheten att satelliter med låga elevationer kan innebära problem vid RTK-mätning, eftersom den längre vägen genom atmosfären medför försvagade signaler och även orsakar flervägsfel och fascentrumvariationer. Normalt brukar man ta hänsyn till detta genom viktning av avståndsmätningen beroende på satellitens elevationsvinkel (Collins & Langley 1999).

Registrerade data visar att mottagaren till en början spårar tio satelliter, men att något därefter sker som medför att den tredje mätningen misslyckas, dvs. överskrider maximal fixtid. Till den fjärde mätningen har noggrannheten försämrats avsevärt och mottagaren har förlorat kontakten med en satellit (alternativt kan två ha tappats, men en tillkommit). Denna mätning har också en betydligt längre initialiseringstid än i normalfallet (nästan två minuter). Därefter sjunker antalet satelliter till sju stycken, med fortsatt dålig noggrannhet vid mätningarna men med stabila initialiseringstider kring en minut. Sex stycken misslyckade uppkopplingar noterades under den här serien, vilket är mer än genomsnittet och antyder att mottagningsförhållandena inte var optimala.

RMS-värdet anger den interna precisionen för de positioner som ligger till grund för de lagrade koordinatvärdena, avlästa under tre sekunder. Normalt ligger detta värde på ett fåtal millimeter, vilket återspeglar liten variation under det korta tidsintervallet.

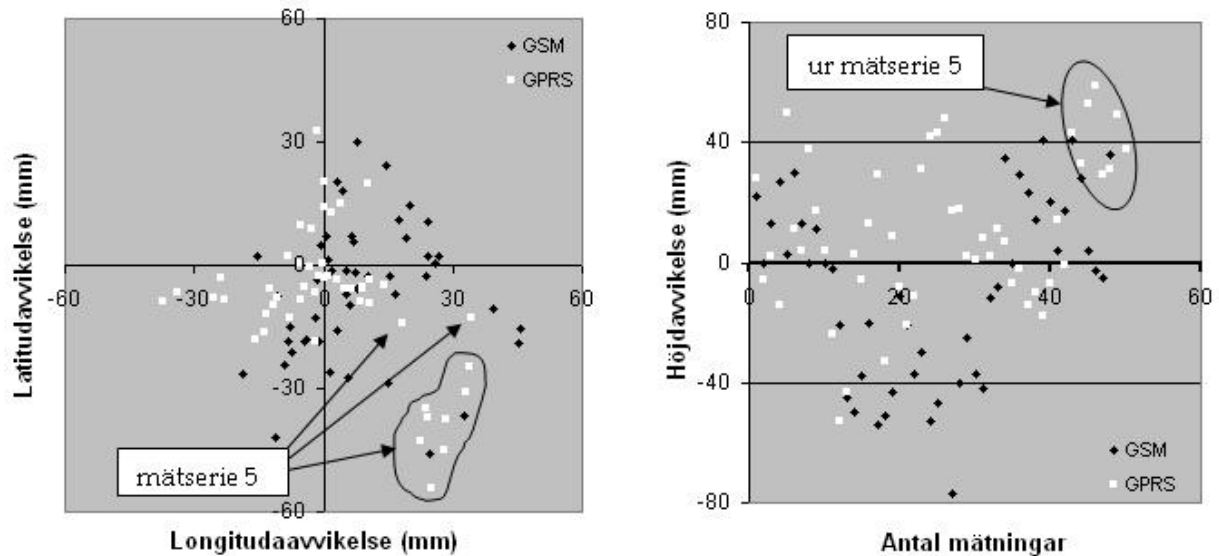
Fixlösningens RMS-värden är möjligen något större för de första mätningarna men knappast anmärkningsvärda. På samma sätt är mottagarens kvalitetstal aningen större för de första mätningarna, men är därefter normalstora. I övrigt är inget utmärkande för denna mätserie, som dessutom har god noggrannhet i plan.



Figur 8.2: Skyplot för punkt 5 serie 4 (t.v.) och punkt 7 serie 5 (t.h.) som visar GPS-satelliternas ungefärliga banor över horisonten vid mättillfällena. Stor prick anger satellitpositionen vid sluttiden. Den ljusgrå linjen är elevationsmasken på  $13^\circ$ .

Av alla mätningar på punkt 7 är det framför allt en serie med GPRS som sticker ut bland övriga p.g.a. att mätningarna uppvisar stora avvikelser i plan och höjd (figur 8.3). I spridningsdiagrammet för planavvikelser ligger nästan alla mätningar från den här serien samlade i sydost i förhållande till sanna koordinater. I diagrammet över höjdavvikelser noterar vi relativt stora positiva avvikelser för åtta av tio mätningar i serien. Intressant att notera är att avvikelserna inledningsvis kvarstår i den efterföljande mätserien med GSM (se tabell 8.2). Latitudavvikelsen går plötsligt ner mot noll i och med den andra mätningen (med en initialiseringstid på nästan fem minuter) medan latitudavvikelsen i stort sett är identisk över flera mätningar.

Det finns inte heller här någon anledning att misstänka grovt fel i samband med mätningen av antennhöjd eller i centreringen över markeringen eftersom avvikelserna i början av serien är normalstora.



Figur 8.3: Avvikande mätserie i plan (t.v.) respektive höjd (t.h.) för GPRS vid punkt 7.

Detsamma gäller de sista mätningarna i den efterföljande serien med GSM (på samma uppställning). En skyplot för mättillfället (figur 6.2) visar att sju satelliter fanns tillgängliga, med förhållandevis god inbördes geometrisk konfiguration. I likhet med mätserien på punkt 5 befann sig dock några av satelliterna på låga elevationer. Vi kan exempelvis se att de systematiska höjdvikelserna börjar i samband med den tredje mätningen där en satellit tillkommer.

Initialiseringstiderna var längre än i normalfallet för nästan samtliga mätningar. Observera att vid första mätningen var tiden till fixlösning 305 sekunder. Trots att gränsen var satt till 300 sekunder accepterades detta värde och mätningen lagrades. De tre sista tiderna var "normala", men mätningarna däremot uppvisade lika stora avvikelser som föregående mätningar. Under denna mätserie noterades stora datamängder i kommunikation mellan SWEPOS-drift och rover p.g.a. av de långa initialiseringstiderna, där uppdaterade observationsdata kontinuerligt sändes till rovern.

Till skillnad från GSM-serien vid punkt 5 noterades här flera onormalt höga kvalitetstal redan i fält (se tabell 8.2), vilket visade sig korrelera med stora faktiska avvikelser. Detta var dock det enda tillfälle där stora avvikelser kunde misstänkas redan innan dataanalys.

Tabell 8.2: Avvikelse i plan och höjd, samt data som registrerats i fältdatorn för varje mätning (t.ex. GPS-mottagarens kvalitetstal och RMS-värdet för koordinaternas interna precision) med GPRS vid punkt 7, mätserie 5, samt de närmast följande mätningarna med GSM (kursiverad text).

| dLat<br>(mm) | dLong<br>(mm) | dHöjd<br>(mm) | Kv.tal<br>i plan<br>(mm) | Kv.tal<br>i höjd<br>(mm) | RMS<br>(mm) | RDOP | Antal<br>satelliter | Tid till<br>fixlösning<br>(s) |
|--------------|---------------|---------------|--------------------------|--------------------------|-------------|------|---------------------|-------------------------------|
| -38          | 28            | 14            | 21                       | 34                       | 9           | 2,87 | 7                   | 305                           |
| -14          | 18            | -1            | 7                        | 11                       | 2           | 3,13 | 6                   | 112                           |
| -13          | 34            | 43            | 19                       | 33                       | 8           | 3,00 | 7                   | 159                           |
| -25          | 34            | 33            | 21                       | 36                       | 11          | 2,18 | 7                   | 185                           |
| -31          | 33            | 53            | 15                       | 26                       | 7           | 2,21 | 7                   | 60                            |
| -35          | 24            | 59            | 20                       | 36                       | 7           | 3,18 | 7                   | 125                           |
| -43          | 22            | 29            | 14                       | 25                       | 11          | 3,21 | 7                   | 101                           |
| -54          | 25            | 31            | 5                        | 9                        | 2           | 2,28 | 7                   | 56                            |
| -45          | 28            | 49            | 6                        | 10                       | 3           | 3,21 | 7                   | 39                            |
| -37          | 24            | 38            | 5                        | 9                        | 3           | 3,17 | 7                   | 54                            |
| -46          | 25            | 41            | 13                       | 23                       | 6           | 3,11 | 7                   | 67                            |
| 1            | 26            | 20            | 13                       | 19                       | 6           | 2,40 | 8                   | 278                           |
| 15           | 20            | 4             | 9                        | 14                       | 5           | 2,43 | 8                   | 122                           |
| -2           | 24            | 17            | 12                       | 18                       | 7           | 2,45 | 8                   | 124                           |
| 2            | 27            | 41            | 13                       | 19                       | 6           | 1,88 | 7                   | 73                            |
| 2            | 24            | 28            | 15                       | 21                       | 7           | 2,68 | 7                   | 60                            |

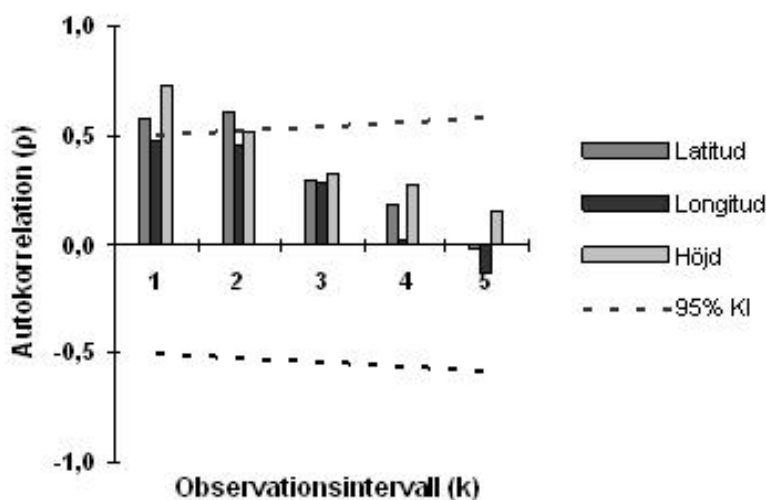
### 8.3.2 Autokorrelationen - orsaker och konsekvenser

Några uppenbara operatörsberoende grova fel kunde alltså inte konstateras när det gäller de avvikande mätserierna. En annan möjlighet som måste beaktas är felaktiga fixlösningar, p.g.a. av exempelvis de problematiska satelliterna på låga elevationer. Det som talar mot detta är att mottagaren stängdes av mellan varje mätning. Sannolikheten för att en mottagare som normalt har låg felprocent vid initialisering, t.ex. Trimble 5700, skulle misslyckas upprepade gånger över en 10-minutersperiod får anses som ganska liten.



I diagrammen över de absoluta positionsförändringarna under mätserierna (se bilaga II) kan man tydligt se att variationerna i plan och höjd mellan två mätningar i regel är mindre än 2-3 cm, ibland avbruten av snabba större positionsförändringar. Man kan alltså se en systematisk trend över ett flertal observationer, men också att den växlar mellan större och mindre avvikelser i plan och höjd. Av detta skäl visar även fördelningsanalysen på en tydlig avvikelse från normalfördelning.

Ett autokorrelationstest utfördes (se kap. 7.7.6) för att få ett mått på graden av systematik mellan mätningar som följer på varandra. För alla oavbrutna sviter av 15-20 mätningar på samma uppställning, dvs. där mätserier med respektive teknik har utförts efter varandra, kunde sannolik autokorrelation av första ordningen konstateras för minst en rumskomponent i *samtliga* mätserier utom en (punkt 2, serie 3). Dessutom kunde sannolikt andra ordningens autokorrelation observeras i drygt en tredjedel av fallen. Ett exempel ges i figur 8.4 som visar den uppskattade autokorrelationen för den mätuppställning som inkluderade den problematiska GSM-serien på punkt 5 (se kap. 8.3.1). Diagrammet visar att mätningarna är tydligt autokorrelerade för korta observationsintervall. Mest påtagligt ses detta i höjdkomponenten som visar en mycket hög autokorrelation för  $k = 1$  och därefter successivt "avklingande" korrelationskoefficienter för längre tidsperiod mellan mätningarna. Ett sådant utseende är typiskt för en autokorrelerad företeelse, vilka därför ofta kan approximeras med en avtagande exponentialfunktion (Vollath et al. 2002). Givet den genomsnittliga tiden mellan två observationer så sträcker sig den signifikanta autokorrelationen i det här fallet över en tidsperiod på 5-10 minuter.



Figur 8.4: Uppskattad autokorrelation för oavbruten svit av mätningar, i det här fallet GPRS följt av GSM (punkt 5, serie 4). Streckad linje anger 95 % konfidensintervall.

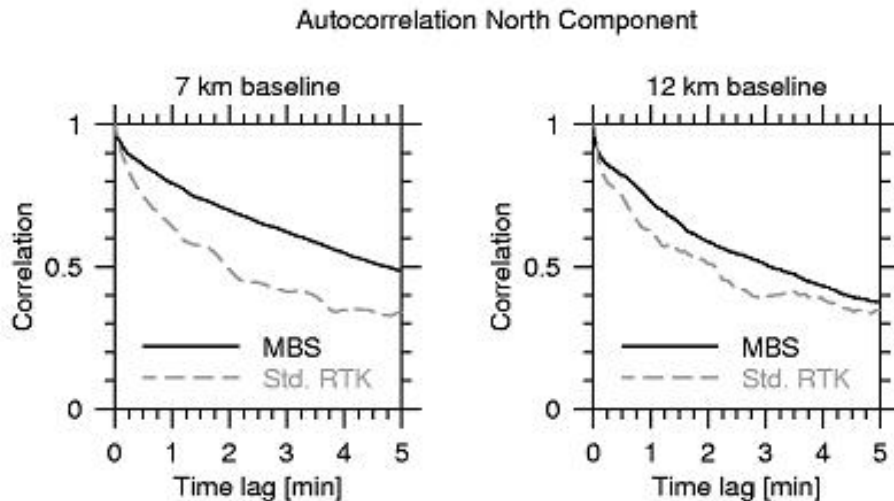
Motsvarande kan sägas gälla för övriga fall av signifikant autokorrelation enligt kap. 7.7.6, där det genomsnittliga tidsintervallet mellan två successiva mätningar som längst är fem minuter och som kortast drygt två minuter.

För att förstå orsaken till autokorrelationen så är det viktigt att analysera felkällorna i VRS- respektive enkelstationsobservationerna. GPS-observationer beskrivs vanligen med en matematisk modell. Denna kompletteras med en stokastisk modell (betecknad  $\varepsilon$  i observationsekvationerna, kap. 4.4) som beskriver observationernas statistiska egenskaper, dvs. de förväntade mätfelen. Den stokastiska feltermen omfattar t.ex. flervägsfel, mottagarbrus, och restfel från jonosfärs- och troposfärsfördröjning, och är därför beroende av hur den matematiska modellen definieras. Ett grundantagande som ofta utnyttjats i den stokastiska modelleringen är att observationerna har samma varians och är statistiskt oberoende, dvs. att de inte är korrelerade i tid och rum.

Detta visar sig dock ofta vara ett orealistiskt antagande. I normalfallet förändras visserligen de kvarvarande systematiska felen, men detta sker relativt långsamt, vilket medför tidskorrelation. Dessutom är flera felkällor (t.ex. satellitbanfel och atmosfärsfel) olika för varje satellit, vilket innebär att observationerna har olika noggrannhet/variens (Wang et al. 2002). Att inte hänsyn till både rums- och tidsaspekten vid GPS-observationer och analys/modellering kan medföra osäkerhet i positionsbestämning och kvalitetsmått. Dessa frågor har studerats av bl.a. Howind et al. (1999), Borre & Tiberius (2000), Vollath et al. (2002) och Wang et al. (2002).

