

Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät

Albert Jonsson & Anders Nordling

Gävle 2003



Copyright ©

2004-05-24

Författare Albert Jonsson & Anders Nordling

Typografi och layout Rainer Hertel

Totalt antal sidor 146

LMV-Rapport 2003:12 – ISSN 280-5731

Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät

Albert Jonsson & Anders Nordling

Gävle 2003

LANTMÄTERIET



Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät

	Sammanfattning	9
1	Inledning	10
1.1	Tidigare studier	11
2	Introduktion till GPS-mätning	11
2.1	Satellitsystemet	11
2.2	Mätmetoder för avståndsbestämning mellan satellit och mottagare	12
2.2.1	Kodmätning	12
2.2.2	Bärvågsmätning	13
2.3	Positionsbestämningsmetoder	13
2.3.1	Absolutmätning	13
2.3.2	Relativ mätning	14
3	Felkällor och faktorer som påverkar vid GPS-mätning	15
3.1	Atmosfärsfel	15
3.1.1	Jonosfärsfel	15
3.1.2	Troposfärsfel	16
3.2	Banfel	16
3.3	Flervägsfel	17
3.4	Klockfel	17
3.5	Satellittillgänglighet	17
3.6	Satellitkonfiguration	18
3.7	Signalkvalitet och sikthinder	18

4	RTK	19
4.1	Fasta referensstationer	19
5	Nätverks-RTK	20
5.1	Tekniken	20
5.2	Nätverksprocessen	21
5.3	Nätverkskonfigurationen	21
5.3.1	SWEPOS	22
5.4	RTCM	22
6	Metod och genomförande	24
6.1	Systembeskrivning	25
6.2	Lokalisering av testpunkterna	25
6.3	Mätstrategi	27
6.4	Genomförande av testmätningarna	27
6.4.1	Utrustning	29
6.4.1.1	Leica	29
6.4.1.2	Trimble	29
6.4.1.3	Topcon	29
7	Resultat	30
7.1	Kvalitetstermer	30
7.1.1	Noggrannhet	30
7.1.2	Precision	31
7.1.3	Medelavvikelse	31
7.1.4	Största avvikelse	31
7.2	Resultat för alla mätningar totalt i projektet	31
7.3	Resultat med avseende på fabrikat	34
7.4	Resultat i plan med avseende på avstånd till närmaste referensstation	35
7.4.1	Leica	35
7.4.2	Topcon	36
7.4.3	Trimble	36
7.5	Resultat i höjd med avseende på avstånd till närmaste referensstation	37
7.5.1	Leica	37
7.5.2	Topcon	38
7.5.3	Trimble	38
7.6	Kvalitetsvärden i plan	39
7.6.1	Leica	39
7.6.2	Topcon	40
7.6.3	Trimble	40

7.7	Kvalitetsvärden i höjd	41
7.7.1	Leica	41
7.7.2	Topcon	41
7.7.3	Trimble	42
7.8	Initialiseringstid	42
7.8.1	Leica	43
7.8.2	Topcon	43
7.8.3	Trimble	44
7.9	Avståndsberoende	44
7.9.1	Validering av avståndsberoendet	47
8	Diskussion och slutsats	48
9	Referenser	52
	Bilaga I	55
	Bilaga II	123
	Bilaga III	129

Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK i Lantmäteriets testnät

Sammanfattning

RTK-positionering är begränsad beroende på den allt större influensen av systematiska fel med en växande baslinjelängd. Speciellt under perioder av hög jonosfärisk aktivitet kan det maximala avståndet till referensstationen bli så kort som 10 kilometer eller mindre för att uppnå en hög kvalitet på mätningarna.

Nätverks-RTK är en teknik som har utvecklats de senaste åren för att möjliggöra en ökning av avståndet mellan referensstationen och mottagaren. Konceptet är en vidareutveckling av RTK-tekniken och innebär att data från flera referensstationer används. Referensstationerna binds ihop i ett nätverk och en modell beräknas över felkällornas inverkan i området som stationerna täcker. Modellen används i realtid för att korrigera mätdata som insamlas i området.

Detta arbete presenterar resultatet från praktiska tester med RTK-mätning, där en jämförelse har gjorts mellan mätning mot en enstaka referensstation och mätning med nätverks-RTK.

En speciell instrumentuppställning användes för att tillåta att göra en jämförelse av de två RTK-teknikerna, där det användes en identisk eller likartad GPS-rådataström vid jämförelsen mellan de olika teknikerna. Medan roverdata var identiskt så var RTK-dataströmmen olika, där en använde enkelstations-RTK och den andra använde nätverks-RTK-data (virtuell referensstationsdata) skapad från GPS-nätverket. På det sättet var det möjligt att göra en jämförelse mellan positioneringsresultaten med avseende på noggrannheten, initialiseringstiden och tillförlitligheten.

Våra mätningar visar att användandet av nätverks-RTK resulterar i en signifikant vinst för RTK-roverssystemet, framförallt vid mätningar med långa baslinjer. Medan rovern med enkelstations-RTK-dataström upplever en massa problem vid lösningen av periodobekanta och initialiseringen, har nätverks-RTK-rovern en högre grad av framgång och signifikant mindre tid till initialisering. Nätverks-RTK når en noggrannhet på 15 mm i plan och 25 mm i höjd (beräknad utifrån samtliga utförda mätningar vid olika avstånd, 0-36

km). Motsvarande siffror för enkelstations-RTK är 26 mm och 30 mm.

1 Inledning

GPS/RTK (Global Positioning System/Real Time Kinematic) är en väletablerad teknik för praktisk detaljmätning med centimeter-noggrannhet, och är på väg att ta över en allt större del av den vardagsmätning som kräver några centimeters noggrannhet i positionen.

Det grundläggande konceptet för relativ GPS-mätning (där RTK ingår) är att reducera de huvudsakliga felkällorna, i jonosfärisk och troposfärisk fördröjning, ban- och klockfel, genom att motta satellitdata på en punkt med känd position (referensstation). Trots att det här fungerar för många tillämpningar lämnar bristen på korrelation av felet mellan bas och rover (dvs. ändringen av felet när man rör sig bort från referensstationen) stora bidrag i de korrigerade signalerna. Orsaken till detta är att vissa av de uppskattade felet, som antas vara lika vid bas och rover, är rumsligt beroende.

Ett nytt koncept, nätverks-RTK, har utvecklats de senaste åren för att lösa detta problem. Idén är att generera en virtuell referensstation (VRS) som simulerar en lokal referensstation nära användarmottagaren (rovern). Med den virtuella referensstationen försöker man korrigera för förhållandena som råder vid rovern. Tanken är att felet vid rovern och den modellerade referensstationen skall bli mer likartade än om man använder en avlägsen referensstation.

Lantmäteriet har i området Gävle-Skärplinge etablerat ett testnät för test av RTK-teknik. Testnätet är beläget inom en nätverkstriangel bestående av de tre fasta referensstationerna Gävle-Östervåla-Söderboda. I examensarbetet avsågs att göra en jämförelse av enkelstations-RTK med nätverks-RTK i testnätet för RTK-mätning för några olika fabrikat av GPS-utrustningar. I första hand skulle en jämförelse av positionsnoggrannheter och initialiseringstider studeras.

Testområdet omfattar sju punkter belägna på olika avstånd (0 - 40 km) från den fasta referensstation på Lantmäteriet i Gävle, som enkelstationsmätningarna utgår ifrån. Punkterna har valts på ett sådant sätt att det i utvärderingen skulle ges en möjlighet att undersöka om/hur noggrannheten och initialiseringen försämras (ändras) med ökat avstånd till närmaste referensstation. Punkterna har även placerats så att närmaste referensstation, för de båda RTK-teknikerna skulle bli referensstationen vid Lantmäteriet i Gävle, vilket innebär samma avstånd vid mätningarna för de olika teknikerna och gör jämförelsen relevant.

1.1 Tidigare studier

Åtskilliga studier och mätningar har utförts inom GPS-tekniken. Ett mindre antal studier har gjorts i Sverige vad gäller jämförelsen av traditionell RTK och nätverks-RTK. "Traditionell RTK kontra nätverks-RTK- en noggrannhetsjämförelse", är ett examensarbete (omfattande 20 poäng) utfört på Lunds Tekniska Högskola på uppdrag av Lantmäteriet och Helsingborgs stad under perioden juni till augusti, 2003. Syftet med studien var undersöka om nätverks-RTK kan ersätta den traditionella RTK-tekniken inom hela nätverksområdet (i detta fall SKAN-RTK), dvs. undersöka om nätverks-RTK är avståndsberoende. Noggrannheten för nätverks-RTK jämfördes med traditionell RTK (med maximalt 2,5 km mellan bas och rover) för att se på vilket avstånd från närmsta fasta referensstation som nätverks-RTK ger sämre noggrannhet än traditionell RTK. I andra hand studerades även avståndsberoendet för traditionell RTK jämfört med nätverks-RTK. Studien återfinns som LMV-rapport 2003:11 [Alm, Munsin, 2003].

2 Introduktion till GPS-mätning

2.1 Satellitsystemet

GPS är ett satellitsystem för navigering och positionsbestämning uppbyggt av det amerikanska försvaret. Antalet satelliter är minst 24 stycken. Med 24 satelliter skall positionsbestämning mot minst fyra satelliter teoretiskt kunna utföras varhelst på jorden, dygnet runt. Oftast är antalet satelliter fler, ibland upp mot 27-28 stycken, bl.a. beroende på att livslängden på satelliterna är längre än beräknat. Normalt har de en livslängd på ca åtta till tio år. Satelliterna cirkulerar i sex olika banplan, på 20 200 kilometers höjd ovanför jordytan, med en inklinationsvinkel på 55 grader. Omloppstiden är ca 11 timmar och 58 minuter, vilket innebär att samma satellitkonfiguration återupprepas fyra minuter tidigare varje dygn [Engfeldt, Jivall, 2003]. De små variationerna underlättar planeringen av GPS-mätning. Inklinationsvinkeln på 55 grader innebär att satelliterna vänder 55 grader från ekvatorsplanet. Detta medför att tillgängligheten till satelliter på nordligare latituder begränsas. Följden blir att vi i Sverige mestadels har tillgång till satelliter på södra delen av himlavalvet vilket försämrar konfigurationen och mätresultaten något.

Fem markstationer, i huvudsak utplacerade längs ekvatorn, registrerar kontinuerligt signaler från satelliterna. Markstationernas uppgift är att övervaka satellitsystemet, beräkna satelliternas ban- och klockparametrar, och vid behov flytta på satelliterna. Beräknade klockkorrektioner och predikterade bandata sänds upp till

satelliterna där de sedermera kommer att ingå som ett satellitmeddelande i signalerna som sänds ut från satelliterna [Statens Lantmäteriverk, 1996].

2.2 Mätmetoder för avståndsbestämning mellan satellit och mottagare

Positionsbestämning med GPS går i princip ut på att bestämma avståndet mellan satellit och mottagare. Satelliterna sänder ut signaler på två frekvenser, L1 och L2. På L1-frekvensen sänds både s.k. P-kod (Precision) och C/A-kod (Coarse/ Acquisition), medan L2-frekvensen endast innehåller P-kod. Dessutom innehåller signalen ett satellitmeddelande med nödvändig information om predikterade satellitpositioner och korrektioner till satellitklockan. Mätningen av avståndet kan i princip göras på två sätt, antingen med kodmätning eller bärvågsmätning.

2.2.1 Kodmätning

Med kännedom om GPS-signalens utbredningshastighet kan avståndet mellan satellit och mottagare beräknas. Vid kodmätning skapas det i mottagaren en kod synkront med de koder som genereras i satelliterna. Den från satelliten mottagna koden jämförs sedan med den i mottagaren genererade koden. Eftersom den mottagna koden har färdats från satelliten till mottagaren uppstår en förskjutning som kan uppmätas genom tidsmarkeringar i koden. Den uppmätta tidsdifferensen (t) motsvarar den tid det tar för den utsända signalen att gå från satellit till mottagare, s.k. gångtid. Ur gångtiden kan sedan avståndet (s) mellan satellit och mottagare beräknas eftersom signalens utbredningshastighet (c) är känd (=ljusets hastighet).

$$s=c*t$$

s: Pseudoavståndet

c: Ljusets hastighet

t: Tidsskillnaden

Avståndet brukar betecknas pseudoavstånd (falskt avstånd) eftersom det i allmänhet innehåller fel som uppkommer på grund av att mottagarklockorna ej är fullständigt synkroniserade med satellitklockorna [Hofman-Wellenhof, 2003]. Kodmätningen kan göras på C/A- eller P-koden och ger en upplösning på 3 respektive 0,3 meter [Van Sickle, 1996].

2.2.2 Bärvägsmätning

Vid bärvägsmätningen skapas det en likadan bärväg i mottagaren som den som mottas från satelliterna. Den i mottagaren genererade signalen har samma frekvens som den mottagna signalen men är fasförskjuten beroende på den tid det tar för signalen att ta sig från satellit till mottagare. Bärvägen har ingen tidsmarkering och därför kan inte signalens gångtid (fördröjning) beräknas direkt. Däremot kan fasförskjutningen, med hjälp av fasmätning, bestämmas mycket noggrant med en upplösning på någon hundraleds period. Avståndet mellan satellit och mottagare kan i princip uttryckas som ett antal hela bärvägsperioder plus en del av en period [Statens Lantmäteriverk, 1996]. För att kunna bestämma avståndet mellan satellit och mottagare måste alltså även antalet hela perioder vid den tidpunkt då mätningen började, s.k. periodobekanta, bestämmas. (Vid realtidsmätning kallas processen att lösa de periodobekanta för initialisering). Vid bibehållen låsning av satellitsignalen till mottagaren räknas förändringen av antalet hela våglängder från den tidpunkt då mottagarna först låste på signalen. Ur den informationen kan perioder som fanns när mätningen började räknas ut och därmed avståndet till satelliterna, i varje ögonblick, eller integrerat över en tidsperiod, t.ex. 15 sekunder.

Bärvägsmätningen kan utföras på L1, L2, eller L1 kombinerat med L2. Den sistnämnda varianten ger bäst resultat men kräver en mottagare som klarar av att mäta på båda frekvenserna. Upplösningen vid bärvägsfasmätning kan uppskattas till ett par millimeter [Engfeldt, Jivall, 2000].

2.3 Positionsbestämningsmetoder

2.3.1 Absolutmätning

Absolutmätning innebär att positionsbestämningen endast utförs med en mottagare. Detta är den enklaste formen av positionsbestämning. För avståndsmätningen används nästan uteslutande kodmätning.

Geometriskt kan man se bestämningen av positionen som en inbindning i tre dimensioner. En bestämning av positionen (X,Y,Z) kan göras:

$$(X-X_1)^2+(Y-Y_1)^2+(Z-Z_1)^2=c^2(t-b)^2$$

$$(X-X_2)^2+(Y-Y_2)^2+(Z-Z_2)^2=c^2(t-b)^2$$

$$(X-X_3)^2+(Y-Y_3)^2+(Z-Z_3)^2=c^2(t-b)^2$$

$$(X-X_4)^2+(Y-Y_4)^2+(Z-Z_4)^2=c^2(t-b)^2$$

där X_i , Y_i och Z_i betecknar satellit i :s position, c är ljushastigheten, t är tidsskillnaden och b är mottagarklockans synkronisering till GPS-tid (klockfelet). För att lösa ekvationssystemet med fyra obekanta (X , Y , Z , klockfelet) krävs fyra observationer. Det innebär att för att få en tredimensionell position krävs längdmätning mot minst fyra satelliter [Egeltoft, 1996]. I praktiken eftersträvas fler satelliter för att få en säkrare position.

Absolutbestämning är vanlig vid t.ex. navigering eller tillämpningar som inte kräver så hög noggrannhet. Med absolut mätning erhålls en horisontell positionsnoggrannhet på ca fem meter (95 %) [SWEPOS(2), 2003].

2.3.2 Relativ mätning

För att förbättra noggrannheten vid absolut mätning kan man utnyttja s.k. relativ mätning. Vid relativ mätning används två eller flera mottagare tillsammans där man kombinerar mätdata från de satelliter och de mottagare som har använts. En eller flera mottagare brukar placeras på redan kända punkter. Förfarandet utnyttjas för såväl kod- som bärvågsmätning. Principen vid relativ kodmätning är att mottagaren på en känd position (referensstationen), med hjälp av skillnaden mellan den mätta positionen och kända positionen, beräknar korrektioner för pseudoavstånden till satelliterna.

Vid bärvågsmätning är de periodobekanta endast möjliga att lösa om felkällorna är reducerade. Detta görs vid den relativa positioneringen. När mätdata från två eller flera mottagare som samtidigt mäter mot samma satelliter kombineras (differentieras), så elimineras, eller reduceras, de flesta felkällor som försämrar noggrannheten vid absolut mätning. Det krävs att man mäter mot minst fyra satelliter som är gemensamma för de båda mottagarna för att få en lösning. Felen i avstånden till satelliterna kommer att bli ungefär lika stora på alla mottagarstationer om inte mottagarna är placerade för långt ifrån varandra.

De vanligaste relativa mätmetoderna är DGPS, RTK och statisk mätning. Noggrannheten är betydligt bättre än vid absolut positionsbestämning. Relativ kodmätning (DGPS) ger en noggrannhet på en halv meter till några meter. Relativ bärvågsmätning i realtid ger centimeternoggrannhet, medan relativ mätning med efterberäkningar kan ge millimeternoggrannhet [Lantmäteriet, 2003].

3 Felkällor och faktorer som påverkar vid GPS-mätning

3.1 Atmosfärsfel

Satellitsignalen passerar genom atmosfären på sin väg till mottagaren. Om det inte hade varit för atmosfären hade signalens utbredningshastighet varit samma som ljusets hastighet i vakuum. Emellertid så påverkar atmosfärens sammansättning signalen. För två stationer positionerade nära varandra (< 10 km) mottas signaler genom approximativt samma medium i atmosfären vilket innebär att felen, relativt sett, till stor del tar ut varandra. Atmosfärsfelen delas upp i jonosfärs- och troposfärsfel.

3.1.1 Jonosfärsfel

Jonosfären omger jorden på en höjd på av ca 50 till 1 000 kilometer. Jonosfären orsakar en signalfördröjning av satellitsignalerna som leder till tids- och skalfel. Felets storlek vid GPS-mottagaren är tids- och platsberoende och dessutom frekvensberoende, något som innebär att det till stor del kan reduceras med en linjärkombination av mätningar på olika frekvenser (m.h.a. en tvåfrekvensmottagare som mäter på både L1- och L2-frekvensen).

Andra störningar i jonosfären orsakas av solens s.k. solstormar som uppkommer då moln av helium och väte inbäddade i ett magnetfält kastas ut från solens yta. Molnet färdas genom rymden mot jorden och när det elektriskt laddade molnet krockar med jordens magnetfält uppstår det elektriska strömmar som kan störa GPS-signalerna.

- Jonosfärfelet är alltså beroende av följande faktorer:
- Elevation/asimutvinkel till satelliten
- Tid på dagen (solvinkel)
- Latitud
- Solstormar
- GPS-signalens frekvens

Ekvatoriala och polära regioner upplever extremiteter i jonosfäriska effekter. Den allvarligaste effekten benämns scintillation och orsakar snabba variationer i amplituden och fasen hos GPS-signalerna.

Under turbulenta förhållanden ändras det jonosfäriska felet fort. Det innebär att referensstationer placerade för långt bort blir otillräckliga.

Under hög jonosfärisk aktivitet, kan det jonosfäriska felet vid en punkt variera flera centimeter per sekund, vilket gör att de jonosfäriska korrektionerna snabbt blir inaktuella.

I mellanlatituda regioner är de jonofärska felen mer stabila och varierar generellt bara ett par millimeter per sekund, förutom för nedåt- och uppåtstigande satelliter, vilket innebär att avståndet mellan referensstationerna kan ökas [Talbot, 2003]. Jonofären bryter GPS-signalen i stigande grad med minskad infallsvinkel. På grund av detta brukar man använda en elevationsmask som normalt sätts till mellan 10 och 15 grader. Satelliter som befinner sig lägre över horisonten filtreras (maskas) alltså bort och ingår ej i positionsbestämningen.