Vollath et al. (2002) menar att en viktig fördel med VRS-tekniken jämfört med enkelstationslösningar är just att mätningarnas stokastiska egenskaper förändras, bl.a. genom att tidskorrelationen minskar – framför allt för jonosfären, men också för övriga systematiska felkällor. Detta påverkar bl.a. initialiseringstider och hur snabbt en hög noggrannhet kan uppnås. Man kan dock notera att Vollath et al. (2002) i sin studie huvudsakligen jämförde VRS-data med rådata från långa baslinjer (> 20 km), med andra ord på avstånd där problemen med enkelstationslösning börjar göra sig gällande. En intressant fråga är därför huruvida VRS-lösningar medför klara förbättringar för baslinjer upp till 10 km.

Kjørsvik (2002) är en av de första fältstudierna som antyder svårigheter med att erhålla tillförlitliga VRS-lösningar för något kortare baslinjer. Dessa problem yttrar sig främst som signifikant större autokorrelation för samtliga rumskomponenter (se figur 8.5), även om VRS-tekniken i stort uppvisade bättre noggrannhet och initialiseringsprocent med ökande baslinjelängd (i överensstämmelse



Figur 8.5: Uppskattad autokorrelation i nordkomponenten för VRS- ("MBS") respektive enkelstationslösningar med 1 Hz-datafångst under ett dygn (Kjørsvik, 2002). Motsvarande autokorrelation erhöles också i övriga komponenter.

med exempelvis Jonsson & Nordling 2003). Av detta dras slutsatsen att statistisk analys och uppskattning av kvalitetsmått försvåras. I värsta fall riskerar upprepade grova fel att inte upptäckas i fält.

De stokastiska egenskaperna för VRS-observationer under varierande atmosfärförhållanden har undersökts vidare av Kjørsvik (2004) i en jämförelse med vanliga enkelstations-observationer. Resultaten visade här att VRS-lösningar är jämförelsevis mindre autokorrelerade under "svårare" atmosfär, eftersom nätverksmodellen eliminerar stora delar av de systematiska jonosfärfelen. Under mer normala förhållanden var det dock svårt att se någon entydig skillnad gentemot enkelstationslösningen. Konvergenstiden till en autokorrelation på 0,5 var i samtliga fall mellan 2-7 minuter, vilket återigen överensstämmer väl med resultaten i kap. 7.7.6. Kjørsvik (2004) konstaterar också att en periodisk trend är särskilt tydlig i flera VRS-lösningar, vilket antagligen beror på att flervägsfelen dominerar restfelen efter att jonosfärskomponenten reducerats.

Förmodligen är systematiska restfel i nätverkslösningen, eller möjligen flervägsfel vid rovern, orsaken till att vissa mätserier i vår fältstudie uppvisar stora avvikelser. Detta antyder i sin tur att modelleringen av felkällorna är otillräcklig (se vidare kap. 8.4). Problemet med detta blir förstås mer påtagligt p.g.a. observationernas autokorrelation.

Konsekvenserna blir i slutändan att vi inte kan betrakta mätningarna i en enskild mätserie som oberoende. Upprepade mätningar ska normalt öka den statistiska tillförlitligheten, men autokorrelationen

medför att avvikelserna får en icke-normal fördelning för korta tidsintervall eller relativt få mätningar. Kvalitetsmåten riskerar därmed att bli missvisande och försvårar också vissa typer av jämförelser - i vårt fall mellan de två distributionsteknikerna, där dessutom olika indata användes. Det kan därför finnas anledning att se över den befintliga testmätningproceduren (se kap. 6.2) som även använts i tidigare SWEPOS-studier.

Nätverks-RTK innebär otvetydiga fördelar i förhållande till enkelstationslösningar, vilket demonstrerats i många sammanhang. Den signifikanta autokorrelationen vid VRS-tillämpningar, även för korta baslinjer, antyder dock att ytterligare studier behövs. Här nedan tas ett antal faktorer upp som på ett eller annat sätt påverkar mätkvaliteten vid VRS-tillämpningar, och som därför kan behöva särskild uppmärksamhet i kommande undersökningar.

## **8.4 Begränsande faktorer vid VRS-tillämpningar**

### **8.4.1 Nätverksmodellering**

Den nätverksprocess- och felmodellering som sker i SWEPOS är avgörande för hur precist och tillförlitligt en roverposition kan bestämmas med nätverks-RTK. Data från alla stationer används normalt för den primära atmosfärsmodelleringen. Lösning av periodobekanta i hela nätverket kan ske efter att heltalsuppskattningar från den jonosfäriska respektive den geometriska modellen återförs till ursprungliga observationerna på L1 och L2.

För att kunna lösa periodobekanta i nätverket och beräkna representativa korrektioner för VRS-positionen är det särskilt viktigt att kunna hantera jonosfärens påverkan på GPS-signalerna (Wanninger 1999, Vollath et al 2002, Chen et al. 2003). Den jonosfäriska modelleringen i GPSNet sker med en s.k. enlager-modell (eng. *single layer*). Den utgår ifrån att atmosfärens elektroninnehåll är koncentrerat till en fix höjd, där jonosfärens påverkan på signalen definieras av zenitfördröjningen och infallsvinkeln i jonosfären. Zenitfördröjningen är proportionell mot den totala elektronmängden (se även kap. 4.5.1.1) och kan beräknas med hjälp av geomagnetisk latitud och solvinkeln. Den stokastiska komponenten hanteras delvis med ett s.k. Kalman-filter (Vollath et al. 2000). Även om modellen kan minska de kvarvarande jonosfärsfelen med hälften så tenderar de kortvariga jonosfärsvariationerna att vara särskilt svårhanterliga. Om interpolationen inte kan minska restfelen under ett tröskelvärde på knappt en decimeter så kommer initialiseringsprocessen att ta betydligt längre tid för rovermottagaren (Landau et al. 2003). I GPSNet finns visserligen möjlighet till integritetskontroll (se kap.

6.1.1) av de kvarvarande jonosfärsfelen och därmed en möjlighet att förutsäga bristande noggrannhet för roverpositionen (Chen et al. 2003, Trimble 2003c), men den faktiska precisionen i korrektionsparametrarna kan i dagsläget inte förmedlas till rovern.

Normalt krävs även en god troposfärmodellering för att lösa periodobekanta i nätverket, även om detta problem inte är lika påtagligt i Sverige som vid lägre latituder (med stora bidrag från den svårbestämda "våta" troposfärskomponenten). Som diskuterats tidigare är signalpåverkan i troposfären inte dispersiv och kan alltså inte elimineras via linjärkombination av två bärvågsfrekvenser. I GPSNet uppskattas troposfärspåverkan med en s.k. modifierad Hopfield-modell. Den stokastiska variationen hanteras med skalningsparametrar som bestäms för varje station (Vollath et al. 2000). Hopfield är en erkänt god metod för att bestämma den torra zenitfördröjningen, men kan liksom andra modeller ha svårigheter med den våta fördröjningen och låga elevationsvinklar. Bristande apriori-modellering av troposfärfördröjningen kan medföra problem särskilt vid höjdbestämning av roverpositionen. Även om skalningsparametrar används så är dessa konstanter kanske inte tillräckliga för att beskriva troposfärsvariationerna över tid (Musa et al. 2004). Vidare kan roverns interna troposfärmodell bidra till ytterligare fel om VRS-baslinjen blir lång (Landau et al. 2003). Det finns alltså en viss risk för inkonsistens i modelleringen eftersom VRS-positionen inte kan förflyttas med rovern (Wübbena et al. 2001). I SWEPOS är dock nätverks-RTK-programmet konfigurerat att skapa en ny virtuell station om avståndet mellan VRS- och roverpositionen överstiger 5 km.

En annan frågeställning handlar om hur felkorrektionerna ska beräknas när väl restfelen är bestämda för baslinjerna i nätverket. I GPSNet sker linjär interpolering av korrektioner utifrån restfelen för varje station, vilka i sin tur beräknats separat med s.k. geometri- respektive jonosfärsfria kombinationer (Trimble 2003b). Uppenbart är att eventuella fel i den korrigerade VRS-positionen kommer att fortplantas till roverpositionen. Vidare kommer antalet referensstationer och deras inbördes viktning att ha viss betydelse för VRS-korrektionernas beräkning. Utifrån simulerade data har Alves et al. (2003) kommit till slutsatsen att perifera referensstationer utanför "kärnområdet" har försumbar inverkan på mätresultaten. Erfarenheten från SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst antyder dock en signifikant förbättring sedan interpolationen av korrektioner i GPSNet började göras utifrån sex referensstationer, jämfört med tidigare tre, dvs. minimiantalet (Wiklund 2004). Möjligen kan detta ha att göra med att stationsberoende fel (t.ex. flervägsfel) tas ut vid utjämningsberäkning av korrektionsparametrarna.

Slutligen kan nämnas att en principdiskussion om fördelar och nackdelar med VRS-tekniken pågått sedan en tid tillbaka, i synnerhet

utformandet av nätverkskorrektioner och hur dessa på bästa sätt ska förmedlas till användaren. Exempelvis menar Wübbena (2001) att en absolutbedömning (och därmed en absolutreduktion) av felkällorna är att föredra framför den differensbildning som annars förekommer i de flesta tillämpningar av nätverks-RTK. Problemet är i detta fall att differensbildningen i sig medför en förlust av information och att de reducerade felen är betydligt svårare att modellera, framför allt stokastiskt. T.ex. bortser man ofta från korrelationerna mellan dubbeldifferenser vid utjämningsberäkningen (Wübbena et al. 2001).

Vollath et al. (2002) och Landau et al. (2003) menar dock att VRS-lösningen är det bästa alternativet till att föra in mer information om felkällorna i RTK-algoritmerna, vilket idag är svårt att implementera i praktiken. Eftersom RTCM-standarderna hittills inte har tillåtit modellerad information, har vissa förenklingar eller speciallösningar fått tillämpas i kommersiellt etablerad nätverks-RTK, t.ex. konverterade areakorrektionsparametrar i SAPOS-fallet eller VRS-meddelandet i GPSNet, av vilka den sistnämnda anses vara något mer pålitlig (Landau et al. 2003).

## 8.4.2 Nätverkets utformning

Flera studier har visat att avstånden mellan referensstationerna i nätverket har viss betydelse för noggrannhet och initialiseringstider vid mätning med nätverks-RTK. När restfelen i atmosfärmodelleringen blir jämförbara med GPS-signalens våglängd så medför detta svårigheter för rovern att lösa periodobekanta. Avståndsberoendet i nätverks-RTK kan därför antas bero på att nätverksmodellen inte kan förutsäga atmosfären mellan referensstationer. Detta är särskilt tydligt för glesa nätverk (Engfeldt et al. 2003, Euler et al. 2004) eller vid stor jonosfärsaktivitet (Wanninger 1999, Talbot et al. 2002).

Mycket tyder på att det linjära avståndsberoendet för nätverks-RTK är mycket svagt för verkliga baslinjer (rover-referens) upp till ca 25-30 km, åtminstone beträffande noggrannheten i plan. En minskande precision (ökande spridning) kan anas för höjdavvikelser, samt successivt ökande medelvärden och spridning av initialiseringstider för längre avstånd (se kap. 7.5.2). Liknande trender kan även anas i Kempe (2004) och Wiklund (2004) där resultaten baseras på flera tusen mätningar, dock utan korrelationsanalys. Residualanalysen i kap. 7.7.3 tyder dock på ett icke-linjärt avståndsberoende för nätverks-RTK. Linjära antaganden har dock ofta varit utgångspunkten för tidigare studier med regressionsanalys (Alm & Munsin 2003, Jonsson & Nordling 2003). Ofta används ppm-värden som ett mått på avståndsberoendet i mätningssammanhang, vilket kanske bör undvikas i nätverks-RTK-fallet eftersom de antyder ett linjärt samband som troligen inte existerar.

SWEPOS nätverks-RTK-tjänst följer rekommendationerna för referensstationsseparation (Wanninger 1999, Vollath et al. 2000, Retscher 2002), dvs. typiska avstånd på 50-75 km, i undantagsfall uppemot 90-100 km. Detta är ungefär det medelavstånd där mätkvaliteten börjar försämrans märkbart, med sämre noggrannhet och längre initialiseringstider (Wanninger 1999, Häkli 2004). Referensbaslinjerna i testnätets nätverks-triangel är 54, 74 och 75 km långa och borde därför inte medföra några allmänna problem.

Avståndsberoendet är antagligen även kopplat till antalet stationer i nätverket. Ett ökat antal stationer medför ökad redundans och därmed också stabilitet i nätverksmodelleringen. Exempelvis har Häkli (2004) jämfört ett stort nätverk (16 stationer) med ett litet (4 stationer). Resultaten visar där att det lilla nätverket medför ett tydligt avståndsberoende, framför allt i höjdnoggrannhet och initialiseringstider, medan det större nätverket inte medförde några nämnvärda försämringar på ökat avstånd mellan rover-referensstation. Nätverkslösningar kan hur som helst vara att föredra även för små nätverk, särskilt vid turbulent jonosfär (Euler et al. 2003).

Flera studier tar också upp betydelsen av rovers position relativt omgivande referensstationer. Teoretiska studier antyder att en balans av referensstationer på alla sidor av rovern är en viktig faktor för god tillförlitlighet, men detta är naturligtvis beroende av hur korrektionerna genereras (Alves et al. 2003, Euler et al. 2004). I praktiken finns det dock få tecken på att detta skulle vara en betydande faktor (Häkli 2004). Exempelvis ger GPSNet möjlighet att extrapolera korrektioner för VRS-positionen. Resultaten från fältmätningarna tyder inte på att extrapolering medför någon försämring av positionsnoggrannhet, åtminstone inte på kortare avstånd än ca tio kilometer från nätverket. Som framgår av figur 6.2 så är punkt 4 belägen utanför nätverkstriangeln Gävle-Söderboda-Östervåla (och därmed utanför SWEPOS-nätet), men mätningarna har trots det god noggrannhet och korta initialiseringstider. Återigen tycks detta visa att lokalberoende felkällor som sikthinder och flervägsfel överväger i förhållande till eventuella svårigheter med linjär extrapolering vid uträkning av roverpositionen.

### **8.4.3 Rovermottagare**

Slutligen kan konstateras att även roverutrustningens specifika egenskaper påverkar mätkvalitet vid RTK-mätning, t.ex. antenntyp, samt vilka slags initialiseringsalgoritmer och signalbehandlingsmetoder som tillämpas.

Initialiseringsalgoritmen är den procedur som används för att lösa periodobekanta vid fasmätning och därigenom få den noggrannast möjliga GPS-positionen i realtid (se kap. 4.4.2). Olika metoder

beskrivs t.ex. i Wahlund (2002) men omfattar normalt en statistisk urvals- och valideringsprocedur som sker antingen i den "numeriska" heltalsdomänen eller i positionsdomänen. Viktningsförfaranden och intern atmosfärmodellering spelar här en viss roll för hur observationerna används i beräkningen.

En annan faktor är signal/brusförhållandet på olika frekvenser som skiljer sig åt mellan olika geodetiska GPS-mottagare. Detta beror på hur den interna signalhanteringen sker i mottagaren och kan t.ex. ta sig uttryck i hur väl en mottagare kan spåra satelliter på låga elevationer och hur stor korrelation som finns mellan frekvenser och mellan observationer i tid (dvs. autokorrelation). Detta kan prövas med test på korta baslinjer, vilket utförts av Amiri-Simkooei et al. (2004), bl.a. med en Trimble 5700-mottagare. Exempelvis kan den interna brusnivån variera något, medan L1/L2-korrelationen och effekterna av flervägsfel verkar vara ungefär likvärdiga för de vanligaste modellerna.

Vidare förekommer fascentrumvariationer som i regel är både elevations- och azimutberoende och kan medföra mindre avvikelser i både plan och höjd om den inte modelleras. GPSNet ger möjlighet att skicka antennspecifika meddelanden (RTCM 2.3) som kan användas för att korrigera för dessa avvikelser. Uppgifterna om antennmodeller används i detta fall för att skapa specifika elevationsberoende korrektioner i förhållande till en absolutkalibrerad referensantenn. Denna möjlighet användes dock inte under fältmätningarna, varför man kan räkna med avvikelser på millimeternivå.

Antalet gemensamma satelliter för referensstationer och rover är självklart av stor betydelse för mätkvalitet. För att lösa periodobekanta on-the-fly, dvs. när rovern är i rörelse, krävs ett minimum av fem gemensamma satelliter, men antalet möjliga satellitsignaler som kan behandlas samtidigt i mottagaren styrs av antalet kanaler. Vissa mottagare har dessutom möjlighet att mäta mot GLONASS-satelliter. Hur detta påverkar noggrannheten vid nätverks-RTK-tillämpningar är ännu oklart. Resultaten från denna och andra studier antyder att fler satelliter innebär bättre förväntad noggrannhet och mindre spridning av avvikelser – framför allt i höjd - men också att satelliter lågt över horisonten kan medföra problem med större signalbrus och stora tidskorrelerade fel. Kjørsvik (2004) konstaterar att restfelen vid RTK-mätningar är tydligt elevationsberoende under normala atmosfäriska förhållanden. Observationerna kan i dessa fall viktas som en funktion av elevation för att den stokastiska modellen ska ge goda resultat och tillförlitliga kvalitetsmått vid flyt- och fixlösning med minsta kvadratmetoden.

Att flera av dessa faktorer påverkar mätkvalitet vid RTK-tillämpningar har visats i flera sammanhang. Exempelvis har Radzeviciute et al. (2003) undersökt hur förmågan att lösa



periodobekanta och kvalitetsmåten för roverpositionen i enkelstationsfallet påverkas av baslinjelängd och graden av signalhinder i olika mottagare - och konstaterat en viss skillnad i prestanda. Mycket tyder dock på att satellitgeometri och lokalberoende felkällor har jämförelsevis mer tydlig inverkan på kvalitetsmått och initialiseringsförmåga, och att eventuella skillnader tenderar att minska avsevärt vid nätverks-RTK-tillämpningar (Jonsson & Nordling 2003, Häkli 2004).

En viktig skillnad mellan rovermottagare vid nätverks-RTK-tillämpningar kan annars vara i vilken mån de klarar av att tolka korrektionsmeddelandet (se t.ex. Engfeldt et al. 2003). Trimble 5700-mottagaren, eller Ntrip-klienten, har inga problem med att tolka RTCM-meddelandet 59 från GPSNet och kan alltså tillämpa VRS-korrektionerna såvida de inte fördröjs på vägen. Vilken initialiseringsmetod, viktningsförfarande, intern troposfärmodell osv. som utnyttjas i GPS-mottagaren är okänt för oss. Kontroll i Trimble Geomatics Office visar dock att fixlösning i samtliga fall har skett på L1, troligen eftersom baslinjen - i det här fallet mellan rovern och den virtuella referensstationen - är kortare än 5 km. Att inte en jonosfärsfri L1/L2-lösning används bör under normala förhållanden inte ha någon större betydelse i VRS-fallet. Enligt Landau et al. (2003) är L1 den approximativt bästa lösningen om jonosfärsresidualen inte är större än ett par centimeter. Dessutom är signal/brus-förhållandet ofta sämre på L2-fasen (Amiri-Simkooei et al. 2004), vilket gör att eventuella fördelar går förlorade på korta baslinjer.

## 8.5 Kvalitetstal och fältkontroll

För en användare av nätverks-RTK i fält är det viktigt att kunna förutsäga eller bedöma den förväntade noggrannheten, inte minst ett "worst-case-scenario" med upprepade stora avvikelser över en längre tid. Den påtagliga autokorrelationen över tidsperioder på flera minuter kan dock göra det svårt att utläsa den faktiska kvaliteten under pågående mätning.

Det finns i regel möjlighet att beakta DOP-tal och satellitelevationsmask genom inställningar i fältdatorns programvara. Dessutom kan tröskelvärden för den uppskattade precisionen avgöra huruvida en fixposition ska lagras eller ej. Som vi har sett i fältstudien är dock detta ingen garanti för god noggrannhet. Utöver DOP-tal är den enda indikatorn på noggrannhet det kvalitetstal som normalt anges i mottagare/fältdator. Kvalitetstalet är tillverkarspecifikt, och varierar ibland också mellan olika mottagarmodeller av samma märke. För Trimble 5700-mottagare relaterar kvalitetstalet till normal baslinjebestämning med enkelstations-RTK och anges separat i plan och höjd. Beräkningen

sker troligen utifrån faktorer som satellitkonstellation, avstånd till referensstationen och signal-brus-förhållande i mottagaren. Frågan är då hur väl kvalitetstalet återger den förväntade noggrannheten, särskilt för nätverks-RTK, där parametrering av felkällor sker utanför det vanliga enkelstationssystemet.

Det har tidigare konstaterats att GPS-mottagare ibland tenderar att vara något optimistiska i sina kvalitetsangivelser (Häkli 2004, Jensen & Jepsen 2005). Våra resultat visar visserligen signifikant korrelation mellan avvikelser och kvalitetstal, men som framgår av kap. 7.7.5 är de faktiska avvikelserna vid nätverks-RTK-mätning i denna studie i de flesta fall större än de interna kvalitetstalen antyder, i såväl plan som höjd. Den höga graden av korrelation mellan kvalitetstal i plan respektive höjd tenderar också att skymma signifikanta avvikelser i någon enskild komponent.

Resultaten antyder alltså att DOP-värden och interna kvalitetstal kan vara intetsägande - eller i värsta fall direkt missvisande - som mått på faktisk noggrannhet vid RTK-tillämpningar. Om dylika kvalitetstal är tänkt att fungera som vägledning ute i fält och kanske även användas vid kvalitetsmärkning av resultat i produktionssammanhang (Johansson 2004), finns det anledning att fråga sig: Kan man använda kompletterande information för att bättre spegla den förväntade noggrannheten?

Resultaten har också visat på mer tillförlitliga fixlösningar vid fler tillgängliga satelliter och kortare initialiseringstider. En intressant konsekvens av den större spridningen av initialiseringstiderna vid GPRS-överföring är att alla mätningar med kortare fixtid än 50 sekunder utförts med GPRS: 70 stycken. Med ett par undantag så uppvisar dessa mätningar hög noggrannhet. Korta initialiseringstider antyder snabb konvergenstid för de tidskorrelerade felen. För VRS-tekniken gäller detta främst jonosfärsresidualerna (Vollath et al. 2002), men även flervägsfelen. Korta initialiseringstider verkar alltså vara en god kvalitetsindikator, särskilt om den inte föregåtts av mätningar med ovanligt långa initialiseringstider (en och en halv minut eller längre). Detta förutsätter dock att initialiseringsalgoritmen har en låg felprocent vid fixlösning av periodobekanta, något som varierar mellan olika GPS-mottagare (< 0,01 % specificerat för Trimble 5700 vid RTK-tillämpningar; Trimble 2004).

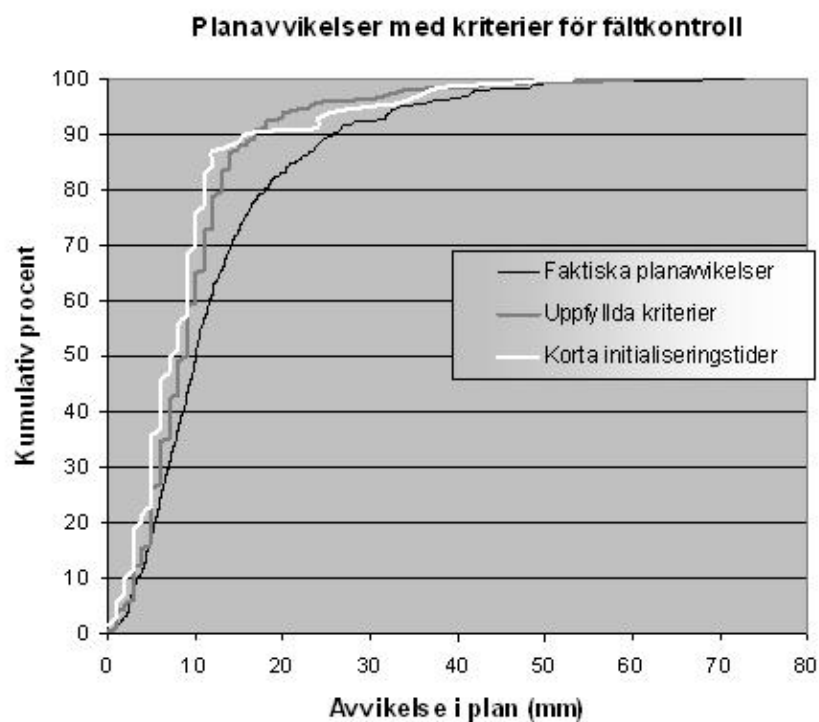
Ett hypotetiskt kvalitetsindex för fältkontroll skulle alltså kunna beakta antalet tillgängliga satelliter och initialiseringstider, utöver de kvalitetstal som anges i GPS-mottagare/fältdator. Utförda GSM/GPRS-mätningar visar att typiska gränsvärden på dessa är:

1. Kvalitetstal i plan och höjd ~ 10 respektive 20 mm
2. Antal satelliter ~ 7 stycken
3. Initialiseringstid ~ 60 sekunder

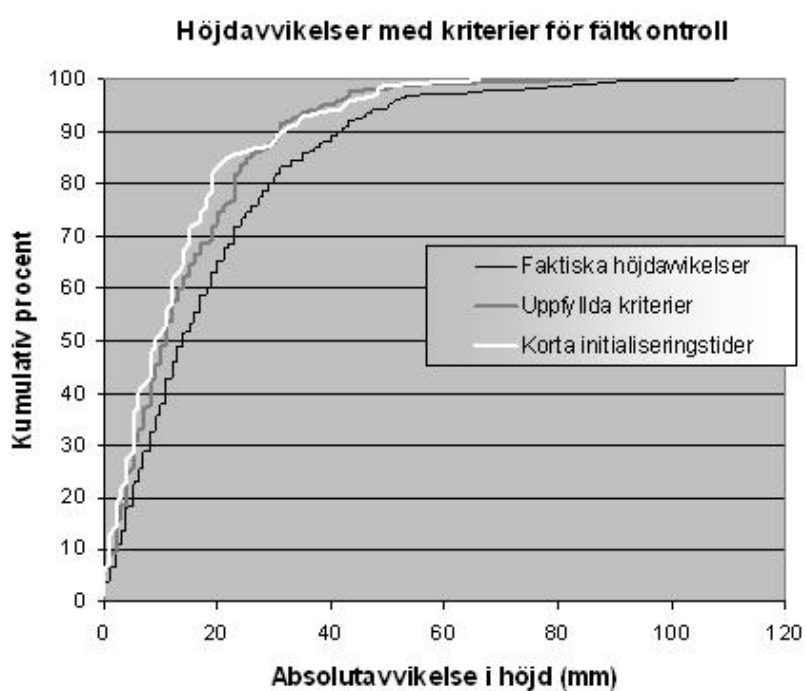
För att pröva om detta index är relevant jämför vi de faktiska absolutavvikelserna i plan respektive höjd för samtliga mätningar med de mätningar som motsvarar dessa kriterier, dvs. inte uppvisar större kvalitetstal, eller har färre satelliter eller längre initialiseringstider för fixlösning. De mätningar som uppfyller dessa kriterier motsvarar ca 35 % av alla mätningar. Dessutom jämförs de faktiska avvikelserna med avvikelserna för de GPRS-mätningar som hade de kortaste initialiseringstiderna (dvs. mindre än 50 sekunder). Dessa 70 mätningar motsvarar endast ca 12 % av alla mätningar, men får tjäna som illustration på en möjlig kvalitetsindikator. Jämförelserna i plan och höjd visas som kumulativdiagram i figur 8.6 respektive 8.7.

I såväl plan som höjd kan man se en skillnad på ca en centimeter på 95 %-nivån mellan avvikelserna för samtliga mätningar och de mätningar som uppfyllde de tre kriterierna. Man kan alltså konstatera en större säkerhet i positionsbestämningen utifrån ett kvalitetsindex av den här typen. Värt att notera är här att de korta initialiseringstiderna är en oväntat god kvalitetsindikator, upp till ca 90 %-nivån. Då ska man emellertid komma ihåg att de återstående tio procenten motsvarar de mätningar som föregåtts av de ovanligt långa initialiseringstiderna som nämndes ovan. Detta visar alltså en fördel som den potentiellt snabba överföringen med GPRS skulle kunna medföra.

Naturligtvis är just dessa resultat beroende av den specifika utrustning för GPS-mottagning och datadistribution som vi använt, men bör i princip kunna utformas på motsvarande sätt för varje enskilt fabrikat. Andra faktorer bör också vägas in i mån av betydelse. Bättre utformade analysmetoder behöver dock utvecklas för en sådan korrelationsanalys, särskilt eftersom resultaten från denna och tidigare studier visat att traditionell regressionsanalys kan vara ett ganska trubbigt instrument för att påvisa statistiska samband vid utvärdering av GPS-mätningar (se exempelvis kap 7.7.3 och 7.7.4).



Figur 8.6: Kumulativdiagram över planavvikelser, med avseende på urvalskriterium.



Figur 8.7: Kumulativdiagram över höjdavvikelser, med avseende på urvalskriterium.

## 8.6 Kostnadsanalys

Som nämnts tidigare betalar man när det gäller GSM för uppkopplad tid, till skillnad från GPRS där det är mängden överförd data som debiteras. Detta faktum gör att kostnadsfrågan blir intressant. För att få en uppfattning om prisskillnaden mellan datadistribution via GSM och datadistribution via GPRS följer här en redovisning av rörliga kostnader. Den baseras på några av de mätningar som utförts under fältdelen av detta arbete. Mätningarna har valts ut så att varje punkt (med undantag för punkt 3 och 6 där GPRS-tekniken inte fungerade) representeras av två mätserier, där varje serie består av 10 mätningar med GSM respektive GPRS. Totalt ingår alltså i analysen 100 mätningar för respektive teknik. Öppningsavgifterna redovisas men ingår inte i kostnadsberäkningen eftersom ny uppkoppling gjorts vid varje ny mätning vilket inte är normalfallet i en detaljmätningssituation.

Vid GPRS-mätning har en mobiltelefon med Telia Telematikavtal använts. Detta är ett dataabonnemang med följande priser gällande sommaren 2004 (Telia 2004):

Öppningsavgift: 0,32 kr/uppkoppling

<1 MB: 12,80 kr/MB

>1 MB: 8,80 kr/MB

Även vid GSM-mätning har Telias Telematikavtal varit det gällande abonnemanget, dock med reducerad minuttaxa genom förmånligt SWEPOS-avtal. Dessa är priserna:

Öppningsavgift: 0,20 kr/uppkoppling

0,53 kr/min

### GPRS

Från anteckningar gjorda under fältdelen av projektet beräknades den totala mängden överförd RTCM-data för de 100 mätningarna uppgå till ca 4 MB. Ingen av de individuella uppkopplingarna översteg 1 MB.

$$4 \text{ MB} \times 12,80 = 51 \text{ kr}$$

### GSM

Med hjälp av statistik på SWEPOS hemsida kunde den totala uppkopplingstiden summeras för de 100 utvalda mätningarna.

$$89,5 \text{ minuter} \times 0,53 = 47 \text{ kr}$$

Utöver detta tillkommer vid tecknande av abonnemanget i regel en inträdesavgift plus en fast avgift per månad. I dagsläget kan GSM-

abonnemang tecknas via SWEPOS (0,53 kr/minut). Diskussioner förs angående reducerade priser även för GPRS.