3.1.2 Troposfärsfel

Troposfärsfelet orsakas av en fördröjning av GPS-signalen i det lägre skiktet av atmosfären, från jordytan upp till ca 10 kilometer. Skiktet omfattar huvudsakligen moln (vattenånga) och torra gaser.

Troposfären är, till skillnad mot jonofären, frekvensoberoende och dess verkan kan därför inte tas bort genom observation på två frekvenser. De torra komponenterna kan härledas via standardmodeller och svarar lyckligtvis för majoriteten av fördröjningen. Den fuktiga komponenten, moln och vattenånga, beror på rådande väderförhållanden och är svårare att modellera. Den troposfärska förseningen varierar med följande faktorer:

- Elevationsvinkel till satelliten
- Höjd över havet
- Temperatur
- Tryck
- Relativ fuktighet

Jämfört med jonofären, ändrar sig den troposfärska fördröjningen långsamt och ändrar sig sällan mer än en centimeter per sekund för satelliter över 30 graders elevation [Talbot, 2003].

3.2 Banfel

Vetskapen om satelliternas banor innebär också vetskapen om satelliternas positioner i ett visst ögonblick, och utifrån dessa beräknas mottagarens position.

Banfelet orsakas av brister i modelleringen av satellitbanorna. Satelliterna övervakas och kontrolleras av s.k. monitor- eller spårstationer placerade i huvudsak längs ekvatorn. Dessa registrerar kontinuerligt signalerna från satelliterna, beräknar aktuella banddata och predikterar framtida banddata. Det förekommer emellertid oregelbundenheter i satellitbanorna beroende på t.ex. tekniska problem vid driften, inhomogeniteter i jordens gravitationsfält, tidsberoende effekter från månen och solen, soltryck etc. som orsakar fel i banpredikteringen [Wahlund, 2002]. Noggrannheten i utsända

bandata är ungefär 3-5 meter [Engfeldt, Jivall, 2003]. Påverkan på en baslinje vid relativ mätning är proportionell mot felet i bandata och baslinjens längd:

$$\Delta x = \frac{l}{d} \Delta X$$

Δx : fel i baslinjen

l : baslinjens längd

d : avstånd till satelliten

ΔX : fel i bandata

[Bauersima,1983]

Vilket innebär att banfelet orsakar ett fel på ungefär 0,2 ppm på en baslinje (2 mm per 10 km).

3.3 Flervägsfel

Flervägsfel är ett fel som beror på störningar orsakade av att satellitsignalen färdas olika väg (direkt eller reflekterat) mellan satelliten och mottagaren. Felen uppkommer när signalen reflekteras mot t.ex. vattenytor, plåttak eller träd och därefter interfererar med den direkta signalen, något som kan resultera i ett felaktigt avstånd.

Tillverkarna har olika mjukvarumodeller för att utesluta dessa felaktiga signaler. Genom att höja elevationsmasken, använda multipath-filter eller antenn med jordplan kan man reducera risken för flervägsfel. Det mest effektiva är dock att undvika platser där det kan uppstå problem [Hofman-Wallenhof, 2001; Persson, 2002].

3.4 Klockfel

Två klockor är involverade i beräkningen av avståndet mellan satellit och mottagare, satellitklockan och mottagarklockan. Klockfelet beror på att klockorna i satellit och mottagare inte är helt synkroniserade. Felet elimineras vid bärvågsmätning genom att använda kombinationer av GPS-observationer, s.k. enkel- och dubbeldifferenser. Enkeldifferensen, som är skillnaden mellan fasmätningar från samma satellit till två olika punkter, eliminerar satellitklockans fel. Dubbeldifferensen, vilket innebär att man tar skillnaden mellan två enkeldifferenser, eliminerar mottagarklockans fel [Wahlund, 2002].

3.5 Satellittillgänglighet

Vid GPS-mätning krävs det i teorin tillgång till minst fyra satelliter för att lösa de fyra obekanta parametrarna, dvs. klockfelet och de tre dimensionerna i plan och höjd. Men i praktiken så krävs det tillgång till minst sex satelliter för att få ett riktigt bra resultat. GPS-systemet garanterar tillgång till minst fyra satelliter, oberoende av tid och plats. Dock gäller den garantin endast för öppna ytor. Genom att

utnyttja de predikterade satellitbanorna kan man för aktuellt område beräkna satellittillgängligheten under en tidsperiod och därigenom se till att mätningen sker under bra förhållanden. Ett stort antal tillgängliga satelliter höjer kvaliteten på mätningarna (bättre geometri, flera överbestämningar) och ökar chansen att få en positionsbestämning även på platser utan fri horisont. SWEPOS tillhandahåller en kostnadsfri tjänst för satellitprediktering [Engfeldt, Jivall, 2000; SWEPOS(1), 2003].

3.6 Satellitkonfiguration

För en bra kvalitet på positionsbestämningen bör satelliterna ur geometrisk synpunkt vara väl spridda över himlen, dvs. väl fördelade i de olika väderstrecken och att de även är belägna på låga elevationer. Konfigurationen kan under pågående mätning kontrolleras genom att titta på hur stort DOP-värdet (Dilution Of Precision) är, vilket anger hur bra satellitgeometrin är. Ju lägre DOP-tal desto bättre satellitkonfiguration. Dessa tal är teoretiska kvalitetstal som multiplicerade med mottagarens mätmedelfel ger aktuellt fel i mätningarna [Statens Lantmäteriverk, 1996]. Det förekommer flera olika DOP-tal beroende vilka obekanta som ska bestämmas. Vanligast är PDOP och GDOP:

- PDOP (= Position DOP, har att göra med de tre dimensionerna och är det DOP-värde man oftast använder sig av för att sätta någon gräns för vilken satellitgeometri man inte ska mäta vid).
- GDOP (= Geometric DOP, har att göra med fyra storheter, tre dimensioner + klockfelet. Är alltid störst av DOP-värdena).

3.7 Signalkvalitet och sikthinder

För att få en bra satellitgeometri är det bra att även ha med satelliter som går lågt över horisonten. Låga elevationer innebär dock att signalerna från satelliterna får ett lägre signalbrusförhållande eftersom vägen genom atmosfären blir längre. Som en kompromiss av ovanstående brukar man inte använda satelliter med en lägre höjd än cirka tio grader över horisonten [Engfeldt, Jivall, 2000].

GPS-mätning kräver fri sikt mellan satelliten och mottagaren. På nordliga latituder, som i Sverige, är det extra viktigt att ha fri sikt söderut eftersom de flesta satelliter finns där på grund av satellitbanornas inklinations. Vid mätning intill hus och i områden med mycket vegetation kan det vara svårt att få kontakt med tillräckligt många satelliter. Generellt så blockerar lövträdskronorna satellitsignalen, medan satellitsignalerna oftast går igenom barrskogskronor, vilket i det senare fallet dock medför att signalen blir dämpad. Den dämpade signalen innebär att positionen har en tendens till att bli sämre när man mäter i, eller nära, en barrskog.

4 RTK

Termen RTK står för Real Time Kinematic, kinematisk bärvågs-mätning i realtid, vilket innebär att mätningen kan utföras såväl när mottagaren är i rörelse som när den står statiskt uppställd och att positionen erhålls direkt (kräver inga efterberäkningar).

RTK är en tillämpning av relativ positionering där en referensmottagare står på en känd punkt medan den rörliga enheten används för detaljmätning. Innan mätningarna börjar måste mottagarna initialiseras, dvs. lösa de periodobekanta och erhålla en s.k. fixlösning. Initialiseringstiden kan ta allt från något tiotal sekunder till några minuter (timmar vid ogynnsamma förhållanden) beroende på bland annat antal satelliter, satellitgeometri, avståndet till närmaste referensstation och mottagarens kvalitet. Även när man fått fixlösning måste man se till kvaliteten i mätningarna. I de flesta programvaror redovisas kvaliteten i mätningen i form av ett medelfel, ofta med ett övre värde som kassationsgräns.

De rörliga mottagarna måste ha signallåsning till minst fyra satelliter gemensamma med referensmottagarna efter att periodobekanta är bestämda. Vid signalavbrott, som innebär att man tappar låsningen, måste periodobekanta bestämmas på nytt.

Korrekktionerna från referensstationen ökar noggrannheten vid rovern så länge som de atmosfäriska felen är lika, eller ungefär lika, vid både referensstation och rover. Så är fallet om inte avståndet mellan dem är för stort. Långa baslinjer skapar problem under lösningen av periodobekanta främst beroende på skillnaden i atmosfärsrefraktion, som ökar ju längre från referensstationen man kommer. Standardfelet i observationerna blir för stor för att lösa alla obekanta. Algoritmerna för RTK är anpassade för avstånd upp till tio kilometer. Noggrannheten brukar anges till 10-30 millimeter (95%) + 1-3ppm (=1-3mm per km) [Engfeldt, Jivall, 2003].

4.1 Fasta referensstationer

Ett alternativ till att etablera tillfälliga referensstationer kan vara att utnyttja fasta referensstationer. De fasta referensstationerna registrerar och lagrar kontinuerligt data från de satelliter de för tillfället har kontakt med. Data från en viss tidsrymd och från en eller flera referensstationer kan sedan erhållas från den myndighet eller företag som driver dessa stationer. Istället för direkta mätdata kan man även erhålla korrekktioner vilket möjliggör relativ mätning i realtid.

Utsändningen av data från referensstationen sker oftast med kraftigare radioutrustning för att nå längre än vad 0,5-Watt-modemen klarar. I vissa fall förekommer även repeatersystem för att förlänga räckvidden i utrustningen [Wiklund, 2002].

En permanent station utesluter de flesta av nackdelarna med en temporär referensstation. Man slipper det tidsödande arbetet med att etablera en egen tillfällig referensstation. Man behöver också bara tillgång till en GPS-mottagare, vilket minskar kostnaderna för användarna. Även stöldrisker minskar, som annars finns när referensen lämnas utom synhåll från rovern. Den fasta referensstationen placeras ofta på ett säkert ställe, t.ex. taket på ett hus. Begränsningen i att utnyttja en fast station ligger inte bara i räckvidden för radioutsändningen, utan även i att de olika atmosfäriska förhållandena begränsar användningsområdet till cirka 10-20 kilometer. En vidareutveckling av RTK-tekniken har gjorts de senaste åren där man binder ihop flera fasta referensstationer i ett datornätverk (se kap. 5).

5 Nätverks-RTK

Nätverks-RTK är en teknik som har utvecklats de senaste åren för att möjliggöra en ökning av avståndet mellan referensstationen och mottagaren. Begränsningen i att mäta med egen RTK-station ligger i de olika atmosfäriska förhållanden som råder på platsen där referensstationen respektive rovern står. Instrumenttillverkarna rekommenderar idag ett maximalt avstånd mellan referensstation och rover på 10-15 km.

Nätverks-RTK är en vidareutveckling av RTK-tekniken där man binder ihop flera referensstationer i ett nätverk och beräknar en modell över felkällornas inverkan, främst troposfärs- och jonosfärs-korrekationer, i området som stationerna täcker. Modellen används i realtid för att korrigera mätdata som insamlas i området. Tester som hittills har genomförts visar att avståndet mellan de fasta referensstationerna kan ökas från ca 20 till 70 km med bibehållen noggrannhet [SWEPOS(2), 2003]. Detta innebär att ett relativt glest nät av referensstationer kan försörja en stor grupp av användare.

5.1 Tekniken

Nätverks-RTK innebär, som nämnts, att data från fler referensstationer samlas in och analyseras i en programvara för att skapa en korrektionsmodell över området som stationerna omfattar. Den nätverks-RTK-programvara som har använts i detta projekt, GPSNet från Trimble, arbetar efter principen "virtuella referensstationer". Kortfattat går det till så att ett NMEA-meddelande (NMEA, se kap 5.4) sänds från GPS-mottagaren i den rörliga enheten (rovern), innehållande roverns position, via GSM-länk till nätverks-RTK-programmet. Vid uppkoppling mot nätverks-RTK-servern tilldelas användaren en RTK-generator. RTK-generatorn väljer det område som användaren befinner sig i, eller är i närheten av, samt närmaste referensstation. För positionen som mottagaren sände in beräknar

nätverkservern med hjälp av data från de sex närmaste referensstationerna korrektionsmodeller för avståndsberoende fel och interpolerar fram korrektioner för den aktuella positionen (figur 5.1). Det görs med andra ord en geometrisk korrektion så att rovern får korrektioner från en referensstation med samma position som GPS-mottagaren har skickat in till nätverks-RTK-servern, vilket förklarar benämningen "virtuell referensstation" (figur 5.2). Man försöker alltså med hjälp av interpoleringen efterlikna förhållandena som råder vid platsen (rovern) och på detta sätt reducera de systematiska felen. För att modellera jonosfären fullt ut bör mätningarna göras på både L1 och L2 [Trimble(1), 2003; Vollath, 2003].

5.2 Nätverksprocessen

GPS-mätdata från referensstationerna i nätverket överförs kontinuerligt till nätverksprocessorn. Vid centralservern utför nätverksprocessorn integritetskontroller på alla GPS-observationerna, för varje epok av data. Giltigheten i avstånden mellan varje station och satellit kontrolleras. För varje station utförs en beräkning av förbättringar till kodmätningen, en uppskattning av klockfelet, förkastningar av grova fel vid kodmätningen och granskning och reparation av periodbortfall.

För varje baslinje beräknas differentiella förbättringar till kodmätningarna samtidigt som en förkastning av grova fel görs. Bärvägsförbättringar beräknas utifrån trippeldifferensen. Ytterligare en sökning och korrektion av periodbortfall görs och grova fel till bärvägsmätningarna förkastas.

När integriteten hos data har kontrollerats, utför programvaran en kontinuerlig beräkning av följande genom att analysera dubbeldifferensen av bärvägsobservationerna:

- Jonosfäriska fel
- Troposfäriska fel
- Banfel
- Bärvägsperiodobekanta för L1 och L2

Effekten från ovanstående fel, på en rover inom referensstationsnätverket, kan beräknas utifrån dessa parametrar och på så sätt reducera de systematiska felen [Trimble(1), 2003; Trimble(2), 2003].

5.3 Nätverkskonfigurationen

GPS-mätdata överförs kontinuerligt till centralservern från referensstationerna i nätverket genom fasta förbindelser. Alla SWEPOS-stationer är anslutna till driftledningscentralen på Lantmäteriet via telefonledningar (TCP/IP-förbindelse). Vid

driftledningscentralen är de inkommande telefonledningarna kopplade till en router. PC:n som kör nätverks-RTK-programvaran läser data via IP-protokoll från routern, där varje referensstation har sin egen IP-adress.

Kommunikationslänken mellan RTK-rovern och driftledningscentralen är GSM. GSM stöder den tvåvägs datakommunikation som behövs för att sända användarpositionen till driftledningscentralen och för att motta VRS RTCM-data (RTCM, se kap 5.4) tillbaka från driftledningscentralen. De inkommande samtalen tas emot av en accessserver, med flera digitala modem. Det gör det möjligt att betjäna flera RTK-rovrar parallellt och tillåter alla rovrar att använda samma telefonnummer för att koppla upp sig mot systemet (se figur 5.3 för principen av kommunikationen och datatrafiken i systemet) [Trimble(1), 2003].

5.3.1 SWEPOS

SWEPOS är ett rikstäckande nät av permanenta (fasta) referensstationer för GPS-mätning som har byggts upp i samarbete mellan Lantmäteriet, Onsala rymdobservatorium och projektet "GPS-resurser i Norrbotten".

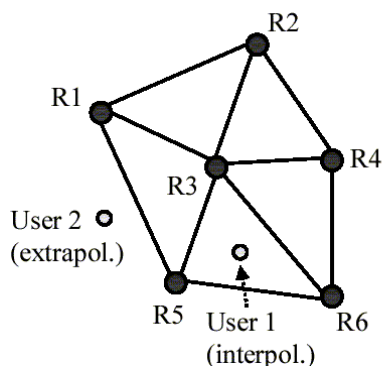
En SWEPOS-station består av en fast monterad GPS-mottagare som är placerad över en punkt med kända koordinater, där mottagaren registrerar data från tillgängliga satelliter dygnet runt. SWEPOS uppgift är att tillhandahålla data från GPS-satelliter för olika tillämpningar – allt från positionsbestämning, navigering, till studier för vetenskapliga ändamål som t.ex. rörelser i jordskorpan. Lantmäteriet ansvarar för drift och utveckling. Styrning och övervakning av SWEPOS-nätet sker från driftledningscentralen på Lantmäteriet i Gävle. Alla SWEPOS-stationer är anslutna till centralen via fasta telefonledningar (TCP/IP-förbindelser). Driftledningscentralens uppgift är att övervaka SWEPOS-nätet, samla in data från stationerna och efter kvalitetskontroll vidarebefordra dessa antingen till distributörer eller slutanvändare. GPS-användare inom stationens täckningsområde kan antingen få mätdata från stationerna eller data i form av korrektioner. Data kan distribueras i realtid eller i efterhand [SWEPOS(1), 2003].

5.4 RTCM

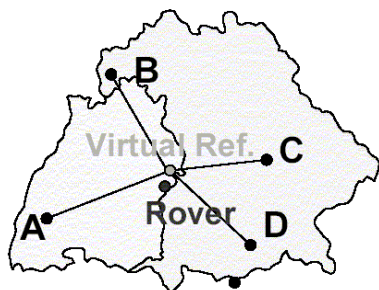
RTK-korrektionerna till rovern skickas i standardöverföringsformatet RTCM (Radio Technical Commission for Maritime service). De flesta GPS-mottagare använder sig av RTCM-formatet för att ta emot korrektioner och av NMEA-format (National Marine Electronics Associations) för att leverera positionsdata.

GPS-referensstationsnätet arbetar med meddelandena 3, 18, 19, 20, 21, och 22. För vissa korrektionsmeddelanden (3 och 22) som mottagaren tar emot hänvisas positionen inte till den fysiska referensstationen utan i stället till den virtuella referensstationen som genereras. På grund av detta kan inte mottagaren (rovern) bedöma det riktiga avståndet till den fysiska referensstationens position vilket är av vikt vid bedömningen av förbättringar till felen i kod- och bärvågsmätningarna med tanke på de atmosfäriska felen och banfelen [Trimble(1), 2003].

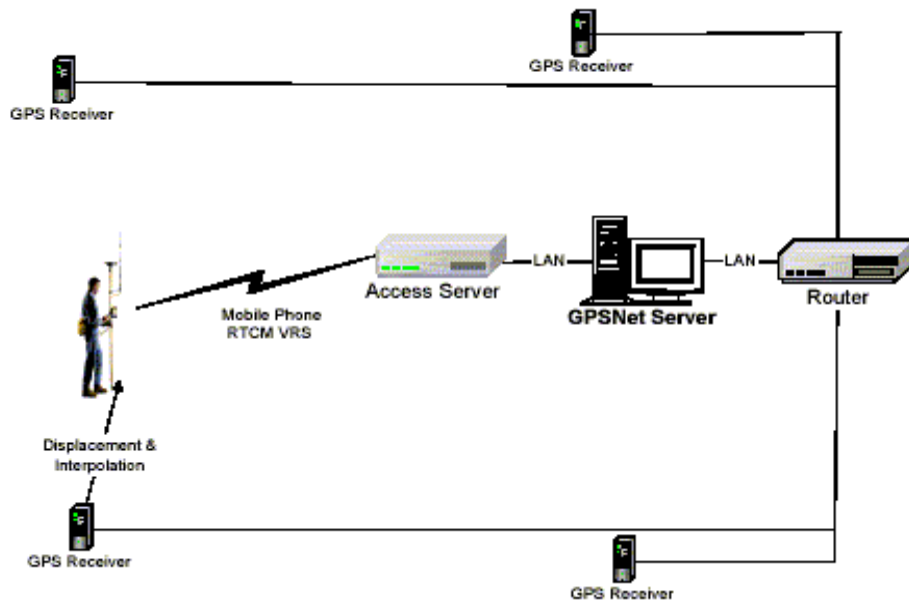
Trimble GPSNet utnyttjar det användardefinierade meddelandet 59 (ännu ingen fastlagd RTCM-standard) för att överföra den fysiska referensstationens position samt information om de jonosfäriska och geometriska korrektionerna för den virtuella referensstationen till mottagaren. Med hjälp av denna information kan mottagaren bedöma inverkan av restfelen bestående av systematiska atmosfärsfel och banfel. Mottagaren kan då till viss del vikta informationen från de fysiska referensstationerna beroende på avståndet till dessa [Persson, 2003; Trimble(1), 2003].