För det urval av mätningar som utförts under fältstudien ser vi alltså marginellt högre kostnader vid GPRS-överföring av RTCM 2.3 än vid GSM-överföring. Peterzon (2004) påpekar också att GPRS-överföring av RTCM 2.3-data är ett relativt dyrt alternativ jämfört med befintlig distribution. Vi bör dock observera att analysen *inte* är baserad på detaljmätningar gjorda under normala produktionsförhållanden. Uppkopplingen har i det här fallet endast varat den förhållandevis korta tid det tar att erhålla fixlösning samt att utföra själva mätningen. Vid detaljmätningar är man normalt uppkopplad även den tid det tar att förflytta sig mellan de tänkta mätpunkterna, dessutom utförs fler mätningar totalt sett, vilket torde medföra att GSM-kostnaden stiger i förhållande till GPRS-kostnaden. Särskilt intressant blir kanske GPRS-alternativet vid tillämpningar som kräver mer eller mindre konstant uppkoppling, t.ex. maskinstyrning i samband med vägbyggen (Johansson 2004).

Kostnaden vid överföring med GPRS grundar sig på antal sända "datapaket", deras storlek och hur ofta de sänds (Peterzon 2004). En ny version av RTCM införs troligen vid SWEPOS under våren 2005. Version 2.3 ersätts med version 3.0, som är mer kompakt än sin föregångare. Detta kommer att innebära reducerad mängd överförd data vid VRS-tillämpningar och därigenom kan GPRS inom en snar framtid bli ett konkurrenskraftigt alternativ till dataöverföring via GSM. Minskningen i datamängd tros bli ca 60 % med nya RTCM 3.0, men då ska man komma ihåg att eftersom överföringen görs via TCP/IP tillkommer å andra sidan ca 30 % (Hedling 2004).

## 8.7 Internet och användandet av NTRIP

Inga studier har hittills visat att Internet-överföring med NTRIP skulle medföra någon påtaglig försämring av noggrannhet vid nätverks-RTK-tillämpningar (se t.ex. Weber et al. 2003, Chen et al. 2004, Schneider & Schöffel 2004). Tillräckligt stor vikt har dock i regel inte lagts vid att pröva tillgängligheten för olika mobila Internet-lösningar (t.ex. GPRS) under varierande förhållanden, vilket kan ta sig uttryck i korrektionsfördröjningar och därmed uteblivna fixlösningar för roverpositionen. Detta är en särskilt viktig fråga för hur SWEPOS Nätverks-RTK-tjänst kan utnyttjas i områden med ojämn mobiltelefon-täckning.

Internet är inhomogent ifråga om fysisk uppbyggnad. Detta medför att de protokoll som används vid dataöverföring inte nödvändigtvis är optimerade för alla delar av nätverken, vilket vi sett tydliga exempel på i den här fältstudien. Ett sätt att komma runt den osäkerhet som råder gällande Internet-tillgänglighet vid GNSS-tillämpningar (Stöcker 2004) kan vara att skapa redundanta nätverk,

dvs. att Internet-kommunicerande nätverk innehåller fler noder och länkar (dvs. referensstationer och distributionskanaler) än nödvändigt och därmed klarar av enstaka avbrott eller fördröjningar.

Även om GPRS-överföring av nätverks-RTK-data i dagsläget kräver översyn och förbättring så kan däremot NTRIP anses som ett väsentligt argument för Internet-distribution. Som tidigare nämnts är NTRIP ett http-baserat protokoll ovanpå TCP, vilket medför att RTCM-data (eller andra GNSS-data) kan skickas via Internet utan att stoppas av brandväggar och proxyservrar i lokala nätverk.

Säkerheten garanteras istället av att alla NtripServer-NtripClient-kontakter måste ske via den administrerande NtripCaster (Weber et al. 2003). Andra fördelar som ofta framhålls är att NTRIP är flexibelt och medför många alternativ när det gäller valet GNSS-dataformat och distributionslänkar (där GPRS är *en* teknik) och att Internet-överföringen till skillnad från GSM-överföring även tillåter ett stort antal simultana användare (Chen et al. 2004, Pala et al. 2004).

Även om NTRIP anses som relativt lätt att implementera för datadistributörer så återstår en del arbete på användarsidan för att skala ner nödvändiga konfigurationer till ett minimum (IP-nummer för NtripCaster etc.). I dagsläget finns därför ett visst supportbehov. Att NTRIP-standarden numera är en officiell RTCM-standard gör det å andra sidan mer angeläget för tillverkare att implementera användarvänliga NTRIP-lösningar i sina produkter.

Fler NtripServer/Caster-applikationer börjar nu också bli kommersiellt tillgängliga. I SWEPOS driftledningscentral finns alltså en NtripServer/Caster integrerad i den befintliga konfigurationen av GPSNet (se kap. 6.1.2). Tyska Geo++ har också utvecklat en NtripServer/Caster-modul för GNSMART, en nätverks-RTK-programvara som tillämpar absolutmodellering av felkällorna i kombination med utsändning av areakorrekationer (FKP) eller VRS-teknik. GNSMART har tidigare jämförts med GPSNet i en testkampanj för nätverks-RTK utförd av Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG). Slutsatsen från denna studie var att programvarorna hade jämförbar funktionalitet i VRS-läge, fränsett antennmodellering och vissa fabrikatberoende svårigheter att tolka RTCM-meddelande 59 (Engfeldt et al. 2003).

NTRIP-komponenternas egenskaper möjliggör ett antal olika kommunikationsalternativ. EUREF-IP-projektet (se kap. 5.5) visar mångfalden av lösningar. Exempelvis kan NtripCaster i mån av behov göra kopior av källdata för att reducera den nödvändiga bandbredden mellan NtripClient och NtripCaster. Slut användaren kan dessutom få tillgång till källdata genom en kedja av NtripCasters, där varje Caster alltså levererar källdata för Caster "i nästa led" via en monteringspunkt. En möjlig modell för att åstadkomma säkrare dataöverföring och kortare fördröjningar skulle

alltså kunna vara att distribuera data från SWEPOS till lokala NtripCasters via fasta Internet-förbindelser och därifrån vidare ut till slutanvändare via Internet-radio eller traditionell UHF (Peterzon 2004, Johansson 2004).

Peterzon (2004) pekar också på möjligheten att skräddarsy tjänster som inkluderar olika RTCM-meddelanden med olika uppdateringsfrekvens som är bättre anpassade för användarens specifika behov. Detta är fullt möjligt att konfigurera via NtripCastern och med GPRS skulle en sådan differentiering medföra en tydlig koppling mellan pris och noggrannhetskrav.

Slutligen finns det åtskilliga utvecklingsmöjligheter när det gäller själva NTRIP-protokollet. Som RTCM-standard gäller i idag NTRIP version 1.0 (se RTCM 2004), men man kan troligen räkna med att anpassningar till nya tekniska lösningar kommer att ske fortlöpande. Detta kan t.ex. gälla möjlighet att utnyttja alternativa protokoll för att optimera överföringen beroende på lokalnätens egenskaper, eller för att möjliggöra utbyte av data mellan befintliga NtripCasters och externa datacentra (t.ex. distribuerar IGS GPS-data via UDP-protokoll).

Vidare skulle kompletterande information eller metadata kunna distribueras via källdatatabellen, eller möjligen som separata NtripSources. Det vore t.ex. önskvärt om Ntrip-klienten kunde ta emot information om felkällor för en NtripSource. Detta skulle kunna vara de jonosfäriska restfel som kan uppskattas i GPSNet (Chen et al. 2003) eller storleken på VRS-korrektionerna i nord-sydlig respektive öst-västlig riktning. Andra alternativ skulle kunna vara stokastiska modellparametrar (Wübbena et al. 2001), som då antingen baseras på enkelstations- eller VRS-data. Utifrån denna information vore det då möjligt att beräkna ett kvalitetsindex som återspeglar vilket inflytande flera av de beskrivna faktorerna i kap. 8.4 har på roverpositionens noggrannhet. Detta skulle alltså kunna ge användaren möjlighet att själv kontrollera och kvalitetsbedöma sina nätverks-RTK-mätningar i fält enligt en mer rigorös metod än i kap. 8.5.



## 9 REFERENSER

Alm M., Munsin A-S. (2003): *Traditionell RTK kontra Nätverks-RTK-En noggrannhetsjämförelse*, LMV-rapport 2003:11, Gävle

Alves P., Ahn Y. W., Lachapelle G. (2003): *The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data*, Proceedings of GPS/GNSS 03, sept. 2003, Portland, USA.

Amiri-Simkooei A., Kremers R., Tiberius C. (2004): *GPS Receiver Test*, Rapport, maj 2004, Department of Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology.

Andersson U., Eriksson U. (1997): *Kompatibilitet för olika utrustningar vid RTK-mätning mot SWEPOS*, LMV-rapport 1997:17, Gävle

Bischoff W., Heck B., Howind J., Teusch A. (2005): *A procedure for testing the assumption of homoscedasticity in least squares residuals: a case study of GPS carrier-phase observations*, Journal of Geodesy, 78, s. 397-404.

Bock Y., de Jonge P., Honcik D., Fayman J. (2003): *Wireless Instantaneous Network RTK: Positioning and Navigation*, Proceedings of ION GPS 2003, The Institute of Navigation, Portland, USA.

Borre K., Tiberius C. (2000): *Time Series Analysis of GPS Observables*, ION GPS 2000, 19-22 sept. 2000, Salt Lake City, USA.

Brynte S., Persson J. (2002): *Kompatibilitet för Nätverks-RTK-programvaran Trimble GPS-Net med olika typer av rörliga mottagare*, LMV-rapport 2002:7, Gävle

Chakravorty R., Cartwright J., Pratt I. (2002): *Practical Experience with TCP over GPRS*, Proceedings of IEEE GLOBECOM 2002, 17-21 nov. 2002, Taipei, Taiwan.

Chen R., Li X., Weber G. (2004): *Test Results of an Internet RTK System Based on the NTRIP Protocol*, European Navigation Conference GNSS 2004, 16-19 maj 2004, Rotterdam, Holland.

Chen X., Landau H., Vollath U. (2003): *New Tools for Network RTK Integrity Monitoring*, ION GPS/GNSS 2003, 9-12 sept. Portland, USA.

Collins J. P., Langley, R. B. (1999): *Possible weighting schemes for GPS carrier phase observations in the presence of multipath*, TCN Report nr. 98151, U. S. Army Research Office.

Dai L., Han S., Wang J., Rizos C. (2001): *A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase-Based Positioning*, Proceedings of ION GPS 2001, s. 392-403.

- Ekman M. (2002): *Latitud, longitud, höjd och djup: referenssystem och kartprojektioner inom geodesi, hydrografi och navigation*, Kartografiska sällskapet, Stockholm
- Engfeldt A., Jivall L. (2003): *Så fungerar GNSS*, LMV-rapport 2003:10, Gävle
- Engfeldt A., Norin D., Nielsen J., Warming L. H., Grinde G., Johansson D., Lilje C., Nilsson A., Wiklund P., Kempe T., Frisk A. (2003): *The 2002 NKG GNSMART/GPSNet Test Campaign*, LMV-rapport 2003:4, Gävle.
- Euler H. J., Keenan C. R., Zebhauser B. E., Wübbena G. (2001): *Study of a Simplified Approach in Utilizing Information from Permanent Reference Station Arrays*, ION GPS 2001, 11-14 sep. 2001, Salt Lake City, USA.
- Euler H. J., Seeger S., Takac F. (2004): *Analysis of biases influencing successful rover positioning with GNSS-Network RTK*, GNSS 2004, 6-8 dec. 2004, Sydney, Australien.
- Fotopoulos G., Cannon M. E. (2001): *An Overview of Multi-Reference Station Methods for cm-Level Positioning*, GPS Solutions, vol. 4 (3), s. 1-10.
- Gao Y., Liu Z. (2001): *Differential GPS Positioning over Internet*, Journal of Geospatial Engineering, vol. 3 (1), s. 1-7.
- Gontran H., Skaloud P.-Y., Gilliéron (2004): *Photobus – Towards Real-time Mobile Mapping*, Proceedings of ISPRS 2004, 12-23 juli 2004, Istanbul, Turkiet.
- Hada H., Sunahara H. (2000): *DGPS and RTK Positioning Using the Internet*, GPS Solutions, vol 4 (1), s. 34-44)
- Hedling G. (2004): *Implikationer av övergång från RTCM version 2.4 till 3.0 för RTK*, intern-PM, nov. 2004, Lantmäteriet (IG), Gävle.
- Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. (2001): *GPS Theory and practice*, Springer-Verlag, Wien, New York
- Howind J., Kutterer H., Heck B. (1999): *Impact of temperal correlations on GPS-derived relative point positions*, Journal of Geodesy, 73, s. 246-258.
- Hu G. R., Khoo H. S., Goh P. C., Law C. L. (2002): *Internet-based GPS VRS RTK Positioning with a Multiple Reference Station Network*, Journal of Global Positioning Systems, vol. 1 (2), s. 113-120.
- Hu, G.R., Khoo, H.S., Goh, P.C., Law, C.L. (2003): *Development and assessment of GPS virtual reference stations for RTK positioning*, Journal of Geodesy, 77, s. 292-302.
- Häkli, P. (2004): *Practical Test on Accuracy and Usability of Virtual Reference Station Method in Finland*, FIG Working Week 2004, 22-27 maj 2004, Aten, Grekland.

- Jensen H. V., Jepsen C. (2005): *Højdenøjaktighed med GPS – hvad kan vi forvente*, Sinus, nr.1, 2005, s. 8-14.
- Jivall L., Lidberg M., Lilje M., Reit B-G. (2001): *Transformationssamband mellan SWEREF 99 och RT90 / RH70*, LMV-rapport, Gävle
- Johansson D. (2004): *Skån-RTK-2 – nätverks-RTK i produktionstest i södra Sverige*, LMV-rapport 2004:12, Gävle
- Johansson J. (2001): *Grunderna och felkällorna vid mätning med RTK och nätverks-RTK*, Sinus
- Jonsson A., Nordling A. (2003): *Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät*, LMV-rapport 2003:12, Gävle
- Jonsson B., Hedling G., Wiklund P. (2003): *SWEPOS™ Network-RTK Services – status, applications and experiences*, ION GPS/GNSS 2003, 9-12 sept. 2003, Portland, USA.
- Kempe C. (2004): *Väst-RTK – nätverks-RTK i produktionstest i västra Sverige*, LMV-rapport 2004:11, Gävle
- Kim D., Langley, R. B. (2000): *GPS ambiguity Resolution and Validation: Methodologies, Trends and Issues*, 7<sup>th</sup> GNSS Workshop – International Symposium on GPS/GNSS, 30 nov-2 dec. 2000, Seoul, Korea.
- Kjørsvik N. (2002): *Assessing the Multi-Base Station GPS Solutions*, FIG XXII International Congress, 19-26 april 2002, Washington D.C. USA.
- Kjørsvik N. (2004): *Stochastic Properties of VRS Carrier Phase Observations*, Geodesi- og hydrografidagene, 4-5 nov. 2004, Sandnes, Norge.
- Kumar-Mills, D., Homer, J., Kubik, K., Higgins, M. (2004): *Efficient RTK Positioning by integrating Virtual Reference Stations with WCDMA Network*, GNSS 2004, 6-8 dec. 2004, Sydney, Australien.
- Körner S., Wahlgren L. (2000): *Statistisk dataanalys*, 3:e uppl., Studentlitteratur AB, Lund.
- Lachapelle G., Alves P. (2002): *Multiple Reference Station Approach: Overview and Current Research*, Journal of Positioning Systems, 2002, vol.1 (2), s. 133-136.
- Landau H., Vollath U., Chen X. (2002): *Virtual Reference Station Systems*, Journal of Positioning Systems, 2002, vol.1 (2), s. 137-143
- Landau H., Vollath U., Chen X. (2003): *Virtual Reference Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK – Advantages and Limitations*, GNSS 2003, april 2003, Graz, Österrike.
- Lantmäteriverket (1996): *HMK-Geodesi:GPS*, Lantmäteriverket, Gävle
- Lantmäteriet (2000): *RefStrat – strategier för referenssystem och referensnät*, LMV-rapport 2000:5, Gävle