Figur 5.1: För positionen som mottagaren sände in beräknar nätverkservern med hjälp av data från de sex närmaste referensstationerna korrektionsmodeller för avståndsberoende fel och interpolerar fram korrektioner för den aktuella positionen. Finns möjlighet att både extrapolera och interpolera.



Figur 5.2: En geometrisk korrektion utförs så att rovern får korrektioner från en referensstation med samma position som GPS-mottagaren har skickat in till nätverks-RTK-servern, vilket sedermera förklarar benämningen "virtuell referensstation".



Figur 5.3: visar principen för kommunikationen och datatrafiken i systemet.

6 Metod och genomförande

Lantmäteriverket har i området Gävle-Skärplinge etablerat ett testnät för test av RTK-teknik. Testnätet är beläget inom en nätverkstriangel för RTK bestående av de tre fasta referensstationerna Gävle-Östervåla-Söderboda.

I examensarbetet har en jämförelse av enkelstations-RTK med nätverks-RTK gjorts i testnätet för RTK-mätning för några olika fabrikat av GPS-utrustningar. I första hand har en jämförelse av positionsnoggrannheter och initialiseringstider studerats.

Vår metod var att göra mätningar på punkter som har koordinater som anses som sanna värden och därefter beräkna differenser i plan och höjd mellan dessa och erhållna positioner. Punkternas "sanna" koordinater har erhållits med två statiska GPS-mätningar per punkt om tre timmar var. Med hjälp av differenser mellan mätta och sanna koordinater kunde vi därefter räkna ut statistiska värden för noggrannhet och precision. Ett stort antal mätningar på respektive punkt gjordes för att få ett statistiskt tillförlitligt underlag.

Testpunkterna valdes så att baslinjelängden vid dessa punkter kom att variera från 0 till 36 kilometer till närmaste referensstation. Variationen ger en möjlighet att undersöka hur positionsnoggrannheten ändras med ökat avstånd från referensstationen. Anledningen till detta är främst skillnader i atmosfärsförhållanden och vinklar mot GPS-satelliterna vid användarens och referensstationens position. För enkelstations-RTK innebär detta i teorin att korrektionernas giltighet avtar med avståndet från referensstation. Nätverks-RTK påverkas inte av detta på samma sätt i och med att en virtuell station

skapas utifrån en multistationslösning, där bl.a. en atmosfärmodell interpoleras fram. Testerna skulle även ge information om eventuella tekniska problem. Tiden för att erhålla fixlösning klockades och noterades för att det skulle gå att bedöma användarvänligheten och kapaciteten för produktionsmätning.

6.1 Systembeskrivning

För att jämföra och analysera enkelstation-RTK-systemet med systemet som använder virtuell referensstationsdata användes en uppställning av två RTK-system med mottagare för rovern. Uppställningen såg till att de två RTK-mottagarna mottog samma GPS-data, men olika RTCM data från driftledningscentralen i Gävle, där den ena använde geometriskt korrigerad VRS-data och den andra "vanliga" RTK-data producerat av nätverks-RTK-programvaran GPSNet med en position för Lantmäteriverket.

Kommunikationen mellan rovrarna och driftledningscentralen utfördes m.h.a. GSM-länk där två olika telefonnummer användes, ett för nätverks-RTK och ett för enkelstations-RTK. Enkelstations-RTK kopplades upp mot ett modem vid driftledningscentralen medan nätverks-RTK gick till en router.

Som det har nämnts i kapitel 4.2 sänds data från referensstationerna i nätverket till programvaran för nätverks-RTK. Även data från referensstationen vid enkelstationsmätningarna beräknades av nätverksprogramvaran GPSNet vid driftledningscentralen. Tanken var att alla fabrikat skulle ges samma förutsättningar vid enkelstations-RTK, och ej göras beroende av ett speciellt fabrikat på basstationen.

6.2 Lokalisering av testpunkterna

Testområdet omfattar sju punkter belägna på olika avstånd från den fasta referensstation på Lantmäteriet i Gävle som enkelstationsmätningarna utgår ifrån (se figur 6.1). Avståndet till punkterna ökar med ett intervall på fem till sex kilometer.

Punkterna har valts på ett sådant sätt att det i utvärderingen skulle gå att undersöka om/hur noggrannheten och initialiseringstiderna påverkades av avståndet till närmsta referensstation. Testpunkterna blev därmed spridda med utgångspunkt från referensstationen in mot tyngdpunkten av nätverkstriangeln.

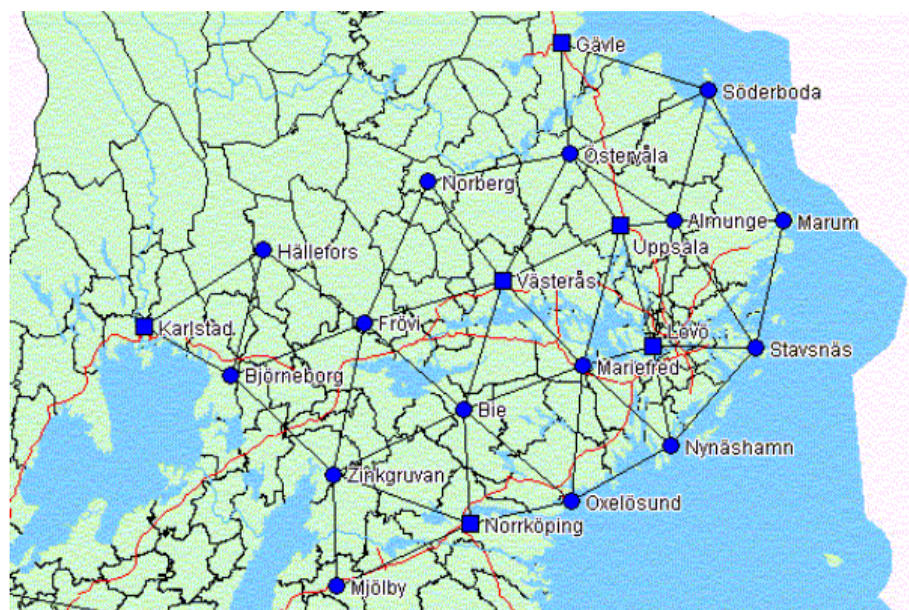
Punkterna har även placerats så att närmsta referensstation, för de båda RTK-teknikerna, skulle bli referensstationen vid Lantmäteriet i Gävle vilket innebär samma avstånd vid mätningarna för de olika teknikerna vilket sedermera gör jämförelsen relevant. Vid punkt sju i Skärplinge kom dock punkten att placeras så att närmaste referens-

stationen för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda (vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda, medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle).

För att testa noggrannheten (hos teknikerna) bör mottagningsförhållanden för både GPS och GSM vara så goda som möjligt. Testpunkterna lokaliserades därför så att de hamnade i ett relativt öppet landskap. Det medger goda mottagningsförhållanden för GPS-signaler och mindre risk för flervägsfel. Genom att testpunkterna etablerades i ungefär liknande förhållanden blir även resultaten från olika punkter delvis jämförbara.



Figur 6.1: Testmätningarna har utförts vid sju olika punkter, belägna på olika avstånd från den fasta referensstationen i Gävle varifrån korrektionerna till enkelstationsmätningarna erhålls. Testområdet ligger inom nätverkstriangeln Gävle-Östervåla-Söderboda. Nätverkskorrektionerna beräknas m.h.a. interpolation från de sex närmaste referensstationerna (se figur 6.2).



Figur 6.2: Nätverkstriangeln Gävle-Östervåla-Söderboda ingår som en del i ett större nät av fasta referensstationer. Bilden visar ett nätverk av SWEPOS- och projektstationer som skapades i samband med projektet Position Stockholm-Mälaren-2.

6.3 Mätstrategi

För att säkert kunna hävda att mottagarna för nätverks-RTK respektive enkelstations-RTK har likvärdiga förutsättningar för en positionsbestämning bör mätningarna utföras samtidigt vid varje punkt. Tiden mellan mätningarna bör vara så kort som möjligt för att satellitkonstellationen och atmosfärförhållanden ej skall hinna ändra sig så mycket och därigenom orsaka skillnader i förutsättningar för mottagarna. Simultan mätning användes för att eftersträva likvärdiga yttre förhållanden där det var praktiskt genomförbart. I de fall där det inte var möjligt (när vi endast hade en utrustning) utvecklades en mätstrategi där mätningarna utfördes i direkt följd av varandra, dvs. varannan mätning med respektive teknik.

För att undvika systematiska fel planerades mätningarna så att besöken vid varje punkt var förlagda till olika dagar samt vid olika tidpunkter på dagen. För att inte systematiska fel orsakade av satellitkonstellationen skall uppkomma bör man undvika att mäta under samma tid på dygnet vid återbesöken. Val av olika dagar minimerar risken att införa fel orsakade av yttre faktorer såsom t.ex. väder och utsändning av korrektioner.

6.4 Genomförande av testmätningarna

Testmätningarna som ligger till grund för undersökningen har gjorts i fyra mätserier per punkt för respektive teknik och utrustning, där

en mätserie motsvarar tio mätningar. Eftersom tre fabrikat har använts har sammanlagt tolv mätserier per punkt utförts.

Inmätningen av varje mätserie har i så stor utsträckning som har varit möjligt gjorts vid olika dagar och tidpunkter för att undvika systematiska fel. Vid vissa mätningar där möjlighet fanns har nätverks-RTK och enkelstations-RTK mätts simultant. I annat fall var mätproceduren att de mättes varannan gång under hela mätserien för att hamna så nära varandra tidsmässigt som möjligt.

Varje mätserie har följt en mätprocedur som presenteras nedan, för att det efter testperiodens slut skulle gå bra att analysera alla mätningar på ett likvärdigt sätt. För att göra mätningarna oberoende av varandra har ominitialisering gjorts vid varje mätning i mätserien.

Vid testmätningarna fördes protokoll för varje mätning där det noterades tid till initialisering, kvalitetstal, PDOP, ålder på referensdata och kvalitetstal på GSM-länk.

1. För varje mätserie utfördes 10 mätningar enligt följande process:
2. GPS-mottagaren för enkelstations-RTK (om)initialiseras
3. Inväntar flytlösning och noterar tid till flyt
4. Inväntar fixlösning och noterar tid till fix
5. Noterar eventuellt kvalitetstal vid fix
6. Noterar PDOP vid fix
7. Noterar kvalitetstal för GSM-länk
8. Noterar ålder på referensstationsdata
9. Eventuella anmärkningar görs
10. Punkt 1-8 genomförs därefter för nätverks-RTK (för Trimble och Topcon, det mättes simultant med Leica)

Upprepar sekvensen 10 gånger.

För att eftersträva produktionsmässighet och bra resultat ställdes vissa krav och gjordes vissa inställningar i samband med mätningarna:

- Maximal initialiseringstid sattes till fem minuter, varefter initialiseringen betraktades som avbruten och en ominitialisering var tvungen att göras.
- Vid ominitialisering bröts kontakten till satelliterna genom att koppla ner och stänga av mottagaren.
- Mätdata sparades så fort som den inställda positionskvaliteten uppfylldes. För Leica 3D <50 mm, för Trimble horisontell precision <15 mm och vertikal precision <20 mm. Ingen förinställd positionskvalitet för Topcon (mätningen gjordes direkt när fixlösning erhöles).

- Högsta tillåtna PDOP-värden sattes enligt tillverkarnas krav, PDOP 4 för Leica och PDOP 6 för Trimble.
- Elevationsmasken sattes till 13 grader.
- Mätningarna gjordes oavsett vilka atmosfäriska förhållanden som rådde.
- Krav på att minst sex satelliter skulle användas vid mätningarna för att få överbestämningar.

6.4.1 Utrustning

- GPS/RTK-roverutrustning
- GSM-modem
- Sim-kort för GSM

Mottagarfabrikaten som var med i testet var Leica SR 530, Topcon Legacy och Trimble 5700. Lantmäteriet har även låtit utföra testmätningar med ett fjärde fabrikat, Ashtech Z-Extreme. Resultaten från dessa mätningar bifogas i en bilaga.

6.4.1.1 Leica

Under perioden 4/4- 22/4 2003 utfördes 24 mätserier för respektive RTK-teknik. Två Leicautrustningar användes för simultan mätning mellan nätverks-RTK och enkelstations-RTK. De båda mottagarna kopplades, med hjälp av en antennförgreningsdosa, till en gemensam AT 502-antenn. GPS-antennen monterades med hjälp av stativ och trefot för att få en noggrann centrering över punkten. Mottagare och modem bars i ryggsäck.

En av tillverkaren inställd spärr för mätningar med enkelstation över avstånd på trettio kilometer medförde att inga mätningar kunde utföras på testpunkt nummer sju i Skärplinge.

6.4.1.2 Trimble

Under perioden 23/4- 21/5 utfördes 28 mätserier för varje RTK-teknik. Tillgång till endast en utrustning innebar att mätningarna fick göras växelvis mellan enkelstations- och nätverks-RTK i varje mätserie. Mottagaren kopplades till en Trimble Zephyr antenn som centrerades över punkten med hjälp av ett stativ. Mottagare, GSM-modem och externa batterier bars i ryggsäck.

6.4.1.3 Topcon

Under perioden 9/5- 3/6 utfördes 24 mätserier per RTK-teknik. Vi hade bara tillgång till en roverutrustning vilket medförde att mätningarna fick göras växelvis mellan de båda mätteknikerna. Mottagaren kopplades till en LegAnt-2 antenn. Stativ användes för

noggrann centrering. Mottagare, GSM-modem och externa batterier bars i ryggsäck.

Det saknas mätserier från punkt nummer sju i Skärplinge. Ett flertal mätningar utfördes på testpunkten. Men vid varje mättillfälle uppstod stora problem med att få fixlösning för enkelstations-RTK. Har bara ett par registrerade mätningar från mättillfällena som dock inte räcker som statistiskt underlag för en utvärdering av mätningarna på punkten. På grund av utdragna mätningar och tidsbrist hann vi ej utföra flera testmätningar på punkten med Topconutrustningen.

7 Resultat

Under testperioden har det utförts ungefär 1 600 mätningar på sju kända SWEREF-punkter. Inga transformationer har gjorts. Alla koordinater baseras på horisontella koordinater (latitud och longitud) och höjd över ellipsoiden i SWEREF 99. Mätningarna har sammanställts på ett antal översiktliga sätt i tabell- och figurform i resultatdelen. I avsnitt 7.2-7.9 redovisas resultaten från mätningarna på de sju testpunkterna i testfältet med avseende på den geometriska kvaliteten i plan och höjd samt tiden till initialisering. När det gäller den geometriska kvaliteten i plan så är det den radiella planavvikelsen som redovisas. Mätningarna har även sammanställts på ett mer detaljerat sätt i bilagorna där bl.a. planavvikelsen även redovisas i latitud och longitud. I det inledande kapitlet, kap 7.1, ges en kort förklaring till de kvalitetstermer och begrepp som har använts i resultatkapitlet.

7.1 Kvalitetstermer

7.1.1 Noggrannhet

Noggrannheten beskriver de mätta värdenas spridning kring ett sant värde. Om feLEN (fel = mätt värde - sant värde) är normalfördelade bör cirka 68 procent av mätningarna ha ett fel som är mindre än noggrannheten. En hög noggrannhet innebär att mätningarna är väl samlade och väl centrerade (kring det sanna värdet). En hög noggrannhet implicerar hög precision samt en hög riktighet. Noggrannheten är beräknad enligt formeln:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 / n}$$

där ε är skillnaden mellan det mätta och sanna värdet, dvs. felet

7.1.2 Precision

Precisionen beskriver spridningen kring ett skattat värde (mätseriens medelvärde). Om felen (fel = mätt värde - skattat värde) är normalfördelade bör cirka 68 procent av mätningarna ha ett fel som är mindre än precisionen. Precisionen visar hur väl samlad mätserien är kring medelvärdet. Mätningarna kan ha hög precision och en låg noggrannhet, men inte tvärtom. Om mätningarna har ett konstant fel, kan de ha en liten spridning men är alla långt ifrån det rätta eller sanna värdet. Hög precision och låg noggrannhet, eller riktighet, tyder på ett systematiskt fel. Precisionen är beräknad enligt formeln:

$$\sqrt{\sum_{i=1}^n v_i^2 / (n-1)}$$

där v är skillnaden mellan det mätta och skattade värdet, dvs. felet.

7.1.3 Medelavvikelse

Avvikelsen definieras som skillnaden mellan mätt värde och det sanna värdet. Ibland är tecknet på denna differens ointressant, vilket innebär att det istället är absolutbeloppet som redovisas. Men för att undersöka om mätningarna har systematiska fel beräknades en medelavvikelse (i latitud, longitud och höjd), där hänsyn till tecknet tas. Teoretiskt ska medelavvikelsen vara lika med noll om tillräckligt många mätningar har utförts. Om den avviker från noll innebär det att mätningarna är behäftade med ett systematiskt fel.

7.1.4 Största avvikelse

För varje mätning har avvikelsen mellan mätt position och det kända (sanna) värdet i SWEREF 99 beräknats. Mätningarna har sorterats från minsta till största avvikelse efter en procentuell skala (0-100%). Största avvikelsen redovisar avvikelsen i plan och höjd på tre olika nivåer. Den första nivån visar 100 procent, dvs. största avvikelsen för samtliga korrekta mätningar. I geodetiska sammanhang anges även största avvikelsen ofta i 68 procent (1-sigmanivå) och 95 procent (2-sigmanivå) av mätningarna, där således resterande del av de sämsta mätningarna tagits bort.

7.2 Resultat för alla mätningar totalt i projektet

I tabell 7.1 och 7.2. redovisas största avvikelsen i 68 och 95 procent samt kvalitetsvärden i form av precision, noggrannhet och medelavvikelse för samtliga mätningar som erhållits i projektet (i plan och höjd) oavsett fabrikat. Resultaten redovisas dels utifrån olika distanser för att ge en bild av hur kvaliteten varierar med

avståndet och dels utifrån samtliga resultat som erhållits oavsett avstånd. I figur 7.1-7.4 åskådliggörs plan- och höjdvvikelsen (för alla mätningar) i diagramform, sorterade från största till minsta värde för respektive teknik.

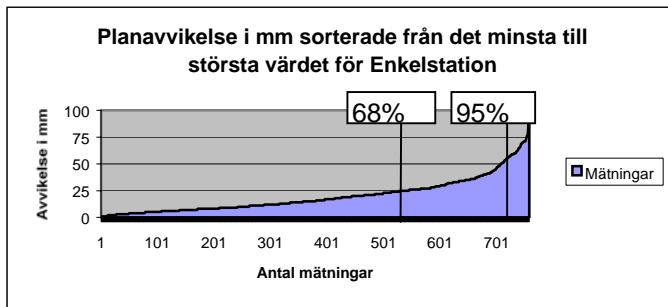
Kvalitets-Termer	Teknik	Punkt 1 0 km	Punkt 2 4 km	Punkt 3 10 km	Punkt 4 17 km	Punkt 5 22 km	Punkt 6 28 km	Punkt 7* 36 km	Alla mätn.
68%	Enkel	9	10	24	23	28	53	30	24
	Nätverk	8	8	15	13	15	19	12	13
95%	Enkel	20	20	36	34	46	71	41	55
	Nätverk	18	17	26	23	29	45	26	29
Precision	Enkel	9	9	20	15	19	42	22	24
	Nätverk	9	10	14	13	13	23	13	15
Noggrannhet	Enkel	10	11	21	21	27	45	31	26
	Nätverk	9	10	14	13	15	24	14	15
Medelavvikelse	Enkel	4	5	7	14	19	15	22	7
	Nätverk	3	2	4	4	8	6	5	4

Tabell 7.1: Kvalitetsvärden (mm) i plan vid olika distanser. I kolumnen "Alla mätn." har resultaten beräknats utifrån samtliga gjorda mätningar med respektive teknik, oavsett avstånd.

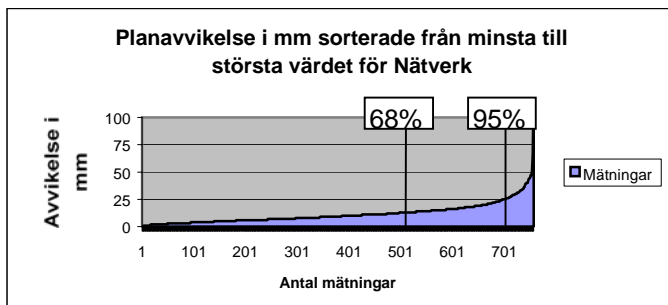
Kvalitets-termer	Teknik	Punkt 1 0 km	Punkt 2 4 km	Punkt 3 10 km	Punkt 4 17 km	Punkt 5 22 km	Punkt 6 28 km	Punkt 7* 36 km	Alla mätn.
68%	Enkel	14	18	24	22	25	37	47	23
	Nätverk	11	16	23	18	27	31	34	22
95%	Enkel	32	32	46	52	52	100	94	58
	Nätverk	25	34	44	44	52	55	44	46
Precision	Enkel	16	14	24	32	27	43	42	30
	Nätverk	12	14	22	24	28	37	28	25
Noggrannhet	Enkel	17	17	26	32	27	45	50	30
	Nätverk	13	17	22	26	28	37	28	25
Medelavvikelse	Enkel	6	10	-9	-4	-3	-14	-28	-4
	Nätverk	3	9	-2	-8	-2	-7	-3	-1

Tabell 7.2: Kvalitetsvärden (mm) i höjd vid olika distanser. I kolumnen "Alla mätn." har resultaten beräknats utifrån samtliga gjorda mätningar med respektive teknik, oavsett avstånd.

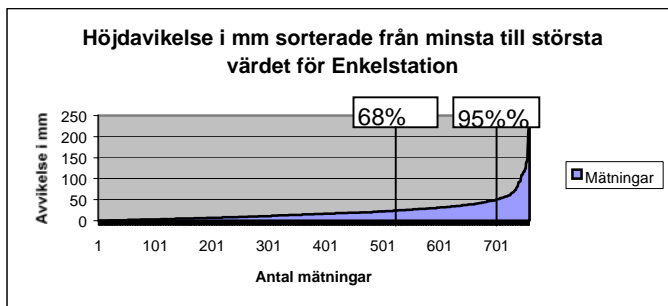
*Vid punkt sju i Skärplinge har mätningar endast utförts med Trimble.



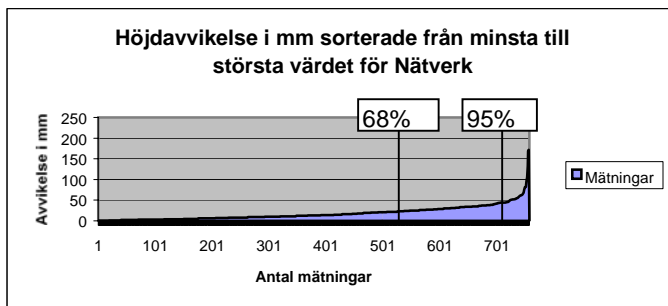
Figur 7.1:



Figur 7.2:



Figur 7.3:



Figur 7.4:

7.3 Resultat med avseende på fabrikat

I tabell 7.3 och 7.4 redovisas största avvikelser i 68 och 95 procent för samtliga mätningar som erhållits med respektive fabrikat (i plan och höjd) i projektet oavsett avstånd. Kvalitetsvärden beräknade från alla positionsfixar i plan och höjd åskådliggörs i tabell 7.5 och 7.6. Om felen är normalfördelade bör cirka 68 procent av mätningarna ha ett fel som är mindre än noggrannheten.

Fabrikat	68%		95%		Största avvikelse	
	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk
Leica	14	13	32	29	48	45
Topcon	27	15	51	38	70	93
Trimble*	25(26)	11(11)	68(68)	20(22)	99	39

Tabell 7.3: Planavvikelse i mm för respektive fabrikat.

Fabrikat	68%		95%		Största avvikelse	
	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk
Leica	22	22	51	50	269	132
Topcon	27	22	64	52	115	172
Trimble*	19(21)	19(21)	50(60)	40(44)	147(224)	169

Tabell 7.4: Höjdavvikelse i mm för respektive fabrikat.

Fabrikat	Noggrannhet		Precision		Medelavvikelse	
	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk
Leica	15	14	15	14	4	2
Topcon	27	19	20	18	17	7
Trimble*	31(31)	11(12)	30(30)	11(11)	6(5)	4(3)

Tabell 7.5: Kvalitetsvärden i plan (mm) för respektive fabrikat.

Fabrikat	Noggrannhet		Precision		Medelavvikelse	
	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk	Enkel	Nätverk
Leica	29	26	27	24	-9	-11
Topcon	31	26	30	26	-4	4
Trimble*	27(31)	22(23)	26(31)	22(23)	7(1)	3(2)

Tabell 7.6: Kvalitetsvärden i höjd (mm) för respektive fabrikat.

* För Trimble har mätningar, till skillnad mot övriga fabrikat, även utförts vid punkt sju.

Dessa mätningar är medtagna i värdena som redovisas inom parentes. Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK

lokaliseras till Söderboda, vilket innebär att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.4 Resultat i plan med avseende på avstånd till närmaste referensstation

För att få en uppfattning hur noggrannheten i plan varierar med baslinjelängden har mätningar utförts på testpunkter lokaliserade på olika avstånd från närmaste referensstation. Nedan i tabell 7.7-7.9 redovisas avvikelser i tre nivåer (68, 95 och 100 procent). Redovisar även antalet orimliga mätvärden som har uppmätts i plan, s.k. outliers.

7.4.1 Leica

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Planavvikelse i mm 68%						
Enkel	8	8	22	13	15	21
Nätverk	8	6	13	13	16	16
Planavvikelse i mm 95%						
Enkel	20	12	37	29	25	42
Nätverk	19	8	19	27	34	43
Största planavvikelse i mm						
Enkel	26	16	38	34	34	48
Nätverk	21	12	21	31	40	45
Antal orimliga i plan						
Enkel	0	0	0	0	0	0
Nätverk	0	0	0	0	0	0

Tabell 7.7: Planavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

7.4.2 Topcon

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Planavvikelse i mm 68%						
Enkel	9	14	24	27	39	45
Nätverk	11	13	18	15	15	33
Planavvikelse i mm 95%						
Enkel	20	23	32	35	54	60
Nätverk	17	24	32	23	28	66
Största planavvikelse i mm						
Enkel	21	33	45	43	70	64
Nätverk	22	47	35	44	29	93
Antal orimliga i plan						
Enkel	0	0	0	0	0	1
Nätverk	0	0	0	0	0	2

Tabell 7.8: Planavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

7.4.3 Trimble

Punkt	1	2	3	4	5	6	7*
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km	36/40 km
Planavvikelse i mm 68%							
Enkel	9	9	24	22	25	66	30
Nätverk	7	7	14	10	14	12	12
Planavvikelse i mm 95%							
Enkel	19	16	36	32	34	79	41
Nätverk	18	14	21	17	22	28	26
Största planavvikelse i mm							
Enkel	30	24	48	33	50	99	76
Nätverk	27	20	26	20	25	39	34
Antal orimliga i plan							
Enkel	0	0	0	0	0	0	0
Nätverk	0	0	0	0	0	0	0

Tabell 7.9: Planavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

* Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda, vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.5 Resultat i höjd med avseende på avstånd till närmaste referensstation

För att få en uppfattning hur noggrannheten i höjd varierar med baslinjelängden redovisas nedan avvikelserna i tre nivåer (68, 95 och 100 procent) för mätningar gjorda på olika avstånd från närmaste referensstation. Redovisar även antalet orimliga mätvärden som har uppmätts i höjd, s.k. outliers.

7.5.1 Leica

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Höjdavvikelse i mm 68%						
Enkel	10	9	25	32	22	29
Nätverk	11	9	25	31	25	32
Höjdavvikelse i mm 95%						
Enkel	26	20	37	55	42	186
Nätverk	20	15	44	76	51	55
Största höjdavvikelse i mm						
Enkel	30	27	56	139	55	269
Nätverk	44	29	46	132	66	105
Antal orimliga i höjd						
Enkel	0	0	0	0	0	0
Nätverk	0	0	0	0	0	0

Tabell 7.10: Höjdavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

7.5.2 Topcon

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Höjdavvikelse i mm 68%						
Enkel	17	25	25	20	26	54
Nätverk	12	27	21	15	27	31
Höjdavvikelse i mm 95%						
Enkel	36	34	47	51	52	100
Nätverk	25	37	35	36	63	62
Största höjdavvikelse i mm						
Enkel	48	43	68	61	93	115
Nätverk	37	61	82	43	81	172
Antal orimliga i höjd						
Enkel	0	0	0	0	0	1
Nätverk	0	0	0	0	0	2

Tabell 7.11: Höjdavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

7.5.3 Trimble

Punkt	1	2	3	4	5	6	7 *
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km	36/40 km
Höjdavvikelse i mm 68%							
Enkel	14	14	21	18	25	35	47
Nätverk	8	17	23	11	26	29	34
Höjdavvikelse i mm 95%							
Enkel	25	30	46	35	54	60	123
Nätverk	32	22	38	26	40	52	44
Största höjdavvikelse i mm							
Enkel	67	43	109	147	60	116	224
Nätverk	39	30	56	38	52	169	53
Antal orimliga i höjd							
Enkel	0	0	0	0	0	0	0
Nätverk	0	0	0	0	0	0	0

Tabell 7.12: Höjdavvikelse och avstånd till närmaste referensstation.

* Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda, vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.6 Kvalitetsvärden i plan

I tabell 7.13-7.15 redovisas kvalitetsvärden som åskådliggör hur noggrannheten och precisionen i plan ändras med (påverkas av) avståndet till närmaste referensstation för enkelstations-RTK respektive nätverks-RTK. I bilaga 1 redovisas även punktklustrets spridning och form, i diagram, vid respektive testpunkt. I samma bilaga redovisas även kvalitetsvärden i latitud och longitud.

7.6.1 Leica

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Enkel						
Noggrannhet (mm)	9	7	21	15	14	21
Precision (mm)	8	7	15	14	12	21
Nätverk						
Noggrannhet (mm)	9	6	12	14	18	19
Precision (mm)	8	6	10	14	15	19

Tabell 7.13: Precision och noggrannhet vid olika av avstånd till närmaste referensstation.

7.6.2 Topcon

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Enkel						
Noggrannhet (mm)	10	13	21	25	37	41
Precision (mm)	8	11	15	17	16	24
Nätverk						
Noggrannhet (mm)	10	14	17	15	16	34
Precision (mm)	9	14	13	14	13	32

Tabell 7.14: Precision och noggrannhet vid olika av avstånd till närmaste referensstation.

7.6.3 Trimble

Punkt	1	2	3	4	5	6	7 *
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km	36/40 km
Enkel							
Noggrannhet (mm)	10	10	22	21	24	63	30
Precision (mm)	10	7	19	12	13	21	22
Nätverk							
Noggrannhet (mm)	8	8	13	10	13	14	14
Precision (mm)	8	7	12	8	11	14	13

Tabell 7.15: Precision och noggrannhet vid olika av avstånd till närmaste referensstation.

* Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda, vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.7 Kvalitetsvärden i höjd

I tabell 7.16-7.18 redovisas kvalitetsvärden som åskådliggör hur noggrannheten, precisionen och medelavvikelsen i höjd påverkas av avståndet till närmaste referensstation för enkelstations-RTK respektive nätverks-RTK. I bilaga 1 redovisas höjdavvikelsen vid mätningarna även i figurform vid respektive testpunkt.

7.7.1 Leica

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Enkel						
Noggrannhet (mm)	12	11	24	40	22	45
Precision (mm)	12	11	13	40	20	40
Medelavvikelse (mm)	-4	0	-20	-2	-9	-23
Nätverk						
Noggrannhet (mm)	13	10	23	39	26	33
Precision (mm)	13	10	18	35	25	29
Medelavvikelse (mm)	-3	-2	-14	-19	-9	-17

Tabell 7.16: Kvalitetsvärden vid olika avstånd till närmaste referensstation.

7.7.2 Topcon

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Enkel						
Noggrannhet (mm)	19	22	26	25	31	50
Precision (mm)	13	14	24	25	30	39
Medelavvikelse (mm)	14	17	-12	-4	-7	-33
Nätverk						
Noggrannhet (mm)	13	24	23	17	33	40
Precision (mm)	10	14	23	17	32	40
Medelavvikelse (mm)	8	20	4	-6	7	-7

Tabell 7.17: Kvalitetsvärden vid olika avstånd till närmaste referensstation.

7.7.3 Trimble

Punkt	1	2	3	4	5	6	7*
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km	36/40 km
Enkel							
Noggrannhet (mm)	19	15	27	30	26	37	50
Precision (mm)	17	11	27	29	25	35	42
Medelavvikelse (mm)	8	11	4	-6	8	14	-28
Nätverk							
Noggrannhet (mm)	13	14	22	13	23	38	28
Precision (mm)	12	10	22	13	23	38	28
Medelavvikelse (mm)	3	10	4	0	-4	4	-3

Tabell 7.18: Kvalitetsvärden vid olika avstånd till närmaste referensstation.

* Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda, vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.8 Initialiseringstid

Tabell 7.19-7.21 visar den tid det tar att få fixlösning (initialiseringstid), vid respektive punkt och avstånd, efter att ha förlorat kontakten med alla satelliter.

I tabellerna redovisas längsta initialiseringstid för 68 och 95 procent, samt för samtliga mätningar som gjorts vid varje punkt. Även antalet misslyckade försök redovisas. Maxtiden var satt till trehundra sekunder varefter initialiseringen ansågs som misslyckad och en oinitialisering utfördes.

7.8.1 Leica

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Initialiseringstid (s) 68%						
Enkel	34	31	31	37	33	37
Nätverk	44	41	42	47	42	52
Initialiseringstid (s) 95%						
Enkel	53	37	72	226	88	172
Nätverk	53	45	52	170	50	55
Längsta initialiseringstid						
Enkel	58	42	163	297	223	278
Nätverk	125	50	93	215	170	162
Antal misslyckade försök						
Enkel	0	0	0	7	10	16
Nätverk	0	0	0	0	0	0

Tabell 7.19: Tiden till initialisering vid respektive punkt och avstånd.

7.8.2 Topcon

Punkt	1	2	3	4	5	6
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km
Initialiseringstid (s) 68%						
Enkel	46	52	55	63	136	134
Nätverk	50	54	55	48	63	59
Initialiseringstid (s) 95%						
Enkel	54	85	99	120	266	260
Nätverk	73	89	160	86	121	239
Längsta initialiseringstid						
Enkel	85	174	287	187	299	292
Nätverk	110	152	266	109	139	300
Antal misslyckade försök						
Enkel	0	0	1	2	7	18
Nätverk	0	0	0	0	0	5

Tabell 7.20: Tiden till initialisering vid respektive punkt och avstånd.

7.8.3 Trimble

Punkt	1	2	3	4	5	6	7*
Avstånd	0 km	4 km	10 km	17 km	22 km	28 km	36/40 km
Initialiseringstid (s) 68%							
Enkel	78	77	128	116	149	184	220
Nätverk	86	91	89	86	88	116	100
Initialiseringstid (s) 95%							
Enkel	123	96	155	158	231	255	256
Nätverk	129	120	121	122	131	192	206
Längsta initialiseringstid							
Enkel	175	169	275	163	237	300	294
Nätverk	180	155	155	151	216	218	247
Antal misslyckade försök							
Enkel	0	0	0	2	6	10	27
Nätverk	1	1	0	0	0	0	0

Tabell 7.21: Tiden till initialisering vid respektive punkt och avstånd.

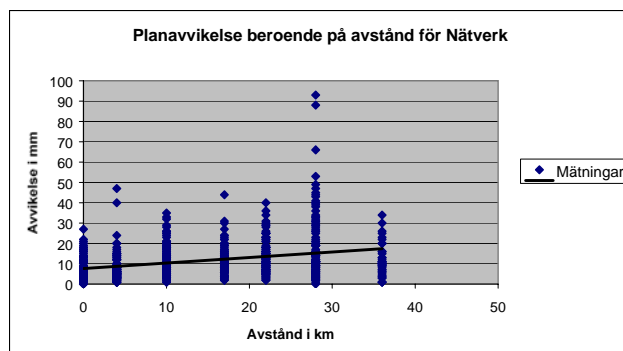
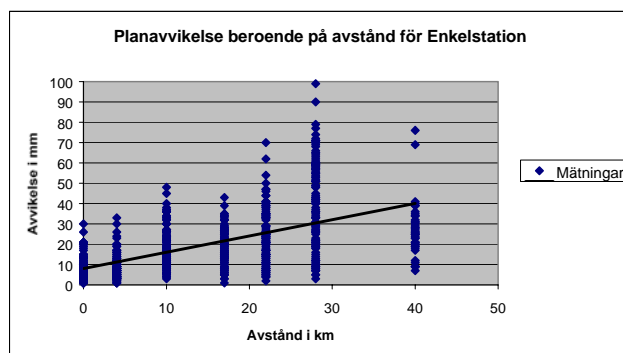
* Vid punkt sju i Skärplinge kom testpunkten att placeras så att närmaste referensstation för nätverks-RTK lokaliserades till Söderboda, vilket innebar att nätverks-RTK hade ett avstånd på 36 kilometer till närmaste referensstation i Söderboda medan enkelstations-RTK hade ett avstånd på 40 kilometer till referensstationen i Gävle.

7.9 Avståndsberoende

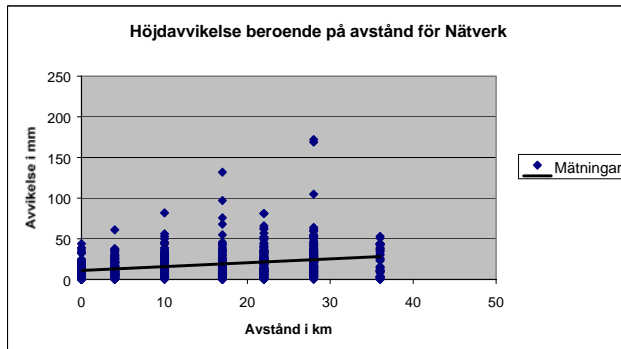
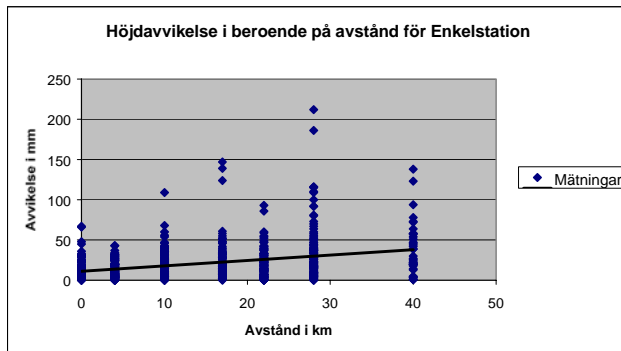
Avståndsberoende parametrar i plan, höjd och för initialiseringstiden har beräknats i form av ppm-värden för respektive teknik. (De avståndsberoende parametrarna har uppskattats med hjälp av en regressionsanalys. Formlerna som har använts vid beräkningarna återfinns i bilaga 2). I tabell 7.22 görs en översiktlig redovisning av avståndsberoendet, dels för samtliga mätningar och dels fabrikatvis. I figur 7.5-7.7 redovisas den radiella planavvikelsen, absoluta höjdavvikelsen samt tiden till initialisering för samtliga gjorda mätningar vid respektive punkt. Den infogade trendlinjen visar den linjära trenden, för avvikelsen respektive initialiseringen, med avseende på avståndet. En redovisning av avståndsberoendet i plan, höjd och för tiden till initialisering i figurform, för varje fabrikat, görs i bilaga 1.