- Lantmäteriet (2001): *Geodesi 2000 – svensk geodesiverksamhet under kommande tioårsperiod*, LMV-rapport 2001:1, Gävle
- Leick A. (1995): *GPS Satellite surveying*, John Wiley & Sons, New York
- Lenz, E.(2004): *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP) – Application and Benefit in Modern Surveying Systems*, FIG Working Week 2004, 22-27 maj 2004, Aten, Grekland.
- Lidberg M. (1998): *Litteraturstudie om RTK-tekniken*, LMV-rapport 1998:3, Gävle
- Liu G. C. (2004): *GPS RTK poitioning via Internet-based 3G CDMA2000/1X wireless technology*, GPS Solutions, vol. 7 (4), s. 222-229.
- Lui V. (2004): *An Innovative Concept to Manage GPS Reference Station Network and RTK Data Distribution Globally*, 3<sup>rd</sup> FIG Regional Conference, 3-7 okt. 2004, Jakarta, Indonesien.
- Meng X., Dodson A., Andreotti M., Roberts G., Cosser E., Capra M. (2004): *Prototype of a remote bridge health monitoring system (RBHMS) using wired/Internet based RTK GPS*, European Navigation Conference GNSS 2004, 16-19 maj 2004, Rotterdam, Holland.
- Millner, J. (2004): *The development and enhancement of GNSS/GPS infrastructure to support Location Based Service Positioning Systems in Victoria*, GNSS 2004, 6-8 dec. 2004, Sydney, Australien.
- Musa T., Wang J., Rizos C., Lee Y-J. (2004): *Mitigating Residual Tropospheric Delay to Improve User's Network-Based Positioning*, GNSS 2004, 6-8 dec. 2004, Sydney, Australien.
- Ohlsson L. (1997): *Different methods and equipment for determination of new points relative to the SWEPOS-stations*, LMV-rapport 1997:19, Gävle
- Pala, A., Sanna, G., Vacca, G. *Real Time Mapping with DGPS-enabled Navigation Equipment*, XXth ISPRS Congress, 12-23 juli 2004, Istanbul, Turkiet.
- Peterzon M. (2002): *Distribution of GPS-data via Internet*, LMV-rapport 2004:01, Gävle
- Radzeviciute K., Kjørsvik N. Ovstedal O., Svendsen J. (2003): *A Comparative Evaluation of Various RTK Systems' Performance Under Operational Conditions*, ION GPS/GNSS 2003, 9-12 sept. 2003, Portland, USA.
- Rizos C. (2002): *Network RTK Research and Implementation – A Geodetic Perspective*, Journal of Positioning Systems, 2002, vol.1 (2), s. 144-150.
- Rizos C., Han S. (2003): *Reference station network based RTK systems - Concepts & progress*, Wuhan University Journal of Nature Sciences, 8(2B), 566-574.

RTCM (2004): *RTCM Recommended Standards for Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (Ntrip), Version 1.0*, RTCM Paper 200-2004/SC104-STD.

Schöffel M., Schneider A. (2004): *Can NTRIP replace GSM communication in RTK surveying?*, GPSNet Users Conference, juli 2004, München, Tyskland.

Statens lantmäteriverk (1994): *HMK-Geodesi:Detaljmätning*, Statens lantmäteriverk, Gävle

Stöcker D. (2003): *Moderne Übertragungsmethoden aus der Sicht der GNSS-Anwender*, SAPOS-symposium nr 5, 3-5 nov. 2003, Frankfurt am Main, Tyskland.

Talbot, N., Lu, G., Allison, T., Vollath, U. (2002): *Broadcast Network RTK – Transmission Standards and Results*, ION GPS 2002, 24-27 sept. 2002, Portland , USA.

Torán-Martí F., Ventura-Traveset J. (2004): *The ESA SISNet Project: Current Status and Future Plans*, European Navigation Conference GNSS 2004, 16-19 maj 2004, Rotterdam, Holland.

Trimble (2003a): *GPSTerver User Guide v. 2.20*, Trimble Navigation Limited, Dayton, USA.

Trimble (2003b): *GPSNet User Guide v. 2.10*, Trimble Navigation Limited, Dayton, USA.

Valdimarsson R.G. (2004): *Interpolationsmetoder för restfelshantering i höjddled vid höjdmätning med GPS*, LMV-rapport 2004:7

Vollath U., Buecherl A., Landau H., Pagels C., Wagner B. (2000): *Multi-Base RTK Positioning Using Virtual Reference Stations*, Proceedings of ION GPS 2000, s. 123-131.

Vollath U., Landau H., Chen X., Doucet K., Pagels C. (2002): *Network RTK Versus Single Base RTK – Understanding the Error Characteristics*, ION GPS 2002, 24-27 sept. 2002, Portland, USA.

Wahlund S. (2002): *Production measurements with Network RTK-Tests and analysis*, LMV-rapport 2002:2, Gävle

Wang J., Satirapod C., Rizos C. (2002): *Stochastic Assessment of GPS Carrier Phase Measurements for Precise Static Relative Positioning*, Journal of Geodesy, 76 (2), s. 95-104.

Wanninger L. (1999): *The Performance of Virtual Reference Stations in Active Geodetic GPS-networks under Maximum Conditions*, Proceedings of ION GPS 1999, s.1419-1427.

Wanninger L. (2002): *Virtual Reference Stations for Centimeter-Level Kinematic Positioning*, Proceedings of ION GPS 2002, s. 1400-1407.

Weber G. (2002): *EUREF and Real Time Products*, EUREF Publication nr. 10 (ed. Torres J.A., Hornik H.), s. 88-90.

Weber G., Dettmering D., Gebhard H. (2003): *Networked Transport of RTCM via Internet Protocol (NTRIP)*, RTCM Paper 167-2003/SC104-314.

Wennström A. (2004): *A Measurement Based Performance Study of TCP over GSM/GPRS*, Licentiatuppsats, maj 2004, Karlstad University Studies 2004:22.

Wiklund P. (2004): *Position Stockholm-Mälaren-2 – nätverks-RTK i produktionstest*, LMV-rapport 2004:13, Gävle

Wübbena, G. (2001): *On the modelling of GNSS observations for high-precision position determination*, Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessungswesen an der Universität Hannover, Festschrift Prof. G. Seeber zum 60. Geburtstag, Nr.239, Hannover, s. 143-155

Wübbena, G., Bagge, A., Schmitz, M. (2001): *Network-Based Techniques for RTK Applications*, GPS JIN 2001, GPS Society, Japan Institute of Navigation, 14-16 nov. 2001, Tokyo, Japan.

Yan T. S. (2004): *Benefits of Telecommunications Technology to GPS Users*, GNSS 2004, 6-8 dec. 2004, Sydney, Australien.

Zhang K., Roberts C. (2003): *Network-based real-time kinematic positioning system: current development in Australia*, Geoinformatics and Surveying Conference 2003, The Institute of Surveyor, Malaysia.

### Internetkällor:

- Australian government, geoscience Australia (2004): <http://www.ga.gov.au>, hämtat 2004
- ESA (2004): <http://www.esa.int>, hämtat dec. 2004
- GIBS (2004): <http://gibs.leipzig.ifag.de>, hämtat dec. 2004
- Lantmäteriet (2004): <http://www.lantmateriet.se>, hämtat 2004
- Leica geosystems (2003): <http://www.leica-geosystems.com>, hämtat 2004
- Meko (2005): [http://www.ltrr.arizona.edu/~dmeko/notes\\_3.pdf](http://www.ltrr.arizona.edu/~dmeko/notes_3.pdf), hämtat jan. 2005
- Minitab (2003): <http://www.minitab.com/support/docs/rel14/MeetMinitab14.pdf>, hämtat jan. 2005
- RFMD (2005): Russian Federation Ministry of Defence, <http://www.glonass-center.ru>, hämtat maj 2005
- Romeu (2004): [http://rac.alionscience.com/pdf/A\\_DTTest.pdf](http://rac.alionscience.com/pdf/A_DTTest.pdf), hämtat jan. 2005
- SWEPOS (2004): <http://www.swepos.com>, hämtat sep. 2004
- Telia (2004): <http://www.telia.se>, hämtat sep. 2004
- Trimble (2004): [www.trimble.com](http://www.trimble.com), hämtat 2004

- U.S. Coast Guard (2003): <http://www.navcen.uscg.gov>, hämtat dec. 2004

### Muntliga källor:

- Arrhén G. (2004): augusti 2004, Trimble AB, Danderyd.
- Norin D. (2004): 2004-11-03, Lantmäteriet, Gävle.
- Norin D. (2005): 2005-01-20, Lantmäteriet, Gävle.
- Telia (2005): 2005-04-11, Carina Lind, Telia Kundtjänst.





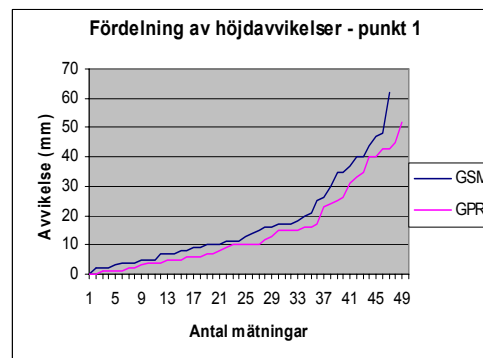
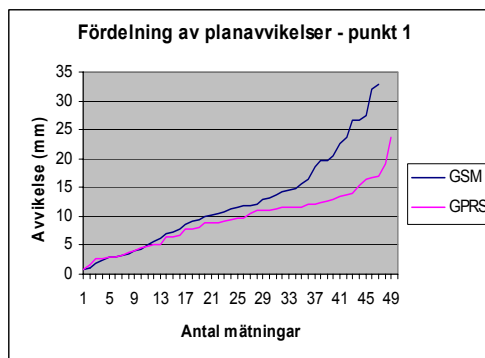
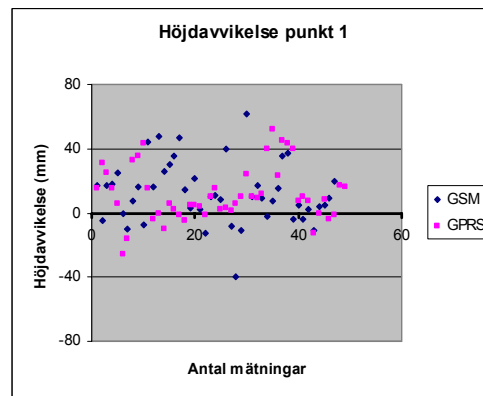
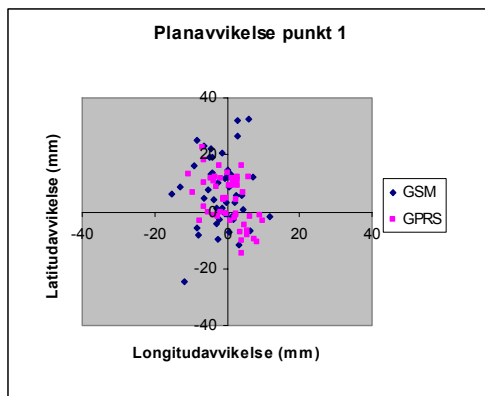
# KVALITETSVÄRDEN, SPRIDNINGSDIAGRAM OCH FÖRDELNINGAR

## Punkt 1

| Medelavvikelse (mm) | GSM | GPRS |
|---------------------|-----|------|
| Latitud             | 7   | 4    |
| Longitud            | -2  | 0    |
| Höjd                | 12  | 12   |

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 12  | 9    |
| Longitud       | 5   | 5    |
| Höjd           | 20  | 17   |

| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 15  | 11   |
| Höjd             | 23  | 20   |

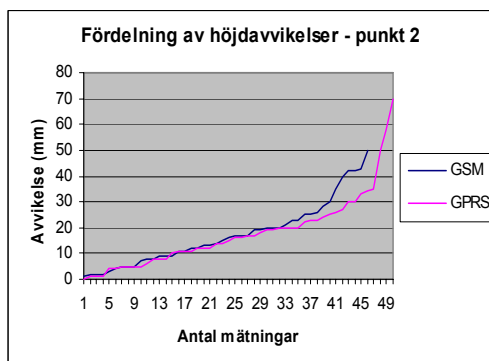
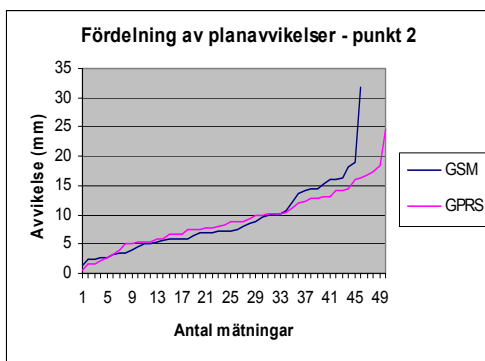
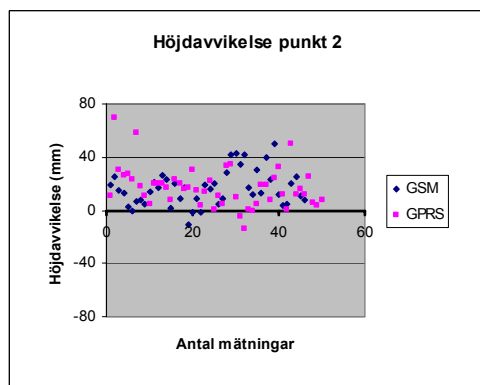
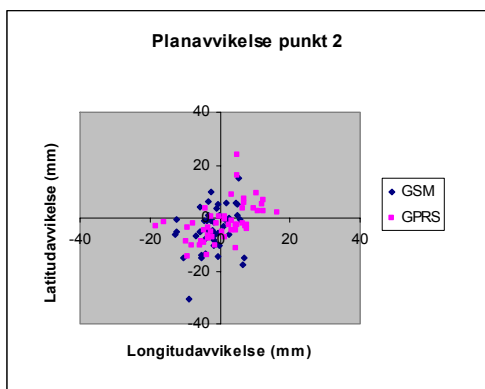


## Punkt 2

| Medelavvikelse (mm) | GSM | GPRS |
|---------------------|-----|------|
| Latitud             | -4  | -2   |
| Longitud            | -2  | 1    |
| Höjd                | 17  | 17   |

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 8   | 7    |
| Longitud       | 5   | 7    |
| Höjd           | 13  | 15   |

| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 11  | 10   |
| Höjd             | 21  | 23   |

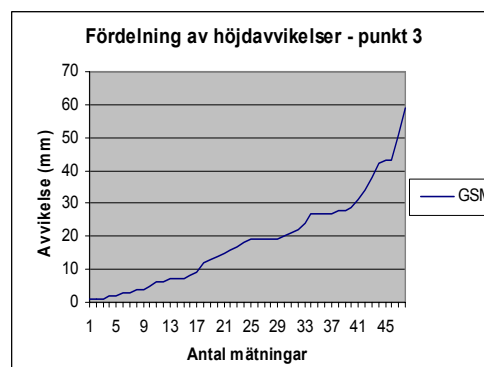
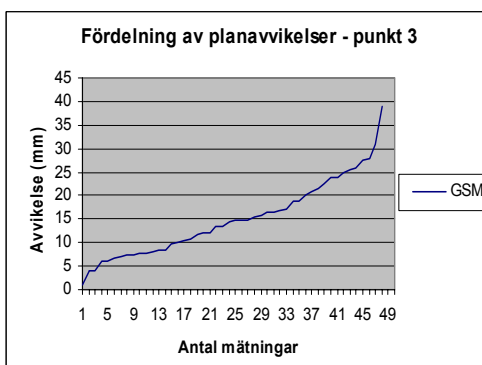
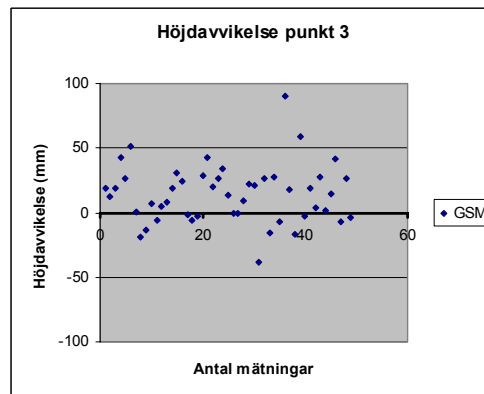
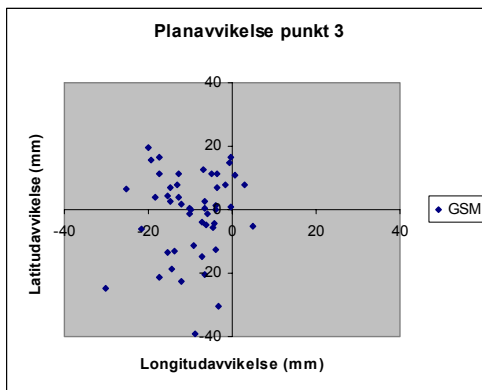