Fabrikat	Teknik	Plan	Höjd	Initialiseringstid
Leica	Enkel	8 mm + 0,36 ppm	9mm + 0,71 ppm	32 s + 0,91 * antal km
	Nätverk	6 mm + 0,32 ppm	10mm + 0,66 ppm	43 s + 0,19 * antal km
Topcon	Enkel	7 mm + 1,15 ppm	14 mm + 0,67 ppm	40 s + 2,67 * antal km
	Nätverk	8 mm + 0,47 ppm	12 mm + 0,49 ppm	51 s + 0,80 * antal km
Trimble	Enkel	10 mm + 0,83 ppm	10 mm + 0,63 ppm	68 s + 3,45 * antal km
	Nätverk	7 mm + 0,16 ppm	9 mm + 0,43 ppm	83 s + 0,67 * antal km
Alla	Enkel	8 mm + 0,80 ppm	11 mm + 0,67 ppm	41 s + 2,98 * antal km
	Nätverk	8 mm + 0,27 ppm	11 mm + 0,48 ppm	56 s + 0,87 * antal km

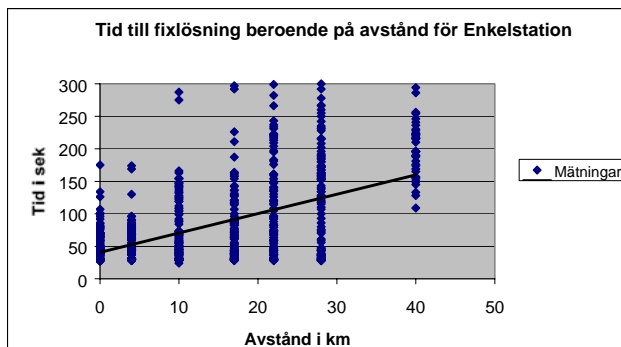
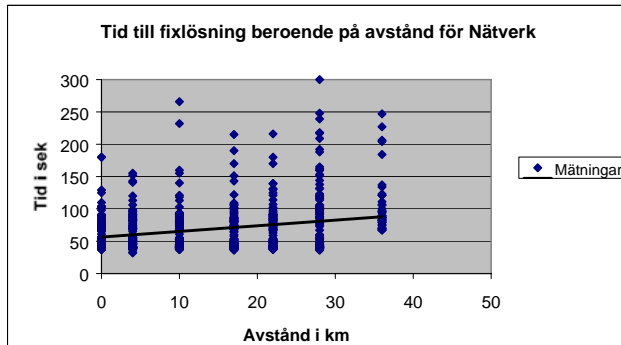
Tabell 7.22: Avståndsberoende parametrar för respektive teknik.



Figur 7.5: Radiella planavvikelsen för samtliga gjorda mätningar (oavsett fabrikat) vid respektive punkt för varje teknik. Den infogade linjen visar den linjära trenden.



Figur 7.6: Absoluta höjdavvikelsen för samtliga gjorda mätningar (oavsett fabrikat) vid respektive punkt för varje teknik. Den infogade linjen visar den linjära trenden.



Figur 7.7: Initialiseringstiden för samtliga gjorda mätningar (oavsett fabrikat) vid respektive punkt för varje teknik. Den infogade linjen visar den linjära trenden.

7.9.1 Validering av avståndsberoendet

Ovan (och i bilaga 1) kan vi se att regressionslinjerna för nätverksmätningarna har en svag lutning, dvs. att det råder ett svagt avståndsberoende för mätningarna. Skiljer sig lutningskoefficienten mer än slumpmässigt från 0? En förutsättning för att frågan skall vara meningsfull, är att det gäller en stickprovsundersökning. Om koefficienten är beräknad i en population är ju alla individer med. Det finns då inget spelrum kvar för slumpen. Men i ett litet stickprov finns risken att man erhåller ett värde som skiljer sig från värdet på lutningskoefficienten i populationen. I ett stort slumpmässigt valt stickprov är sannolikheten större att man erhåller ett värde som återspeglar det sanna förhållandet i populationen.

Sanningen får vi först genom att undersöka populationerna. Detta är inte praktiskt genomförbart. Vi kan emellertid komma längre än att bara gissa genom att använda den statistiska metod som benämns signifikanstest eller hypotesprövning. Grundtanken i hypotesprövning är att när vi fått en liten skillnad mellan stickproven, inte vågar påstå annat än att den mycket väl kan ha uppstått genom slumpen. En stor skillnad däremot tyder på att populationerna verkligen är olika. Bedömningen "liten" eller "stor" sker genom sannolikhetsbestämning.

Huvudfrågan är alltså om det i materialet finns ett siffermässigt samband, som skiljer sig mer än slumpmässigt från 0. Följande hypoteser ställs:

- $H_0: \beta = 0$ Det finns ingen verklig skillnad mellan populationerna. Kvaliteten på mätningarna är avståndsberoende i fråga om avståndet till närmaste fasta referensstation.
- $H_1: \beta \neq 0$ Det är skillnad mellan populationerna. Lutningskoefficienten är skiljd från noll. Ett avståndsberoende kan konstateras.

Signifikansnivån har satts till 5 %. Vår hypotes kan då formuleras på följande sätt:

Ligger det observerade värdet utanför $t = +1,96$ eller $t = -1,96$ förkastar vi H_0 och accepterar H_1 istället. Resultatet från hypotesprövningen redovisas i tabell 7.23. I tabellen återfinns även skattade intervall som med given säkerhet (95%) täcker det okända (sökta) värdet på lutningskoefficienten. (se bilaga 2 för formler och teorier som nyttjats vid utvärderingen av regressionsanalysen).

Fabrikat	Teknik	Signifikansvärden		Intervallskattning i plan	Intervallskattning i höjd
		Plan	Höjd		
Leica	Enkel	5,72	5,26	[2,70*10 ⁻⁷ - 4,61*10 ⁻⁷]	[4,44*10 ⁻⁷ - 9,73*10 ⁻⁷]
	Nätverk	7,49	5,91	[2,14*10 ⁻⁷ - 4,37*10 ⁻⁷]	[4,43*10 ⁻⁷ - 8,83*10 ⁻⁷]
Topcon	Enkel	18,49	5,16	[1,03*10 ⁻⁶ - 1,27*10 ⁻⁶]	[4,15*10 ⁻⁷ - 9,24*10 ⁻⁷]
	Nätverk	5,99	4,17	[3,16*10 ⁻⁷ - 6,23*10 ⁻⁷]	[2,60*10 ⁻⁷ - 7,20*10 ⁻⁷]
Trimble	Enkel	11,24	6,32	[6,82*10 ⁻⁷ - 9,71*10 ⁻⁷]	[4,32*10 ⁻⁷ - 8,19*10 ⁻⁷]
	Nätverk	5,10	5,57	[9,60*10 ⁻⁸ - 2,16*10 ⁻⁷]	[2,78*10 ⁻⁷ - 5,80*10 ⁻⁷]
Alla	Enkel	18,71	9,56	[7,18*10 ⁻⁷ - 8,86*10 ⁻⁷]	[5,32*10 ⁻⁷ - 8,06*10 ⁻⁷]
	Nätverk	8,81	8,46	[2,09*10 ⁻⁷ - 3,28*10 ⁻⁷]	[3,68*10 ⁻⁷ - 5,90*10 ⁻⁷]

Tabell 7.23: Signifikansvärden och konfidensintervall (95 %) för den skattade lutningen.

8 Diskussion och slutsats

Syftet med detta examensarbete var att göra en jämförelse av positionsnoggrannheten och initialiseringstiden mellan nätverks-RTK och enkelstations-RTK på olika avstånd till fysiska referensstationer i nätverkstriangeln Söderboda-Östervåla-Gävle.

Resultatet från testmätningarna visar att användningen av VRS-data resulterar i en signifikant vinst för RTK-systemet, framförallt vid mätningar med långa baslinjer. Vikten av att ta bort jonosfärska fel från data för lösning av periodobekanta är väldokumenterad i teorin [Teunissen, 1997]. Från resultaten i kap. 7.8 och 7.9 kan man se att nätverkskorrigerade data ger noterbara förbättringar för tiden till initialisering vid längre avstånd (>10 km), där jonosfären ofta skiljer sig mellan bas och rover. Överlag så håller nätverks-RTK en ganska jämn nivå för tiden till initialisering trots att baslinjelängden ökar och majoriteten av initialiseringarna sker under en begränsad period. Lite längre och mer spridda tider på de två sista punkterna dock, men även här är tiderna ganska jämna. För enkelstations-RTK kan man se en tydlig tendens på att initialiseringstiderna ökar med avståndet till referensstationen (för Topcon och Trimble, Leica bryter något mot mönstret och uppvisar en jämnare kvalitet). På kortare avstånd, upp till tio kilometer, är i regel initialiseringstiderna kortare för enkelstations-RTK än för nätverks-RTK. Efter tio kilometer ser man en successiv försämring av initialiseringstiderna för enkelstationsmätningarna när avståndet till referensstationen ökar.

Ibland tog initialiseringsprocessen mer än fem minuter, och i de fallen startades initialiseringsprocessen om. Det gjordes på grund av att man vid produktionsmätning förmodligen vid en "misslyckad" initialisering skulle göra en omstart av initialiseringen efter ett par

minuter. Under en riktig mätsituation kan man förvänta sig att operatören inte har tålamod nog att vänta på en möjligen inkorrekt lösning. Det går ofta snabbare att starta om processen om en "dålig" mätning har blivit registrerad, som gör det svårt för mottagaren att lösa de periodobekanta. Vid mätningarna hade vi 106 avbrutna initialiseringsförsök för enkelstations-RTK mot 7 avbrutna för nätverks-RTK. Av detta kan man dra slutsatsen att nätverkskorrigerad data alltså ger större möjlighet till fixlösning. Erfarenheten från testmätningarna har varit att lösningen av periodobekanta för nätverksrover har fungerat bra i alla rådande förhållanden under testperioden. Enkelstationen har fungerat bra på kortare avstånd (upp till 17 km). På längre avstånd har vi emellanåt upplevt stora problem med lösningen av periodobekanta där enkelstations-RTK är beroende av en "gynnsam" jonosfär, dvs. likartade förhållanden vid bas och rover, för att fungera. Även vid olika väderförhållanden vid rover och bas uppstår ofta problem för enkelstations-RTK.

Av resultaten från mätningarna kan man se att positionsnoggrannheten i plan för enkelstations-RTK-positioneringen är begränsad beroende på den allt större inverkan av systematiska fel med en växande baslinjelängd, där dekorrelationen (dvs. ändringen av felen när man rör sig bort från referensstationen) lämnar stora tillskott i de korrigerade signalerna. Liksom vid initialiseringen bryter Leica mot mönstret och uppvisar en jämnare kvalitet än de andra fabrikaten vid enkelstationmätningarna. Svårare att se ett avståndsberoende. Nätverkskorrektionerna tar, vid modellering av troposfär och jonosfär, inte bort de rumsliga felen helt och hållet, när längden till närmaste referensstation ökar. Nätverksmätningarna håller dock en betydligt jämnare kvalitet över de olika avstånden än enkelstations-RTK och uppvisar endast ett svagt avståndsberoende. En trend för samtliga mottagarfabrikat har varit att nätverksmätningarna hållit en något högre kvalitet på de två närmaste punkterna än motsvarande nätverksmätningarna på längre avstånd. Från punkt 3 till punkt 7 håller dock nätverks-RTK en nästan likvärdig kvalitet på mätningarna (med undantag av punkt 6 som har lite sämre kvalitet).

Vid de två första punkterna, 0-4 km, håller nätverks- och enkelstationsmätningarna i stort sett samma kvalitet på mätningarna. Båda RTK-teknikerna är bra centrerade kring det sanna värdet och håller en hög noggrannhet och precision. Vid punkt 3, 10 km, börjar man se en tendens på att nätverks-RTK håller en högre kvalitet på mätningarna än enkelstations-RTK, där enkelstationsmätningarna är lite mer spridda och börjar visa tecken på systematiska fel.

I kapitel 7.6 i resultatdelen kan man se att på de längre avstånden (17-36 km) är noggrannheten betydligt sämre än precisionen för enkelstations-RTK, vilket tyder på systematiska fel. Om man tittar på punktklusterdiagrammet över spridningen av mätningarna i bilaga 1

ser man att oftast är tyngdpunkten (riktigheten) av enkelstationsmätningarna placerade en bit bort från origo (det sanna värdet) och mätserierna har en hög medelavvikelsen, där majoriteten av mätningarna oftast är positiva/negativa i latitud eller longitud, vilket också är ett tecken på systematiskt fel.

I samma kapitel som ovan ser man att precisionen och noggrannheten i regel har likartade värden för nätverks-RTK, vilket tyder på att de systematiska felen har reducerats med hjälp av modelleringen. I spridningsdiagrammen för nätverksmätningarna ser man att tyngdpunkten (riktigheten) av mätningarna oftast ligger i närheten av origo och är bra samlade kring det sanna värdet. Sammantaget så håller Nätverksmätningarna, trots en ökade baslinjelängd, en ganska jämn kvalitet på mätningarna.

Vid testmätningarna har det använts tre olika fabrikat av GPS-mottagare där resultatet och kvaliteten skiljer sig en del beroende på fabrikatet. Det bör påpekas att mätningarna med de olika fabrikaten har gjorts vid olika tillfällen och olika förhållanden vilket gör att jämförelsen, fabrikaten emellan, inte är helt relevant.

Vid mätning med Leica och Trimble utnyttjades en funktion som varnar operatören om det mätta värdet har ett sigmavärde som är högre än det försatta värdet. (Värdet sattes till $3D < 50$ mm för Leica och horisontell precision < 15 mm respektive vertikal precision < 20 mm för Trimble). Mätdata sparades så fort den förinställda positionskvaliteten uppfylldes. Vid mätningarna med Topcon användes inte någon förinställd positionskvalitet. (Vid mätningarna användes handdatorn GeoPadCE, som använder en tidig version av programmet där positionskvaliteten inte gick att ställa). Mätningen gjordes direkt när fixlösning erhöles.

Trimble och Topcon uppvisar båda noterbara skillnader i mätkvaliteten mellan enkelstations-RTK och nätverks-RTK. Som det har nämnts ovan så bryter Leica från mönstret där skillnaden mellan enkelstationsmätningarna och de nätverkskorrigerade mätningarna bara är marginell. Den främsta orsaken till den marginella skillnaden mellan de båda teknikerna är att mätningarna med enkelstations-RTK uppvisar en ganska hög och jämn kvalitet och avståndsberoendet är relativt svagt. Mätningar med Leica gjordes under en kortare tidsperiod än de andra fabrikaten och troligen var de atmosfäriska förhållandena under den här perioden "snäll" med likartade förhållanden vid bas och rover för enkelstationsmätningarna.

Lantmäteriet har även låtit utföra testmätningar med ett fjärde fabrikat, Ashtech. Mätningarna har utförts på samma testpunkter; inom nätverkstriangeln Gävle-Östervåla-Söderboda, under samma premisser som testmätningarna gjorda med fabrikaten Leica, Topcon och Trimble. I bilaga 3 bifogas översiktliga resultat från mätningarna

gjorda med Ashtech. Från resultatet av testmätningarna kan man se att noggrannheten i både plan och höjd med nätverks-RTK-tekniken är bättre, i plan avsevärt mycket bättre än med enkelstations-RTK. Nätverksmätningarna håller i plan en mycket jämn kvalitet för Ashtech med en ungefär likvärdig kvalitet på mätningarna vid varje punkt, trots ett ökat avstånd till referensstationen.

Som det har nämnts ovan, så skiljer sig kvaliteten lite mellan fabrikaten. Resultaten från testmätningarna visar dock att det går att utföra nätverksmätningar med god noggrannhet även med långa avstånd mellan mottagare och referensstation. Det finns dock detaljer som bör utvecklas vidare (förbättras). Det gäller t.ex. den lite sämre modelleringen av troposfären vilket inverkar på höjdmätningarna. Samtliga fabrikat har visat ett betydligt större avståndsberoende i höjd än i plan. Ett annat problem är förekomsten av ojämn mät-prestanda, framförallt i höjd, som troligen inte hade upptäckts om inte punkterna varit koordinatsatta. I plan så hade vi en största avvikelse på 93 millimeter och i höjd 172 millimeter.

”Traditionell RTK kontra nätverks-RTK - En noggrannhetsjämförelse” är ett examensarbete omfattande 20 poäng utfört på Lunds Tekniska Högskola på uppdrag av Lantmäteriet och Helsingborgs stad under perioden juni till augusti, 2003 (se kap 1.1 för frågeställningen i examensarbetet). Slutsatserna som dras i deras studie är att inget signifikant avståndsberoende kan påvisas för nätverks-RTK. De punktskattade regressionslinjernas lutningskoefficienter är liksom vid våra mätningar med Trimble (samtliga mätningar i deras studie utfördes med mottagarfabrikatet Trimble) mycket nära noll, och en intervallskattning som utfördes visar att de kan vara noll (plan: $[-1,97 \cdot 10^{-7}, 5,97 \cdot 10^{-7}]$; höjd: $[-2,96 \cdot 10^{-7}, 8,89 \cdot 10^{-7}]$). Vid jämförelse av de båda teknikerna användes F-testet som analysredskap. F-testerna i studien tyder på att den traditionella tekniken ger resultat med mindre spridning än nätverks-RTK om bas och rover är placerade maximalt 2,5 km (1 km i plan och 2,5 km vid höjddimensionering) från varandra. Vid längre avstånd mellan bas och rover, 2,5-20 km, skiljer sig också de båda teknikernas spridning åt, men endast signifikant i plan (nätverks-RTK: $\sigma^2 = 0,000361$; traditionell RTK: $\sigma^2 = 0,000534$). Initialiseringstiderna visade sig vara något avståndsberoende för nätverks-RTK och mycket avståndsberoende för traditionell RTK.

Slutsatserna som dras i deras studie är att inget signifikant avståndsberoende kan påvisas för nätverks-RTK. Liksom vid deras mätningar, som hos våra, är de punktskattade regressionslinjernas lutningskoefficienter mycket små. Våra resultat visar emellertid på ett svagt avståndsberoende. Resultaten från hypotesprövningen visar att det föreligger en signifikant avvikelse från nollhypotesen, H_0 (se kap 7.9.1), dvs. att ett avståndsberoende råder. Även intervallskattningen tyder på ett avståndsberoende (positiv

lutningskoefficient). En av orsakerna till skillnaden i resultat vid hypotesprövningen är troligen den stora residualspridningen som erhöles vid deras studie. En stor spridning resulterar i brett intervall vid intervallskattningen. Vid en stor spridning krävs det även en relativt kraftig lutning för att mätningarna skall ge utslag och anses signifikanta i ett 95 % konfidensintervall.

En annan slutsats som dras i deras studie är att den traditionella tekniken ger ett resultat med mindre spridning än nätverks-RTK vid korta avstånd (< 2,5 km). Även här skiljer sig deras resultat från våra. Vid de två första punkterna, 0 och 4 km, håller våra nätverks- och enkelstationsmätningar i stort sett samma kvalitet på mätningarna. Ett F-test som har utförts med 95 % konfidensintervall visar på ingen skillnad mellan teknikerna vid kortare avstånd. Mätningarna med den traditionella RTK-tekniken har utförts under olika premisser vid kortare avstånd vid de två examensarbeterna. Vid studien utförd på Lunds Tekniska Högskola upprättades en egen lokal referensstation med ett avstånd på maximalt 2,5 km mellan bas och rover, där radio användes som länk. Samtliga av våra enkelstationsmätningar utfördes med en fast referensstation, med GSM som länk, där "vanliga" RTK-data producerades av nätverks-RTK-programvaran GPSNet med en position för Lantmäteriet. (Tanken var att alla fabrikat skulle ges samma förutsättningar vid enkelstations-RTK, och ej göras beroende av ett speciellt fabrikat vid basstationen).