## Punkt 3

| Medelavvikelse (mm) | GSM |
|---------------------|-----|
| Latitud             | -1  |
| Longitud            | -10 |
| Höjd                | 14  |

| Precision (mm) | GSM |
|----------------|-----|
| Latitud        | 13  |
| Longitud       | 7   |
| Höjd           | 24  |

| Noggrannhet (mm) | GSM |
|------------------|-----|
| Radiellt         | 18  |
| Höjd             | 26  |

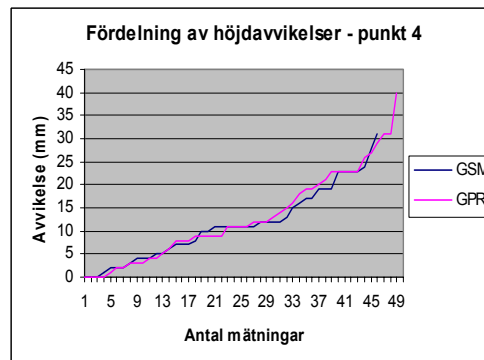
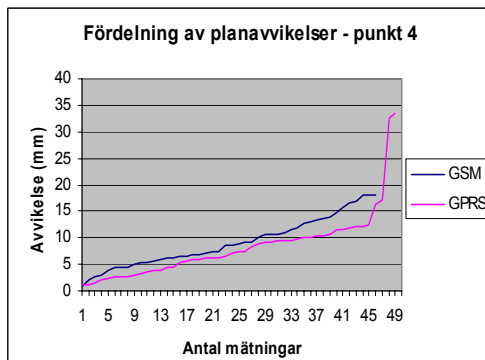
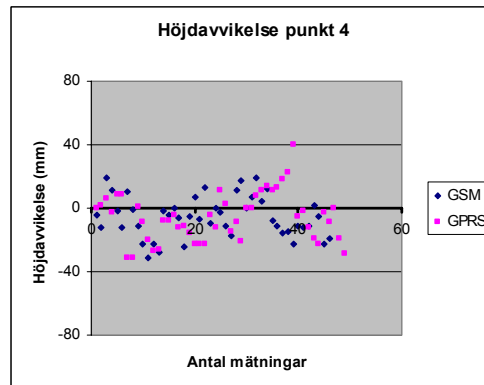
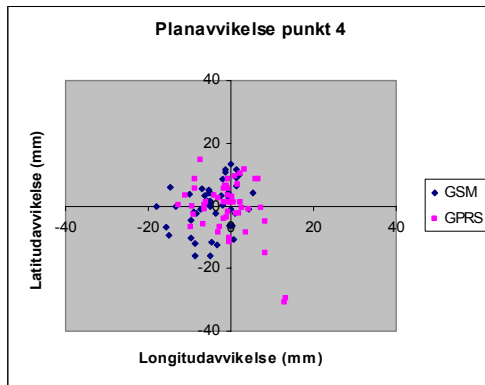


## Punkt 4

| Medelavvikelse (mm) | GSM | GPRS |
|---------------------|-----|------|
| Latitud             | 0   | 0    |
| Longitud            | -5  | -1   |
| Höjd                | -6  | -6   |

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 7   | 9    |
| Longitud       | 5   | 6    |
| Höjd           | 13  | 15   |

| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 10  | 10   |
| Höjd             | 14  | 16   |

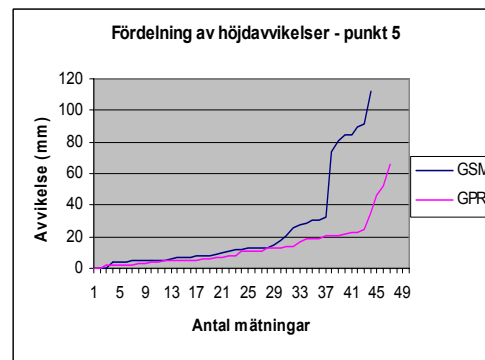
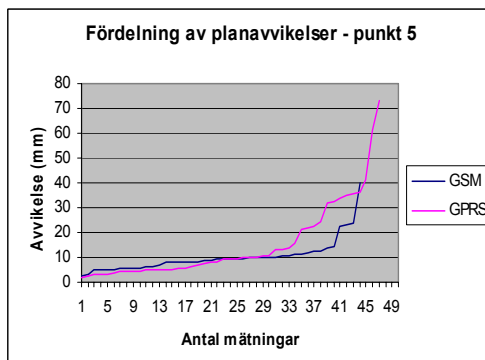
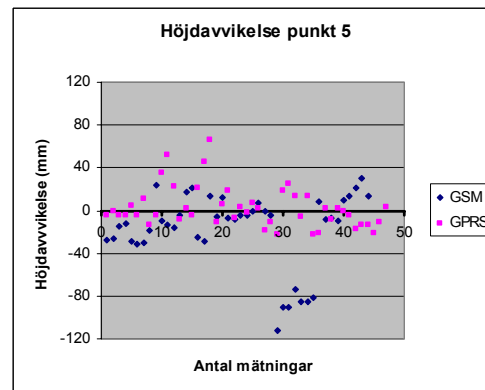
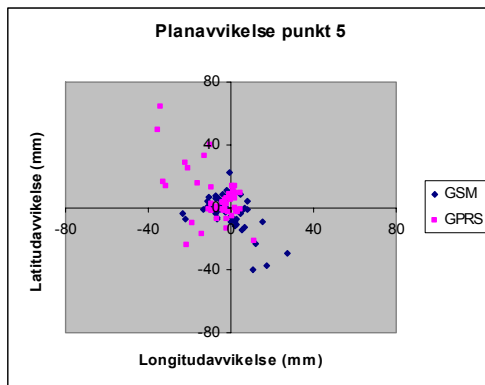


## Punkt 5

| Medelavvikelse (mm) | GSM | GPRS |
|---------------------|-----|------|
| Latitud             | -4  | 6    |
| Longitud            | -1  | -7   |
| Höjd                | -18 | 2    |

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 12  | 17   |
| Longitud       | 10  | 11   |
| Höjd           | 36  | 19   |

| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 16  | 22   |
| Höjd             | 39  | 19   |

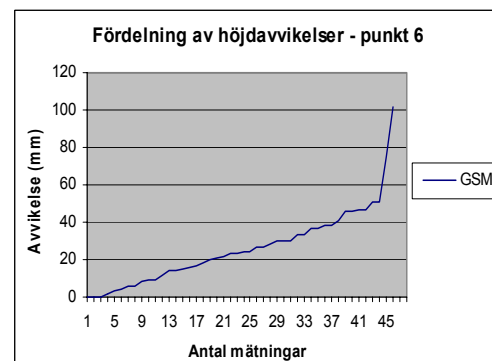
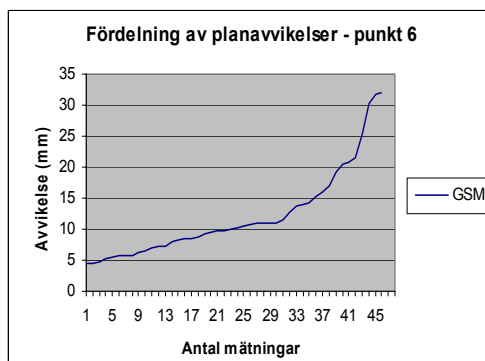
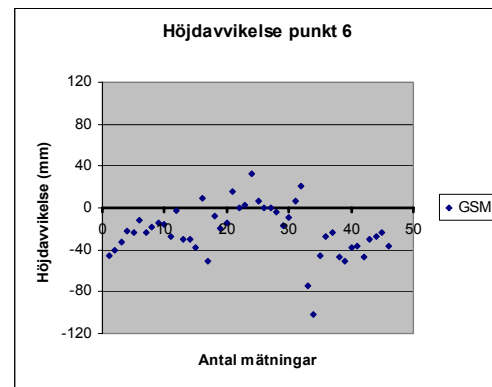
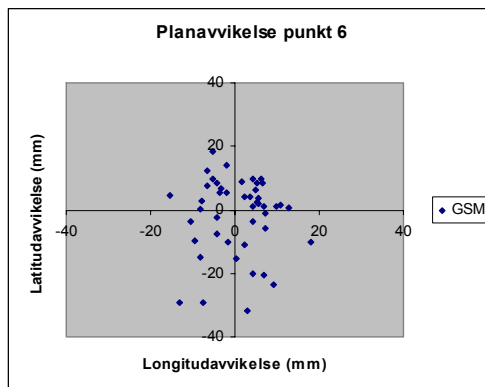


## Punkt 6

| Medelavvikelse (mm) | GSM |
|---------------------|-----|
| Latitud             | -2  |
| Longitud            | 1   |
| Höjd                | -22 |

| Precision (mm) | GSM |
|----------------|-----|
| Latitud        | 12  |
| Longitud       | 7   |
| Höjd           | 26  |

| Noggrannhet (mm) | GSM |
|------------------|-----|
| Radiellt         | 14  |
| Höjd             | 33  |

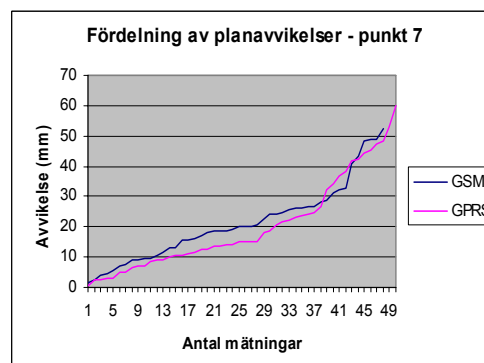
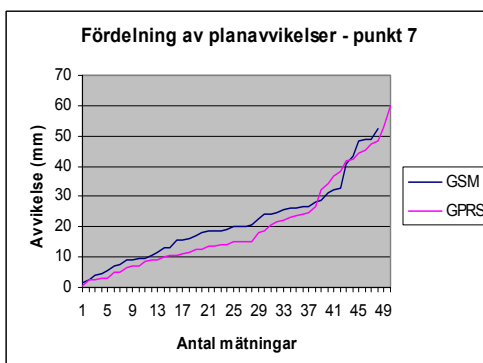
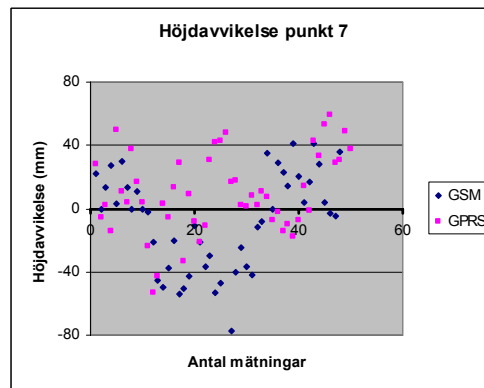
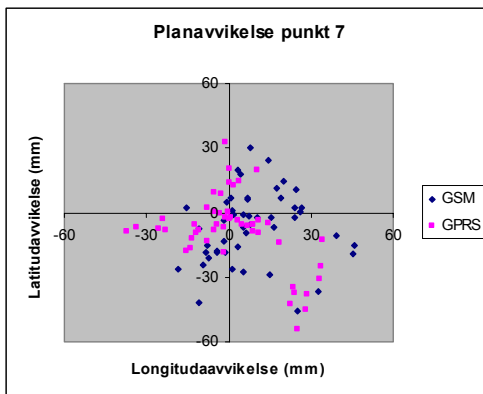


## Punkt 7

| Medelavvikelse (mm) | GSM | GPRS |
|---------------------|-----|------|
| Latitud             | -7  | -8   |
| Longitud            | 9   | 2    |
| Höjd                | -9  | 10   |

| Precision (mm) | GSM | GPRS |
|----------------|-----|------|
| Latitud        | 17  | 17   |
| Longitud       | 15  | 17   |
| Höjd           | 31  | 25   |

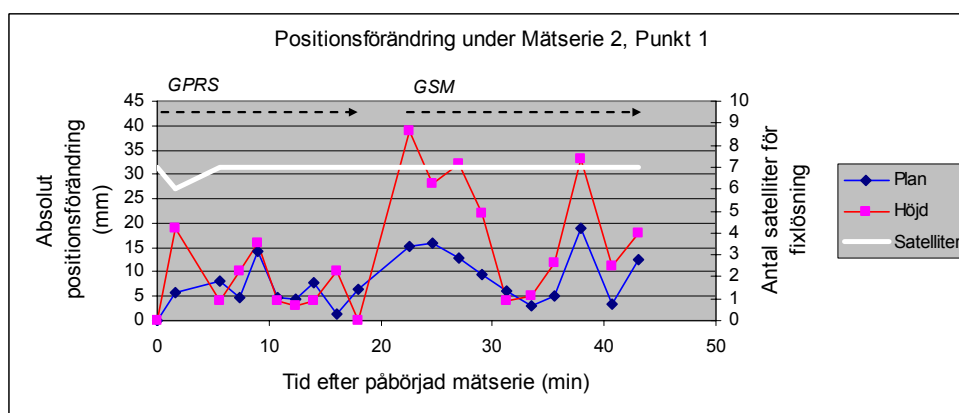
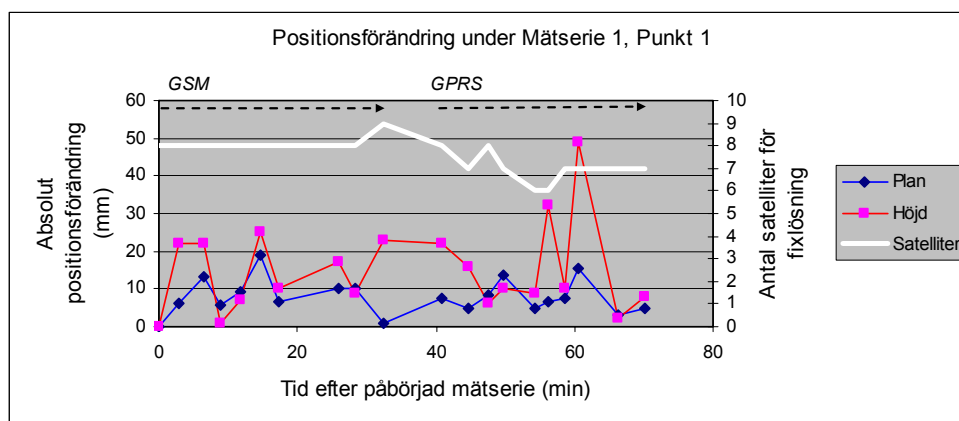
| Noggrannhet (mm) | GSM | GPRS |
|------------------|-----|------|
| Radiellt         | 25  | 25   |
| Höjd             | 33  | 27   |