9 Referenser

Litteratur

Alm M, Munsin A, 2003, Traditionell RTK kontra nätverks-RTK - en noggrannhetsjämförelse, Lantmäteriet, Gävle, LMV-rapport 2003:11.

Bauersima I, 1983, NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) II. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald, No 10, Astronomical Institute, University of Bern.

Egeltoft T, 1996, Geodetisk mätningsteknik, Kungliga Tekniska Högskolan, institutionen för geodesi och fotogrammetri, Stockholm.

Engfeldt A, Jivall L, 2000, Kort introduktion till GNSS, Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2000:2.

Engfeldt A, Jivall L, 2003, Så fungerar GNSS, Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2003:10.

Hofmann-Wellenhof B, Lichtenegger H, Collins J, 2001, GPS-Theory and Practice, Springer.

Moore D S, McCabe G P, 1993, Introduction to the Practice of Statistics, W.H Freeman and company, New York.

Persson J, Brynte S, 2002, Kompatibilitet för nätverks-RTK-programvaran Trimble GPS-Net med olika typer av rörliga mottagare, Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2002:7.

Rönnerberg A, 2001, Undersökning av tjänster för differentiell GPS, Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2001:10.

Statens Lantmäteriverk, 1996, HMK-Geodesi: GPS, Handbok till mätningkungörelsen, andra utgåvan, Gävle.

Teunissen P. J. G., Kleusberg A, 1998, GPS for geodesy, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

Teunissen P.J.G., 1997, The geometry-free GPS ambiguity search space with a weighted ionosphere, Journal of Geodesy, vol.71.

Trimble(1), GPSNet User Guide (handbok till nätverks-RTK-programvaran, SWEPOS, Gävle, 2003).

Wahlund S, 2002, Production measurements with Network RTK - Test and analysis, Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2002:2.

Wiklund P, 2002, Slutrapport för projekt "Position Stockholm-Mälaren-1", Lantmäteriet, Gävle, LMV-Rapport 2002:1.

Internetkällor

GPSnet, acc. 2003-06-12, The idea behind GPSnet.dk is simple - VRS is ingenious, Trimble Center Denmark, 4 sidor.
(<http://www.GPSnet.dk>)

Lantmäteriet, acc 2003-12-06, GPS, 2 sidor.
(<http://www.lm.se/geodesi/gps/gps.htm>)

SWEPOS(1). (<http://swepos.lmv.lm.se>)

SWEPOS(2), acc 2003-06-12, NÄTVERKS-RTK, SWEPOS.
(<http://swepos.lmv.lm.se/files/rtk.pdf>)

Talbot N, Lu G, Allison T, acc. 2003-06-01, Broadcast Network RTK-Transmission Standards and Results, Trimble Navigation, Sunnyvale, California, USA, 9 sidor.
(http://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-110017/Broadcast_Network_RTK.pdf)

Trimble(2), acc 2003-05-15, Network RTK Positioning Using Virtual Reference Stations (VRS?), 4 sidor. (<http://www.jpc.tosho-u.ac.jp>)

Van Sickle J, GPS for Landsurveyors, Ann Arbor Press, 1996, acc
2003-12-16, 1 sida,
(<http://www.ualberta.ca/~norris/gps/CAdemo.html>)

Vollath U, Landau H, Chen X, acc. 2003-05-29, Network RTK-
Concept and Performance, Trimble Terrasat GmbH, Haringsstrasse
19, Hoehenkirchen 85635, Germany, 6 sidor.
(<http://surveypartners.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-93154/Network%20RTK%20Paper%20Wuhan%20Nov2002.doc>)

Vollath U, Landau H, Chen X, acc. 2003-06-01, Virtual Reference
Station Systems, Trimble Terrasat GmbH, Haringsstrasse 19,
Hoehenkirchen 85635, Germany, 7 sidor.
(<http://surveypartners.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-93155/Virtual%20Reference%20Station%20Systems.doc>)

Vollath U., Landau H, Chen X, acc. 2003-06-29, Virtual Reference
Stations versus Broadcast Solutions in Network RTK- Advantages
and Limitations, Trimble Terrasat GmbH, Haringsstrasse 19,
Hoehenkirchen 85635, Germany, 15 sidor.
(<http://surveypartners.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/file-104234/VRS%20vs%20FKP%20-%20GNSS2003.pdf>)

Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriverket

- 1999:12 Jonsson Bo (ed.): Proceedings of the 13th general meeting of the Nordic Geodetic Commission.
- 2000:2 Engfeldt Andreas & Jivall Lotti: Kort introduktion till GNSS.
- 2000:3 Kempe Christina: Metodstudie för inmätning av skogsbilvägar.
- 2000:4 Svanholm Niklas: Jämförelse av olika metoder att föra över kartdetaljer till ett nytt koordinatsystem.
- 2000:5 RefStrat-projektet: RefStrat – strategier för referenssystem och referensnät.
- 2001:1 Engberg Lars (ed.): Geodesi 2000 – svensk geodesiverksamhet under kommande tioårsperiod.
- 2001:6 Jivall Lotti: SWEREF 99 – new ETRS 89 coordinates in Sweden.
- 2001:7 Jivall Lotti, Lidberg Martin, Lilje Mikael, Reit Bo-Gunnar: Transformationssamband mellan SWEREF 99 och RT 90/RH 70.
- 2001:10 Rönnberg Andreas: Undersökning av tjänster för differentiell GPS.
- 2002:1 Wiklund Peter: Slutrapport för projekt "Position Stockholm-Mälaren – 1".
- 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.

L A N T M Ä T E R I E T

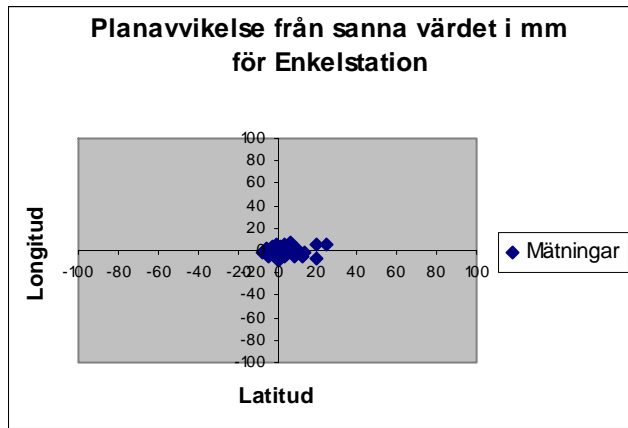


Vaktmästeriet 801 82 GÄVLE Tfn 026 - 65 29 15 Fax 026 - 68 75 94
Internet: www.lantmateriet.se

Bilaga I

Spridningsdiagram och kvalitetsvärden i plan för varje fabrikat vid respektive punkt.....	57
Spridningsdiagram och kvalitetsvärden i höjd för varje fabrikat vid respektive punkt.....	70
Spridningsdiagram och kvalitetsvärden för varje punkt i plan (alla fabrikat).....	83
Spridningsdiagram och kvalitetsvärden för varje punkt i höjd (alla fabrikat).....	87
Ytdiagram för varje punkt och fabrikat i plan.....	91
Ytdiagram för varje punkt och fabrikat i höjd.....	98
Ytdiagram för varje punkt med alla mätningar i plan.....	105
Ytdiagram för varje punkt med alla mätningar i höjd.....	107
Ytdiagram för varje fabrikat i plan.....	109
Ytdiagram för varje fabrikat i höjd.....	110
Spridningsdiagram och kvalitetsvärden för alla mätningar i plan.....	111
Spridningsdiagram och kvalitetsvärden för alla mätningar i höjd.....	112
Diagram som relaterar till avståndsberoendet.....	113

Punkt 1

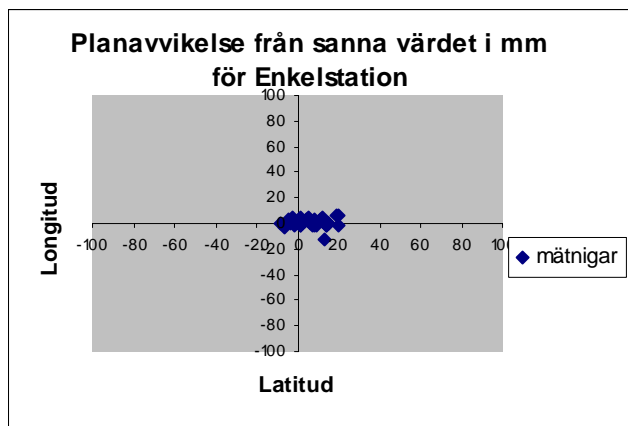


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	7	4
Noggrannhet	8	4
Medelavvikelse	4	0

Radiellt

Precision	8
Noggrannhet	9
Medelavvikelse	4

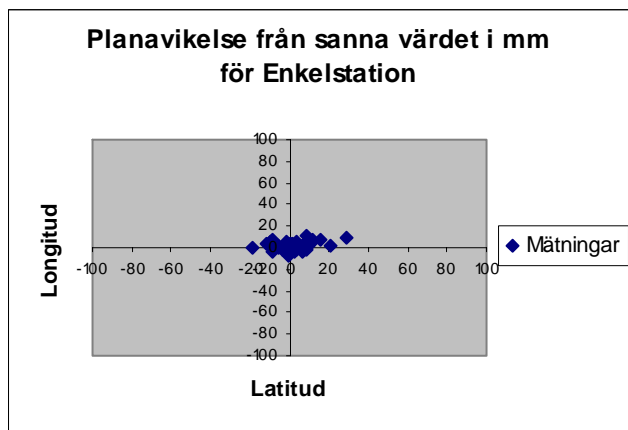


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	7	3
Noggrannhet	9	3
Medelavvikelse	6	1

Radiellt

Precision	8
Noggrannhet	10
Medelavvikelse	6



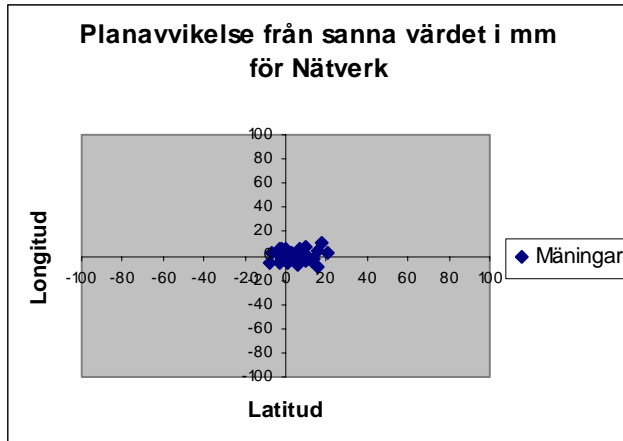
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	9	4
Noggrannhet	9	4
Medelavvikelse	3	2

Radiellt

Precision	10
Noggrannhet	10
Medelavvikelse	4

Punkt 1

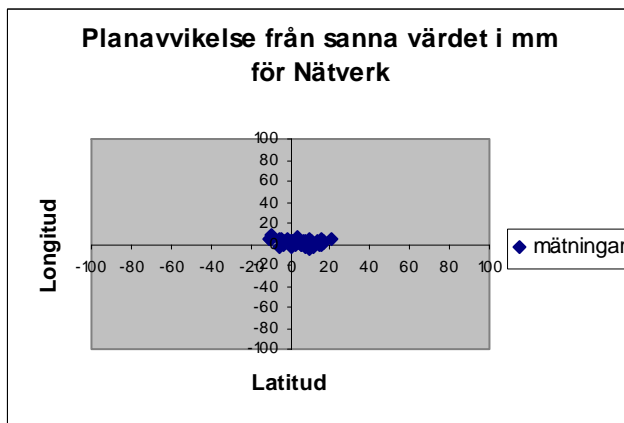


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	7	4
Noggrannhet	8	4
Medelavvikelse	4	0

Radiellt

Precision	8
Noggrannhet	9
Medelavvikelse	4

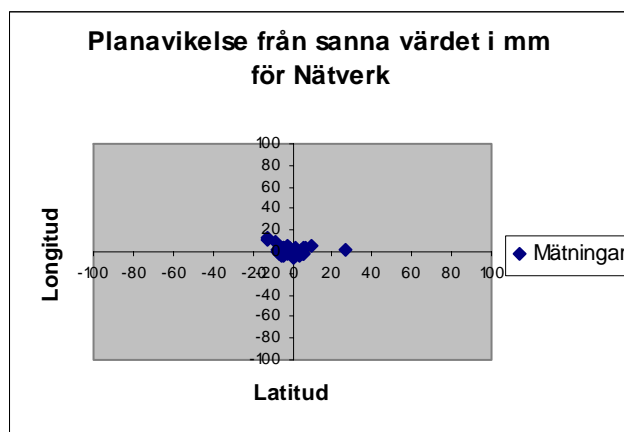


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	9	3
Noggrannhet	9	3
Medelavvikelse	4	2

Radiellt

Precision	9
Noggrannhet	10
Medelavvikelse	5



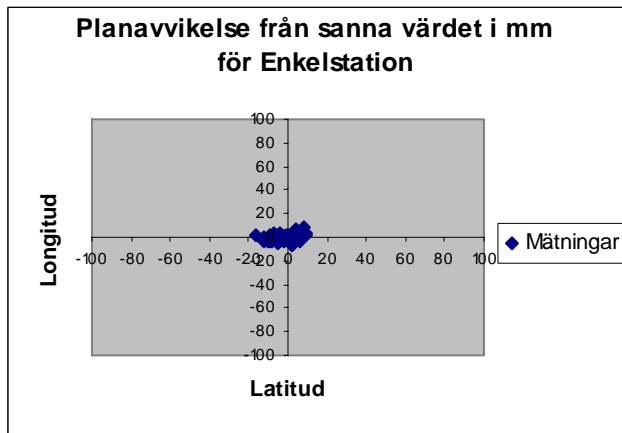
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	7	4
Noggrannhet	7	4
Medelavvikelse	-1	1

Radiellt

Precision	8
Noggrannhet	8
Medelavvikelse	2

Punkt 2

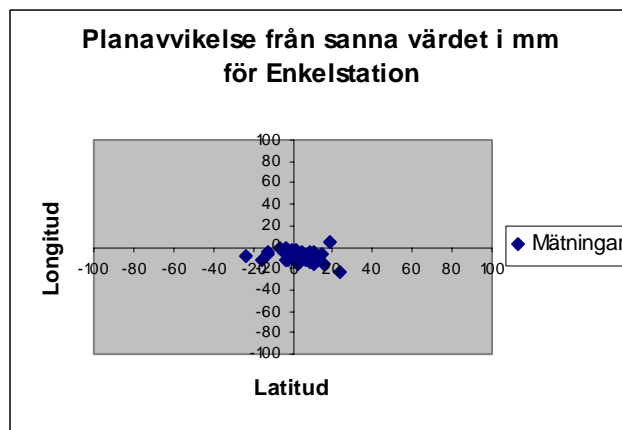


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	6	4
Noggrannhet	6	4
Medelavvikelse	-2	0

Radiellt

Precision	7
Noggrannhet	7
Medelavvikelse	2

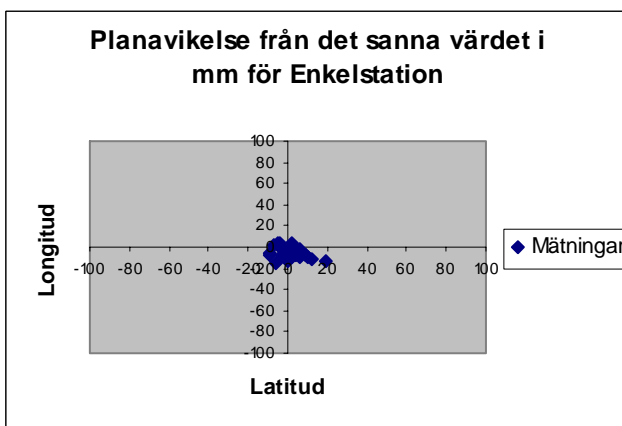


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	7	5
Noggrannhet	9	9
Medelavvikelse	6	-8

Radiellt

Precision	11
Noggrannhet	13
Medelavvikelse	8



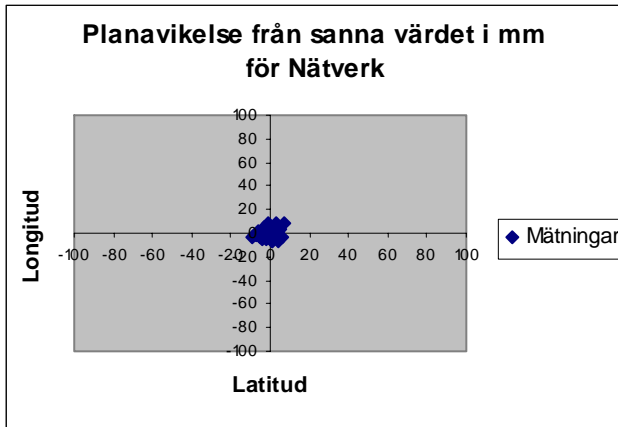
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	6	4
Noggrannhet	6	8
Medelavvikelse	2	-6

Radiellt

Precision	7
Noggrannhet	10
Medelavvikelse	6

Punkt 2

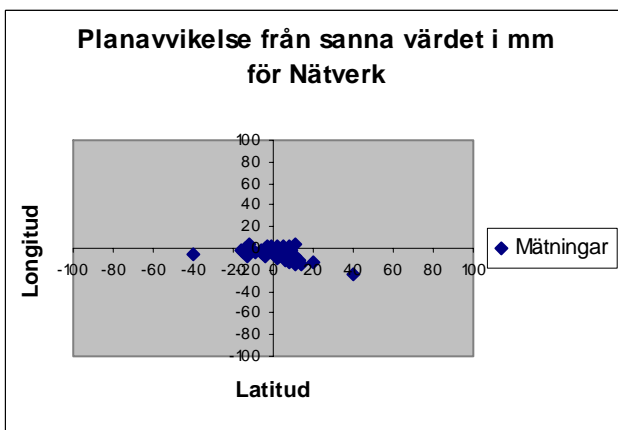


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	4	4
Noggrannhet	4	4
Medelavvik.	-1	0

Radiellt

Precision	6
Noggrannhet	6
Medelavvik.	1

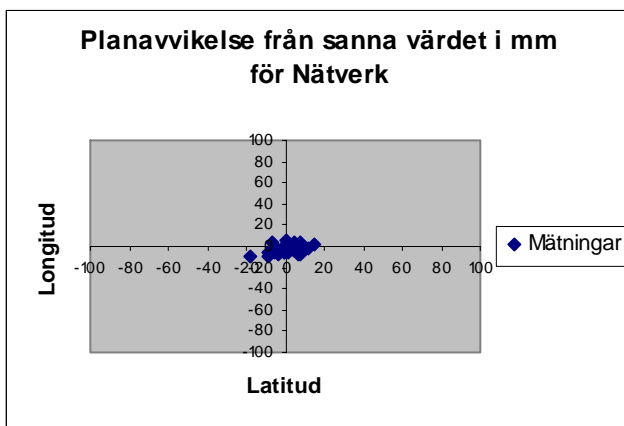


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	12	6
Noggrannhet	12	7
Medelavvik.	1	-5