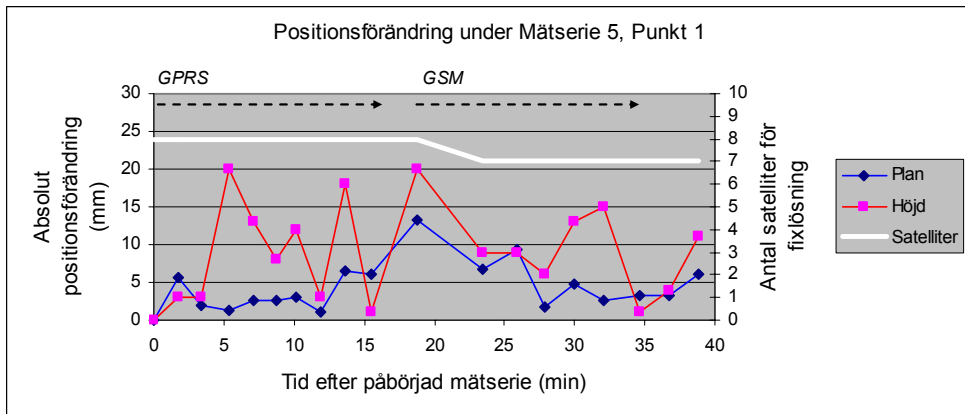
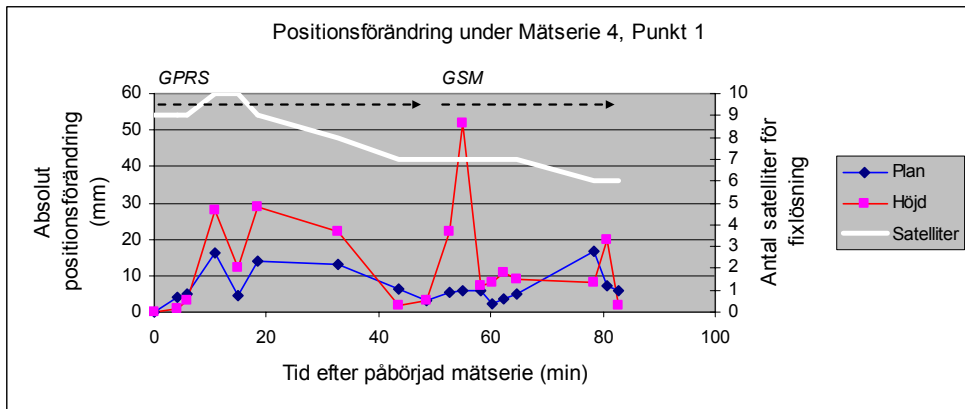
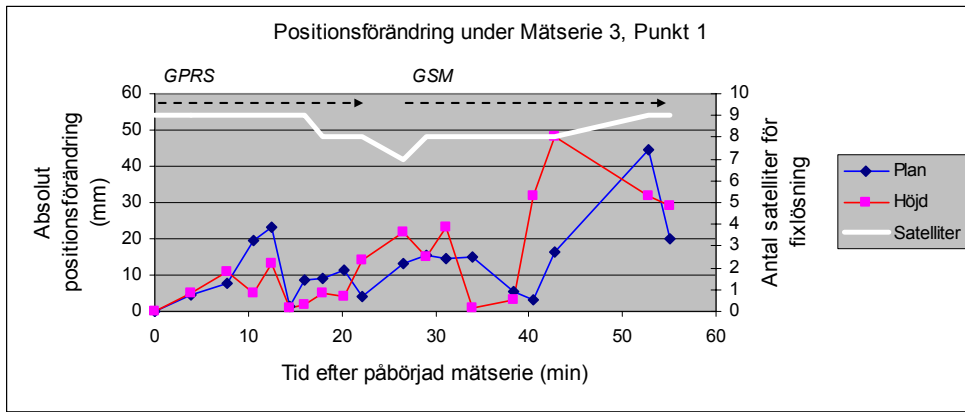
# POSITIONSFÖRÄNDRINGAR

Diagrammen visar absoluta positionsförändringar för varje enskild mätserie (10 mätningar med GSM och 10 med GPRS) på punkterna 1, 2, 4, 5 och 7. I vissa fall utfördes GSM-mätningar före GPRS-mätningar och i andra fall tvärt om. Punkt 3 och 6 har utelämnats i och med att inga mätningar med GPRS är utförda där. Med utgångspunkt i mätseriens första mätning (som oavsett avvikelse från det sanna värdet placerats vid noll på y-axeln) har skillnaderna mellan mätningarna beräknats och absolutbeloppen plottats i diagrammet. Varje punkt i diagrammet visar alltså skillnaden i avvikelse mellan den aktuella mätningen och närmast föregående, i plan respektive höjd. Diagrammen redovisar även antal satelliter vid varje mättillfälle.

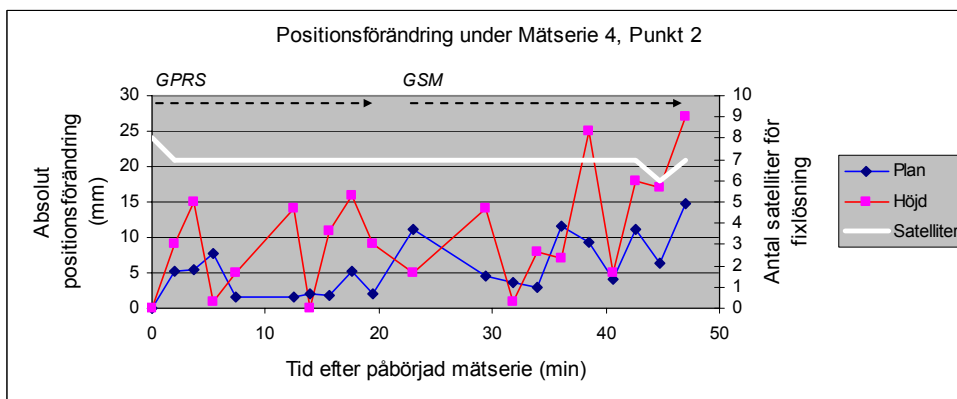
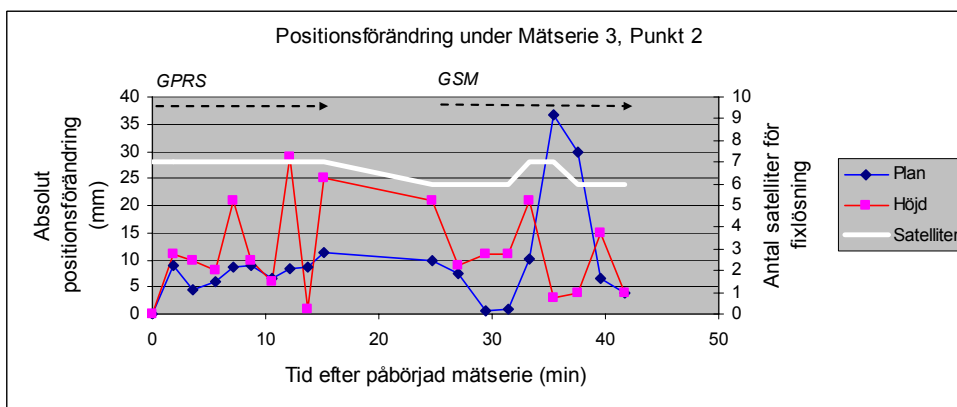
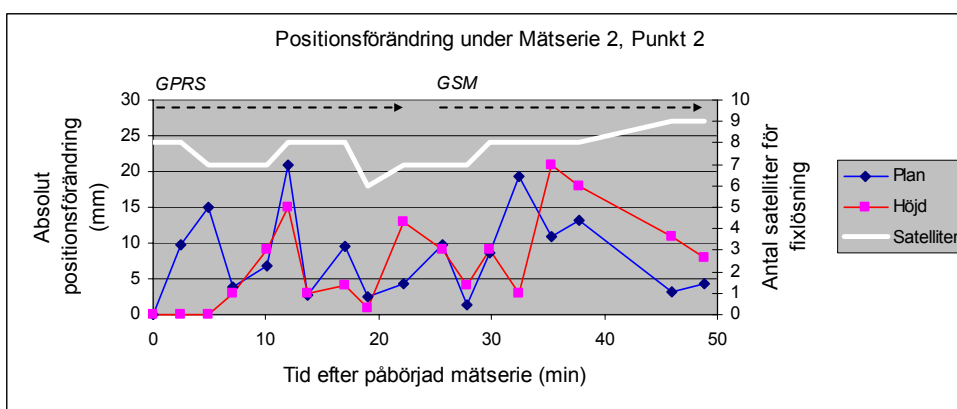
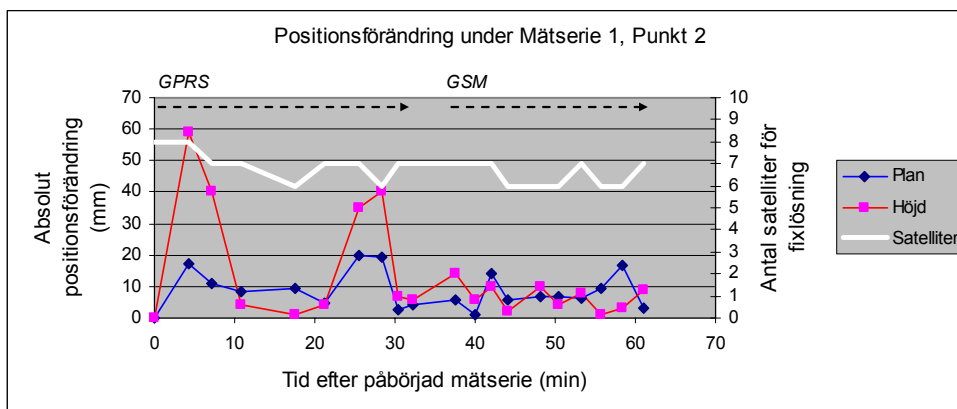
## Punkt 1

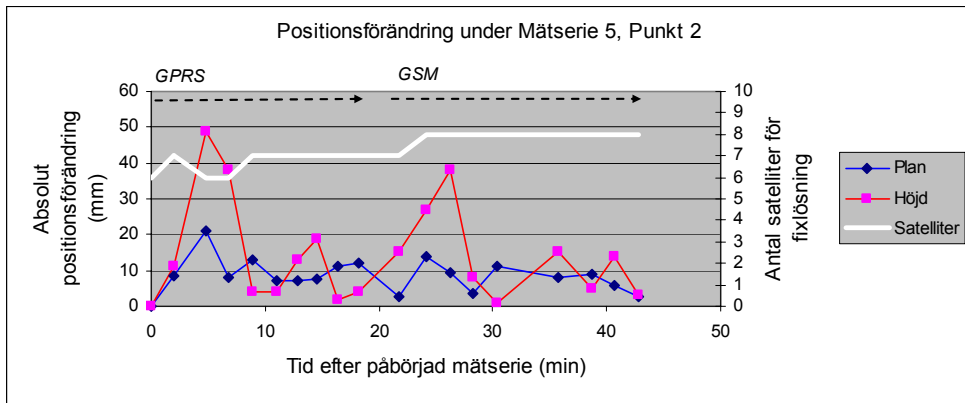




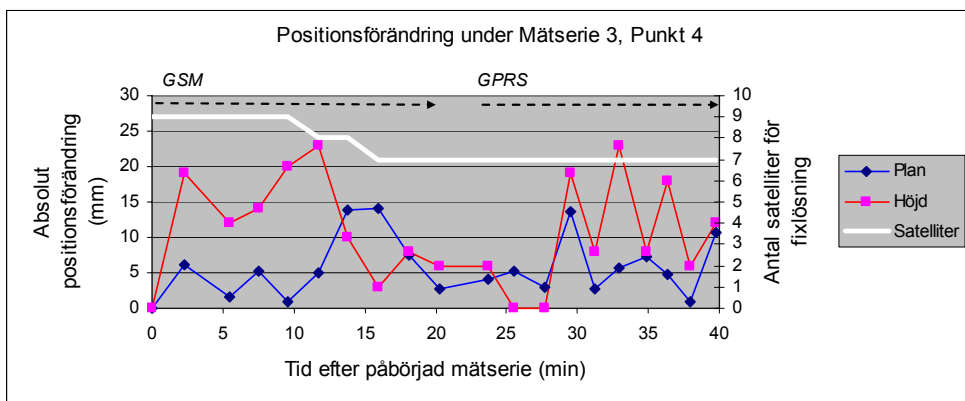
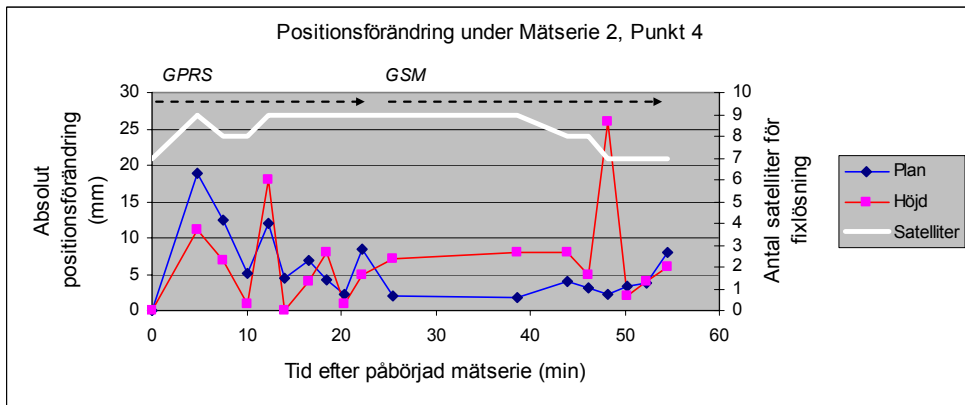
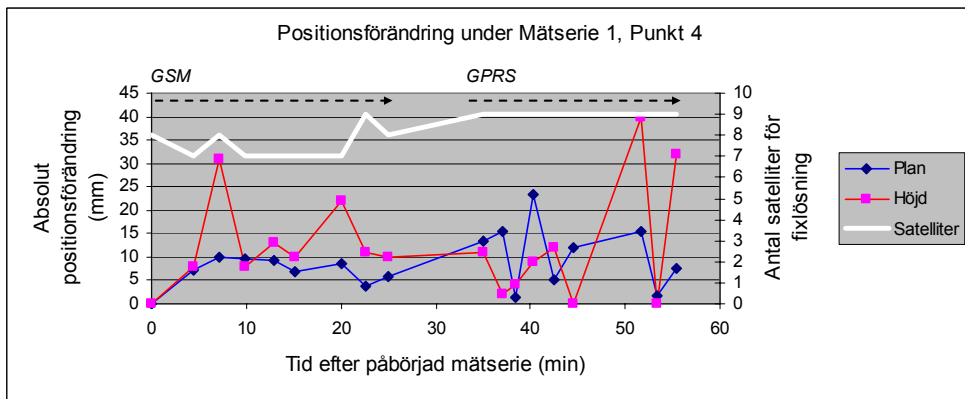


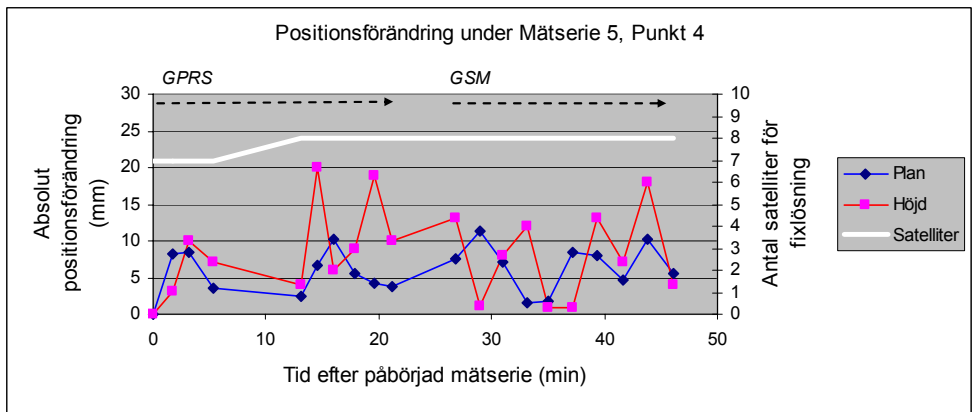
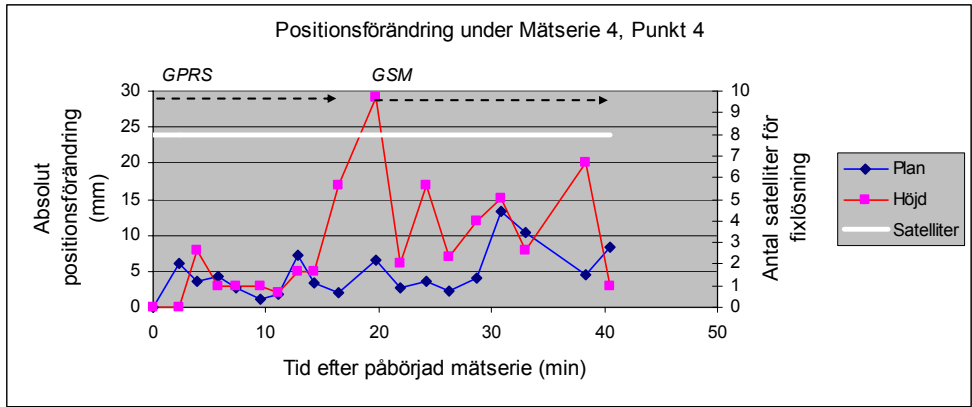
## Punkt 2