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	14
Medelavvik.	5



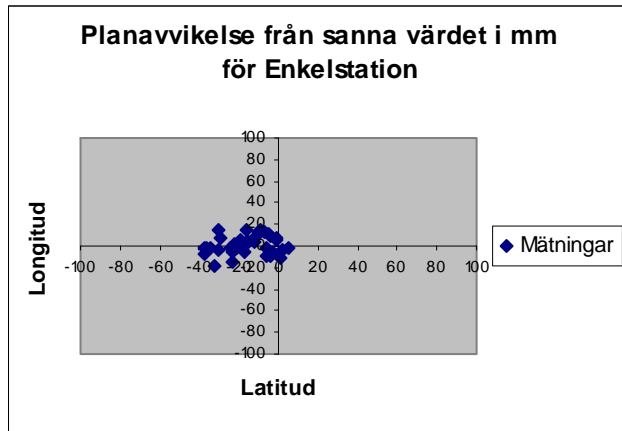
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	6	4
Noggrannhet	6	4
Medelavvik.	1	-2

Radiellt

Precision	7
Noggrannhet	8
Medelavvik.	3

Punkt 3

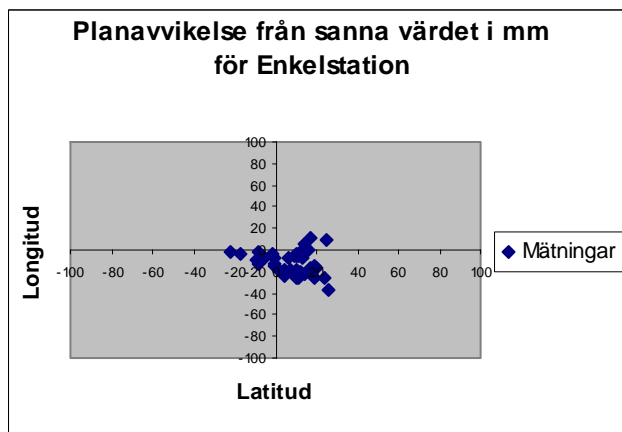


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	12	8
Noggrannhet	19	8
Medelavvik.	-15	1

Radiellt

Precision	15
Noggrannhet	21
Medelavvik.	15

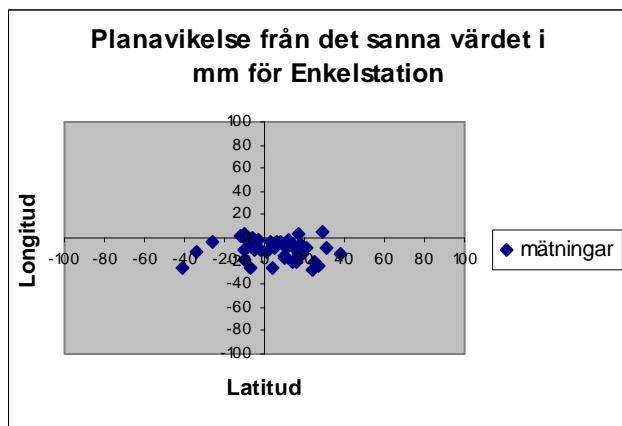


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	11	11
Noggrannhet	13	16
Medelavvik.	8	-12

Radiellt

Precision	15
Noggrannhet	21
Medelavvik.	14



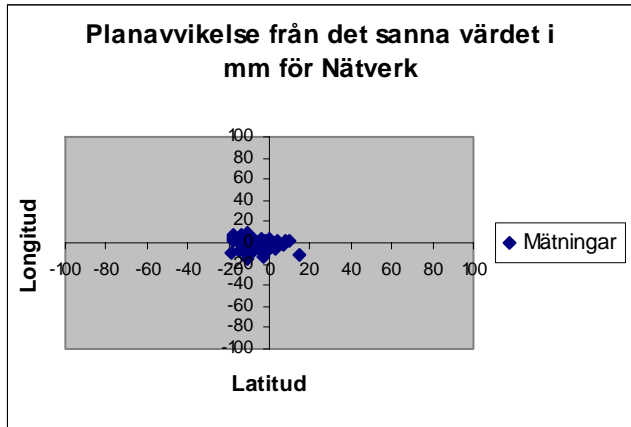
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	17	9
Noggrannhet	18	14
Medelavvik.	5	-10

Radiellt

Precision	19
Noggrannhet	22
Medelavvik.	11

Punkt 3

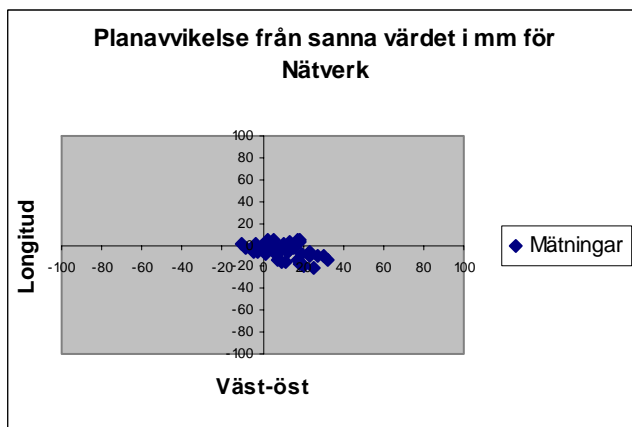


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	8	6
Noggrannhet	10	6
Medelavvik.	-6	-2

Radiellt

Precision	10
Noggrannhet	12
Medelavvik.	6

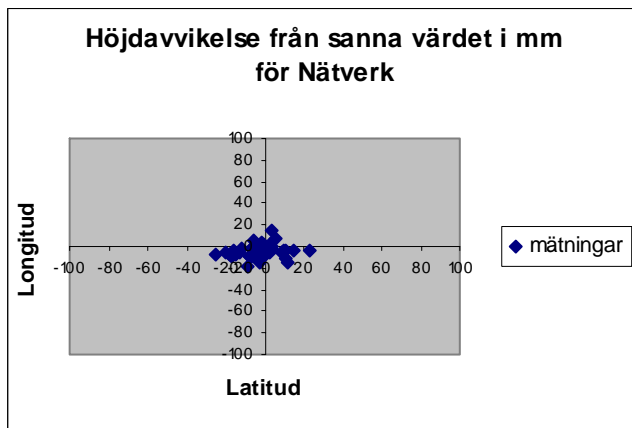


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	10	7
Noggrannhet	15	10
Medelavvik.	11	-6

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	17
Medelavvik.	12



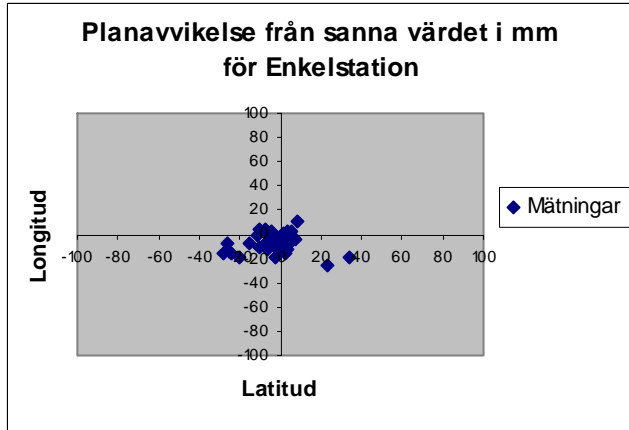
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	10	6
Noggrannhet	10	7
Medelavvik.	-3	-4

Radiellt

Precision	12
Noggrannhet	13
Medelavvik.	5

Punkt 4

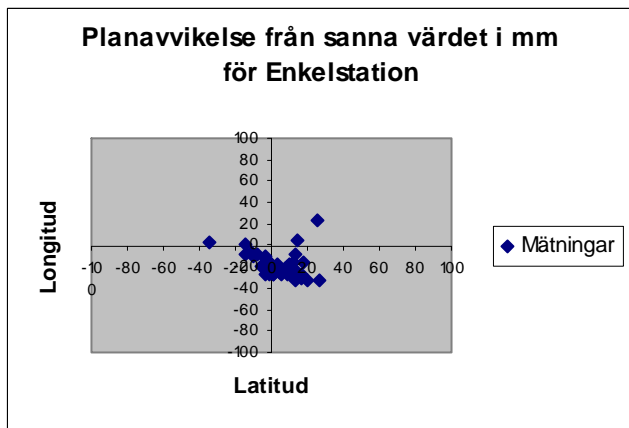


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	11	8
Noggrannhet	12	10
Medelavvik.	-3	-7

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	15
Medelavvik.	7

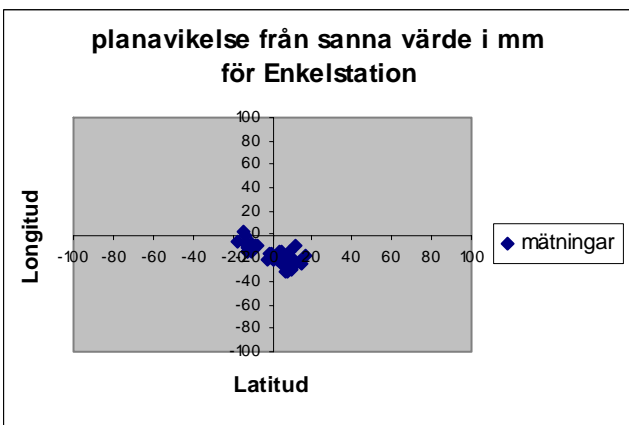


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	12	12
Noggrannhet	13	22
Medelavvik.	4	-18

Radiellt

Precision	17
Noggrannhet	25
Medelavvik.	19



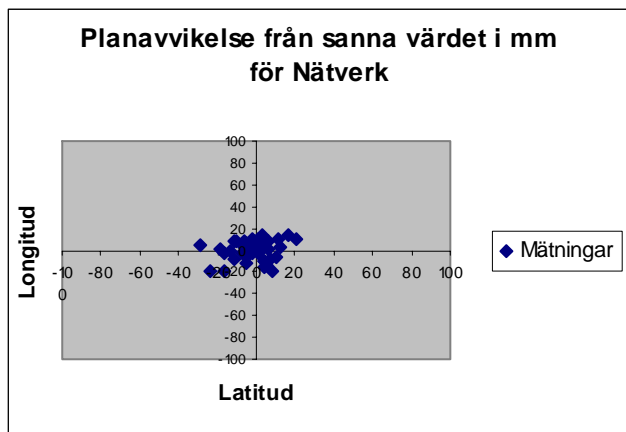
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	10	8
Noggrannhet	10	19
Medelavvik.	1	-17

Radiellt

Precision	12
Noggrannhet	21
Medelavvik.	17

Punkt 4

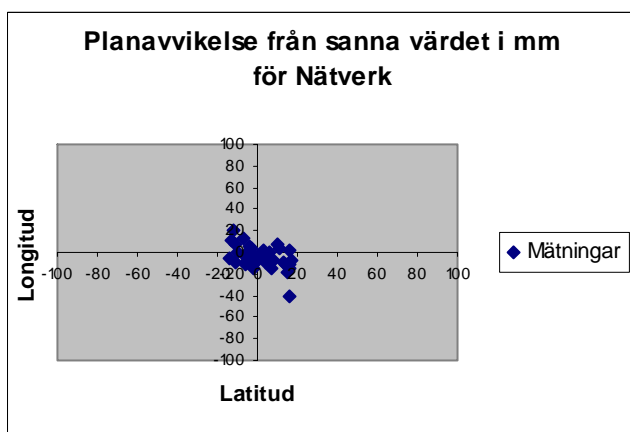


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	11	9
Noggrannhet	11	9
Medelavvik.	-2	0

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	14
Medelavvik.	2

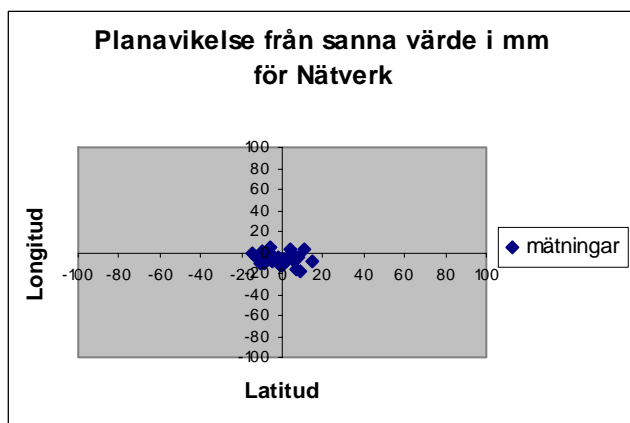


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	9	10
Noggrannhet	9	11
Medelavvik.	2	-5

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	15
Medelavvik.	5



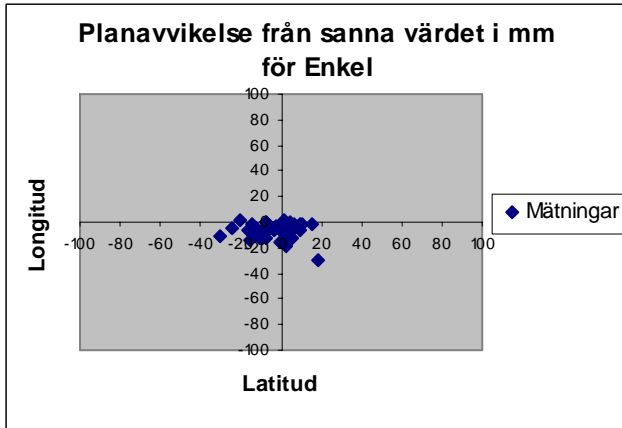
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	7	5
Noggrannhet	7	8
Medelavvik.	-2	-6

Radiellt

Precision	8
Noggrannhet	10
Medelavvik.	6

Punkt 5

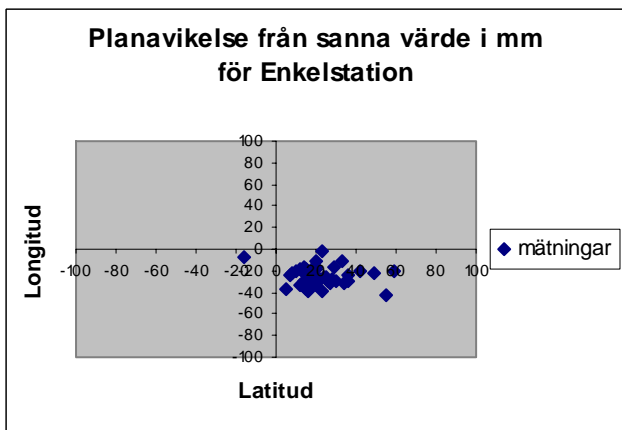


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	10	6
Noggrannhet	11	10
Medelavvik.	-4	-8

Radiellt

Precision	12
Noggrannhet	14
Medelavvik.	9

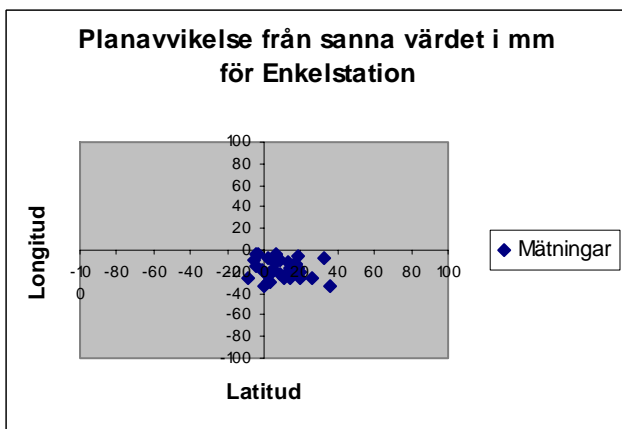


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	14	9
Noggrannhet	26	27
Medelavvik.	23	-25

Radiellt

Precision	16
Noggrannhet	37
Medelavvik.	34



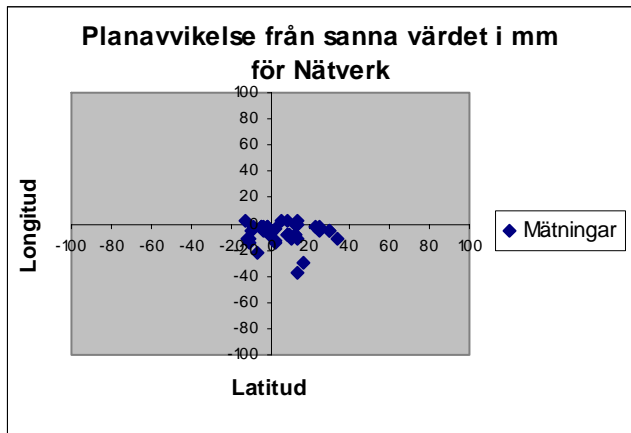
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	10	8
Noggrannhet	14	19
Medelavvik.	10	-17

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	24
Medelavvik.	20

Punkt 5

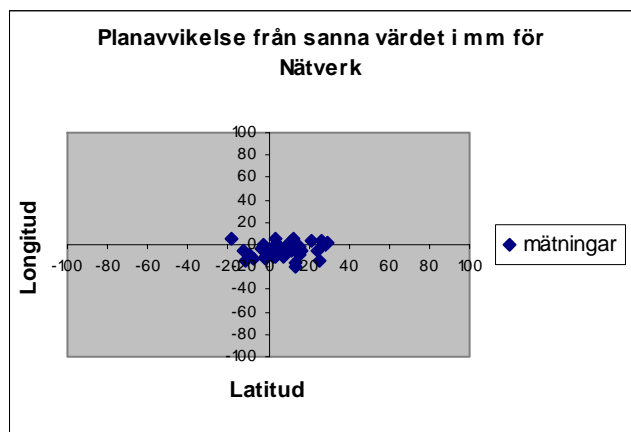


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	13	8
Noggrannhet	14	11
Medelavvik.	6	-8

Radiellt

Precision	15
Noggrannhet	18
Medelavvik.	10

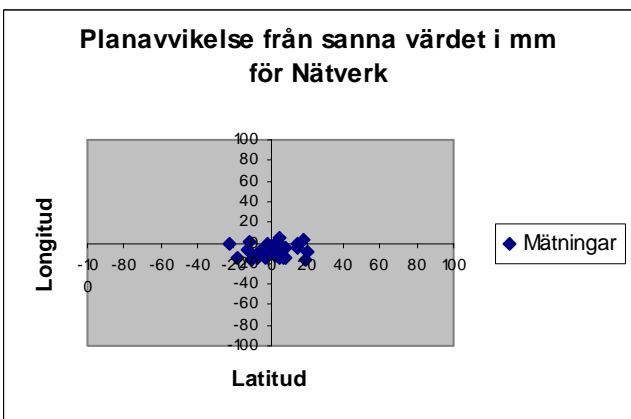


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	11	6
Noggrannhet	13	8
Medelavvik.	7	-5

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	16
Medelavvik.	9



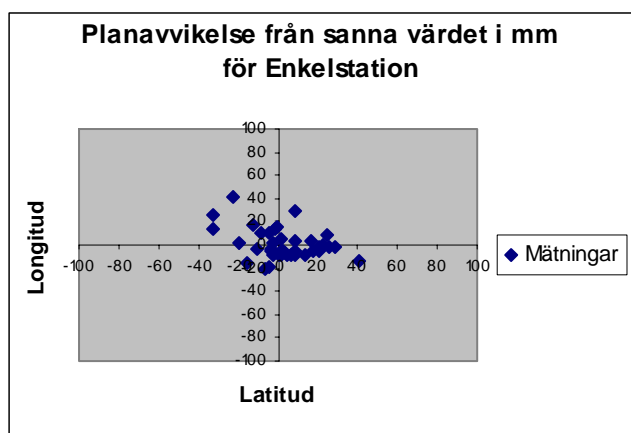
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	9	5
Noggrannhet	9	9
Medelavvik.	1	-8

Radiellt

Precision	11
Noggrannhet	13
Medelavvik.	8

Punkt 6

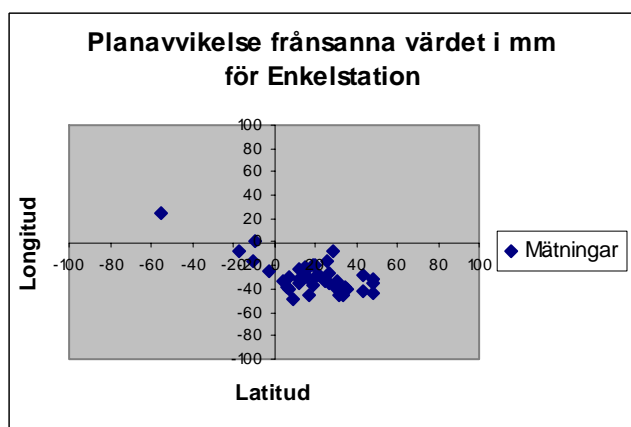


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	16	13
Noggrannhet	16	13
Medelavvik.	3	1