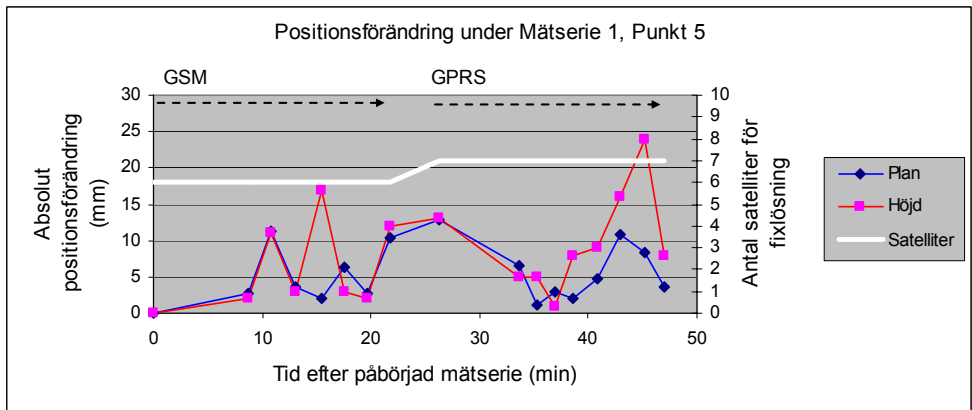


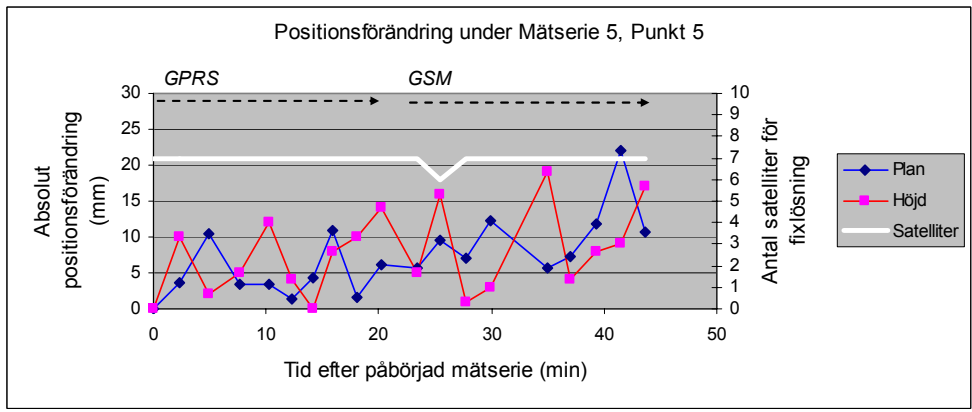
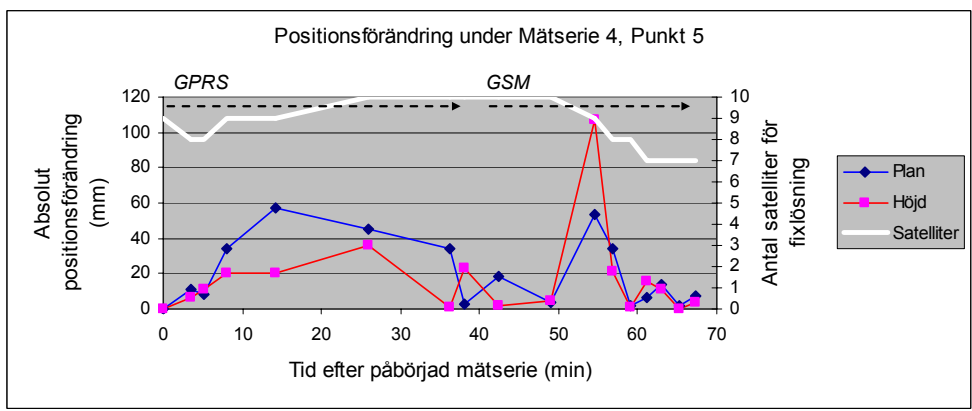
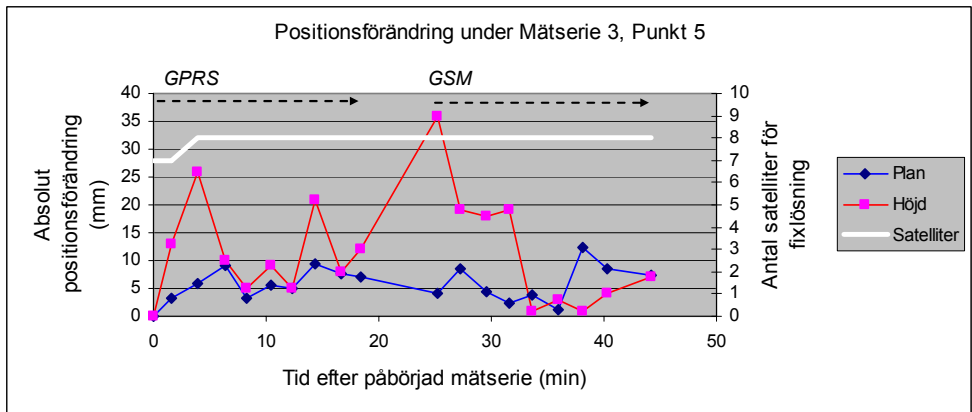
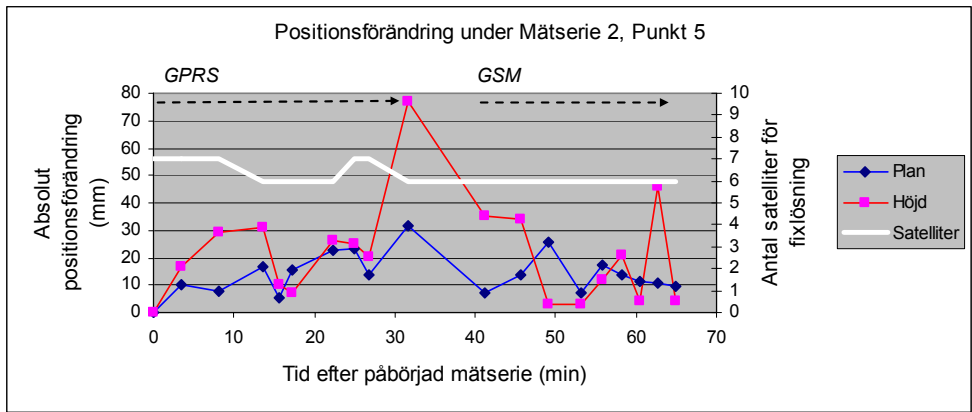
## Punkt 4



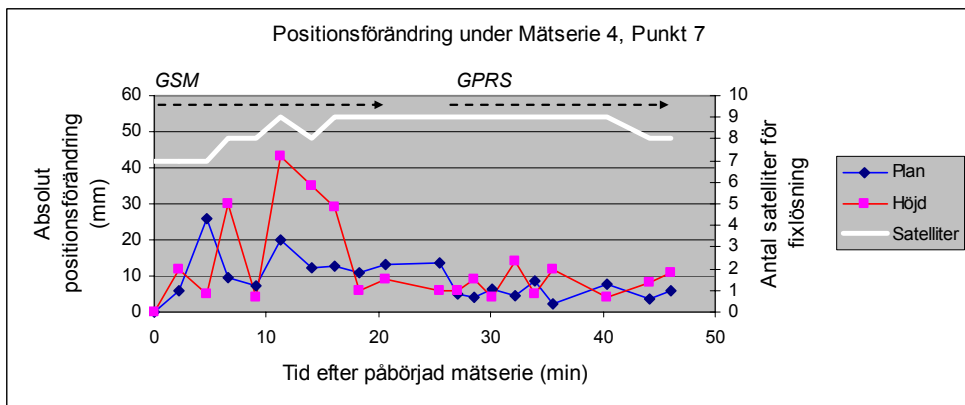
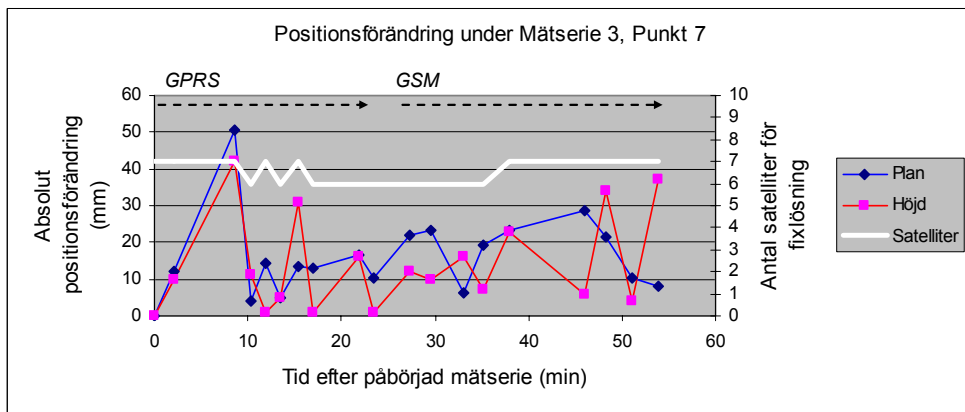
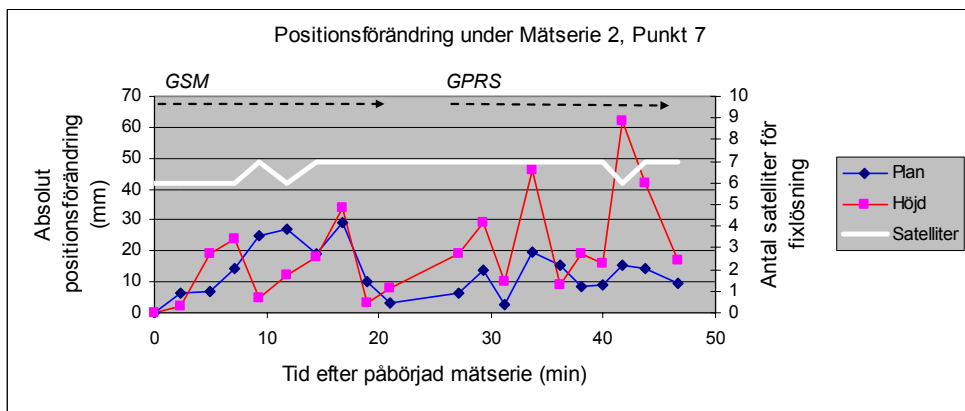
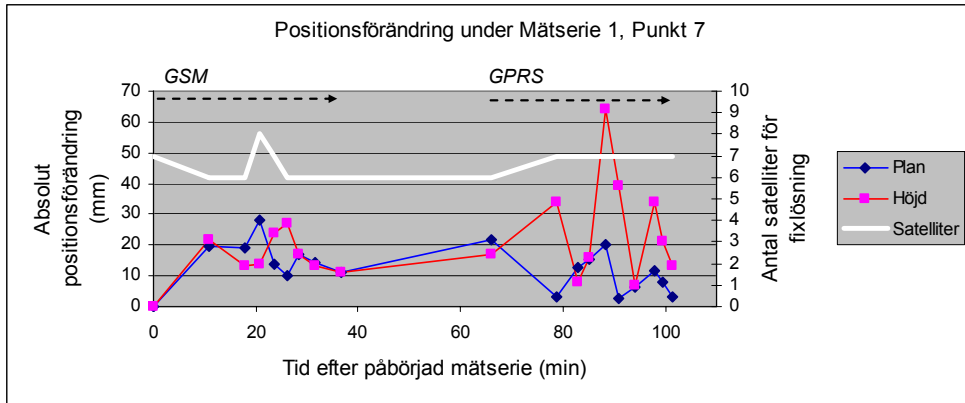


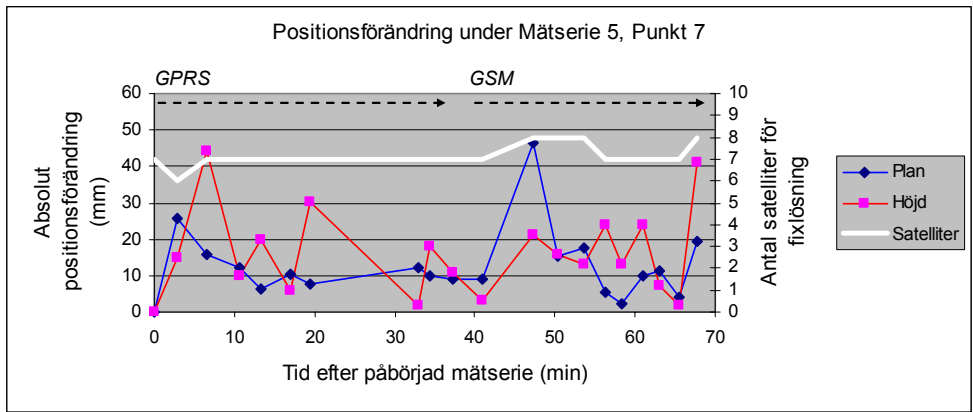
## Punkt 5





# Punkt 7









## Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriverket

- 2002:2 Wahlund Sara: Production measurements with network RTK – tests and analysis.
- 2002:5 Alfredsson Anders: Studier av deformationer vid byte av koordinatsystem.
- 2002:7 Persson Jan & Brynte Stefan: Kompatibilitet för nätverks-RTK-programvaran Trimble GPS-Net med olika typer av rörliga mottagare.
- 2003:4 Engfeldt Andreas, Norin Dan, Nielsen Jan, Holm Warming Louise, Grinde Gro, Johansson Daniel, Lilje Christina, Nilsson Andreas, Wiklund Peter, Kempe Tina, Frisk Anders: The 2002 NKG GNSMART/GPSNet test campaign.
- 2003:8 Vejdeland Sofia & Dahlberg Liselotte: Tolkarhet av GGD-objekt i bilder registrerade av olika sensorer.
- 2003:10 Engfeldt Andreas & Jivall Lotti: Så fungerar GNSS.
- 2003:11 Alm Malin & Munsin Anna-Stina: Traditionell RTK kontra nätverks-RTK – en noggrannhetsjämförelse.
- 2003:12 Jonsson Albert & Nordling Anders: Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät.
- 2004:1 Peterzon Martin: Distribution of GPS-data via Internet.
- 2004:4 Andersson Maria: Deformationer av fasta geometrier - en metodstudie.
- 2004:7 Valdimarsson Runar Gisli: Interpolationsmetoder för restfelshantering i höjdlid vid höjdmätning med GPS.
- 2004:11 Kempe Christina: Väst-RTK – nätverks-RTK i produktionstest i västra Sverige.
- 2004:12 Johansson Daniel: SKAN-RTK – 2 – nätverks-RTK i produktionstest i södra Sverige.
- 2004:13 Wiklund Peter: "Position Stockholm-Mälaren – 2" – nätverks-RTK i produktionstest.
- 2004:16 Andersson Therese & Torngren Julia: Traditionell RTK och nätverks-RTK – en jämförelsestudie.
- 2005:3 Ahrenberg Magnus & Olofsson Andreas: En noggrannhetsjämförelse mellan Nätverks-RTK och Nätverks-DGPS

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)