Radiellt

Precision	21
Noggrannhet	21
Medelavvik.	3

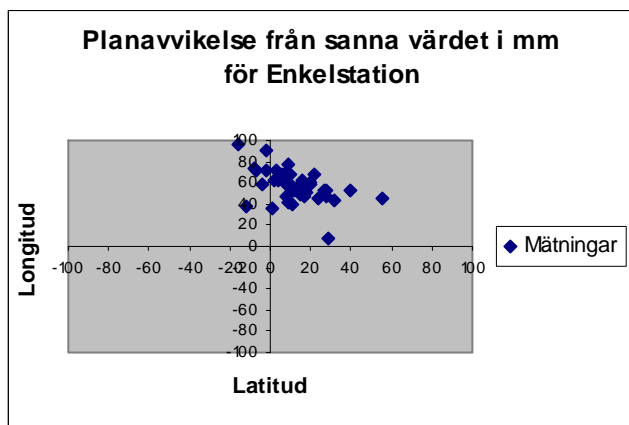


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	20	14
Noggrannhet	25	32
Medelavvik.	18	-30

Radiellt

Precision	24
Noggrannhet	41
Medelavvik.	34



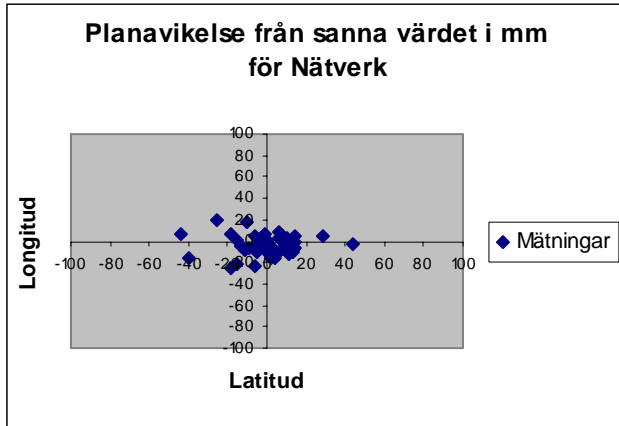
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	14	16
Noggrannhet	19	59
Medelavvik.	12	57

Radiellt

Precision	21
Noggrannhet	63
M.avvikelse	58

Punkt 6

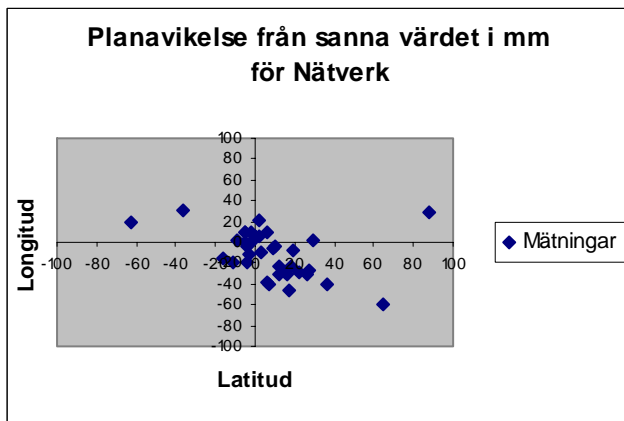


Leica

(mm)	Lat	Long
Precision	16	10
Noggrannhet	16	11
Medelavvik.	-1	-4

Radiellt

Precision	19
Noggrannhet	19
Medelavvik.	4

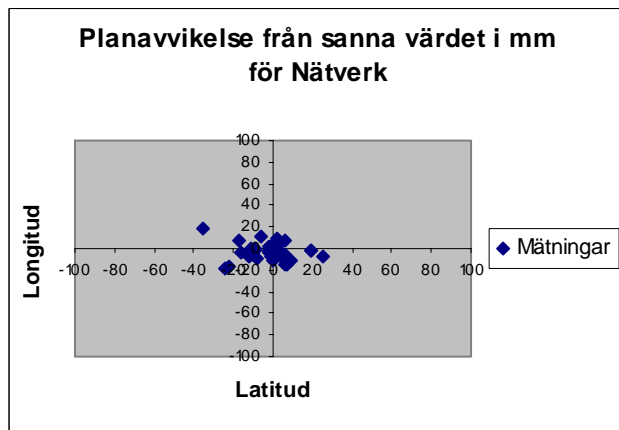


Topcon

(mm)	Lat	Long
Precision	24	22
Noggrannhet	18	24
Medelavvik.	7	-12

Radiellt

Precision	32
Noggrannhet	34
Medelavvik.	13



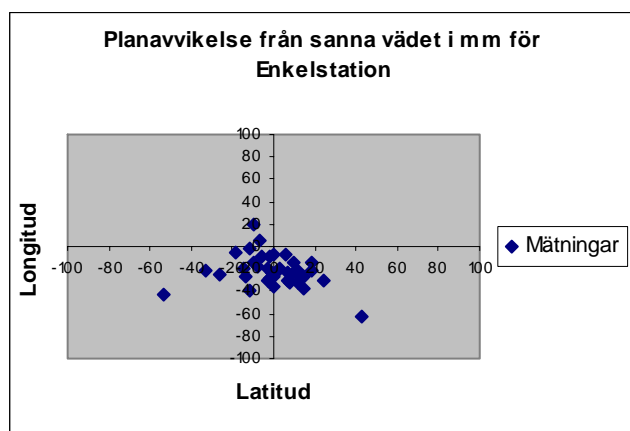
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	12	8
Noggrannhet	12	8
Medelavvik.	-2	-3

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	14
Medelavvik.	4

Punkt 7

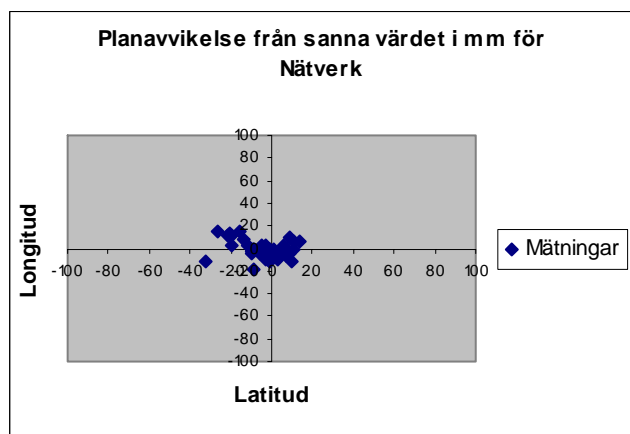


Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	16	14
Noggrannhet	16	26
M.avvikelse	0	-22

Radiellt

Precision	22
Noggrannhet	30
Medelavvik.	22



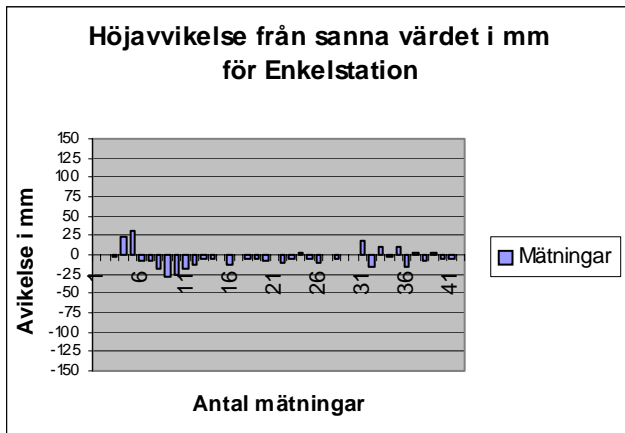
Trimble

(mm)	Lat	Long
Precision	11	8
Noggrannhet	12	8
Medelavvik.	-5	0

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	14
Medelavvik.	5

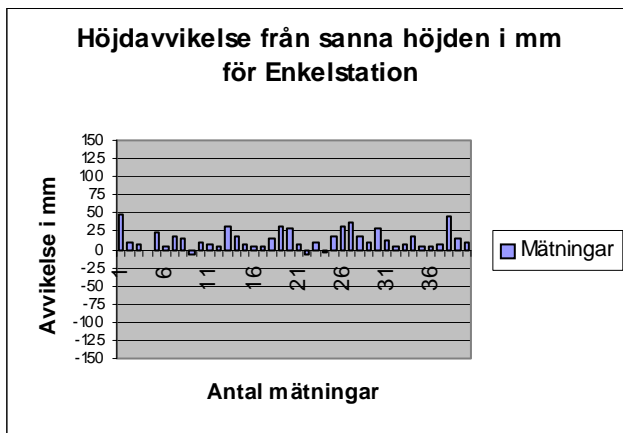
Punkt 1



Leica

Höjd

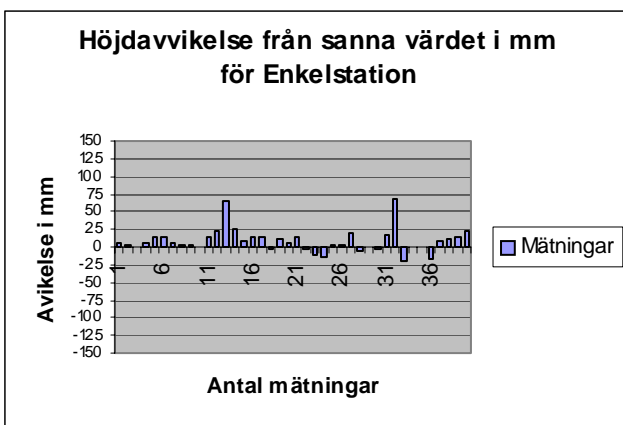
Precision	12
Noggrannhet	12
Medelavvik.	-4



Topcon

Höjd

Precision	13
Noggrannhet	19
Medelavvik.	14

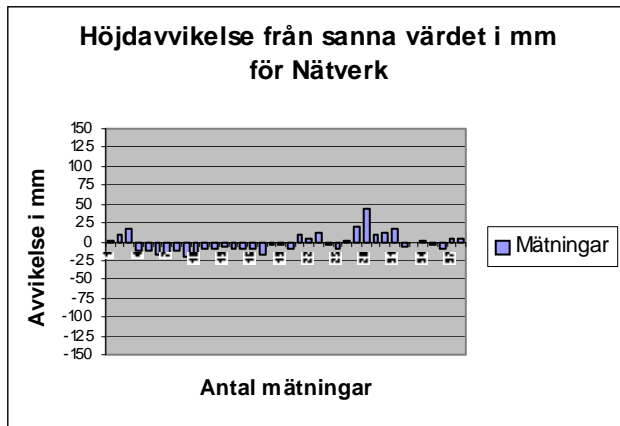


Trimble

Höjd

Precision	17
Noggrannhet	19
Medelavvik.	9

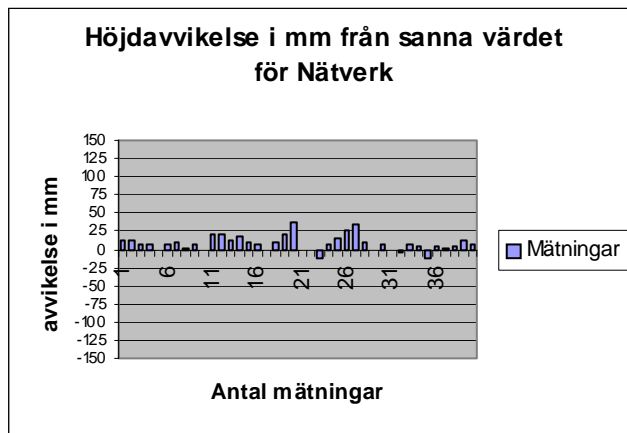
Punkt 1



Leica

Höjd

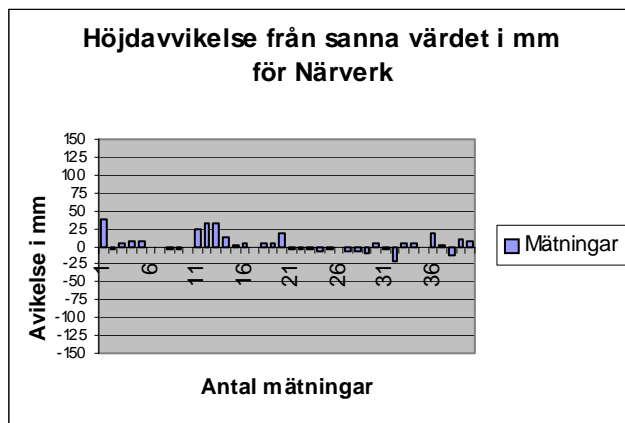
Precision	13
Noggrannhet	13
Medelavvik.	-3



Topcon

Höjd

Precision	10
Noggrannhet	13
Medelavvik.	8

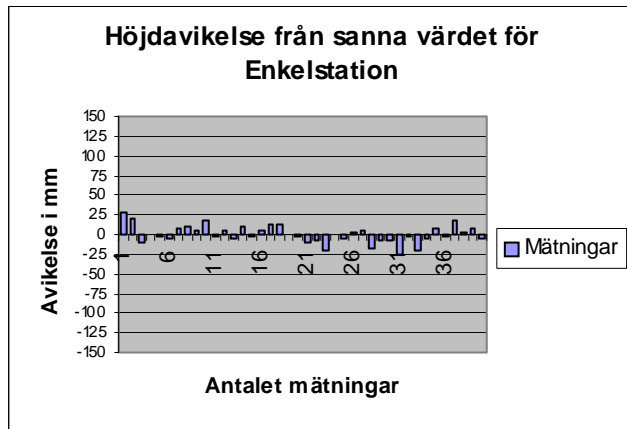


Trimble

Höjd

Precision	12
Noggrannhet	13
Medelavvik.	3

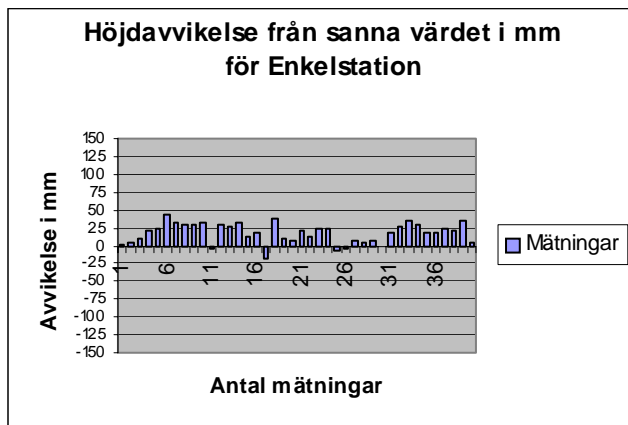
Punkt 2



Leica

Höjd

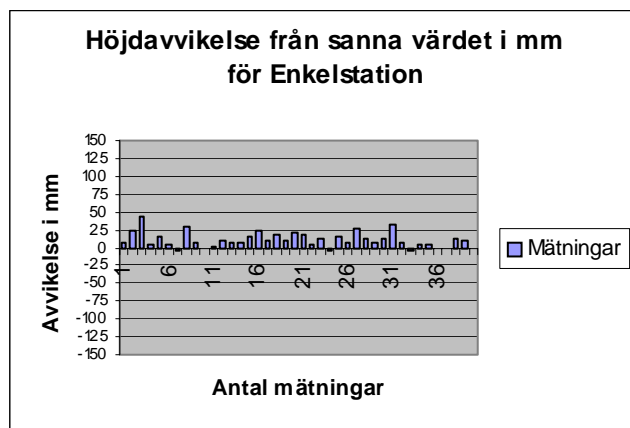
Precision	11
Noggrannhet	11
Medelavvik.	0



Topcon

Höjd

Precision	14
Noggrannhet	22
Medelavvik.	17

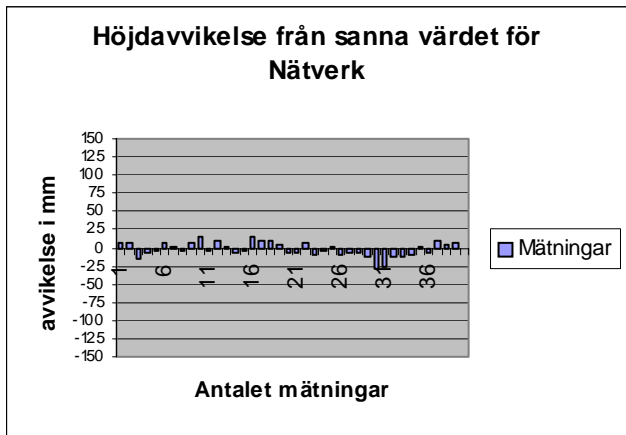


Trimble

Höjd

Precision	11
Noggrannhet	15
Medelavvik.	11

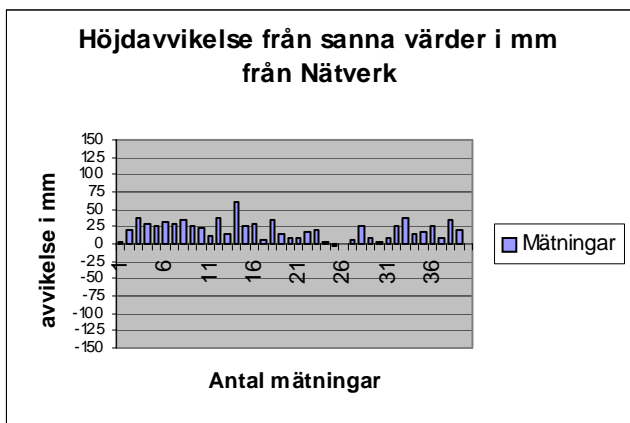
Punkt 2



Leica

Höjd

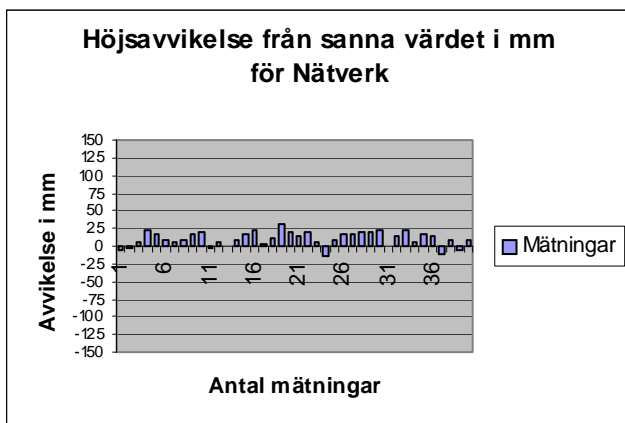
Precision	10
Noggrannhet	10
Medelavvik.	-2



Topcon

Höjd

Precision	14
Noggrannhet	24
Medelavvik.	20

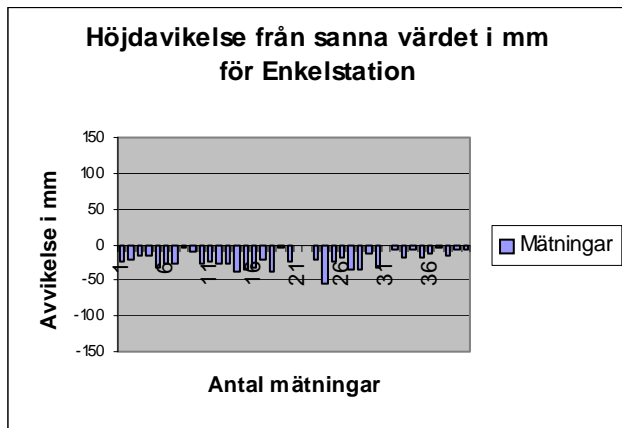


Trimble

Höjd

Precision	10
Noggrannhet	14
Medelavvik.	10

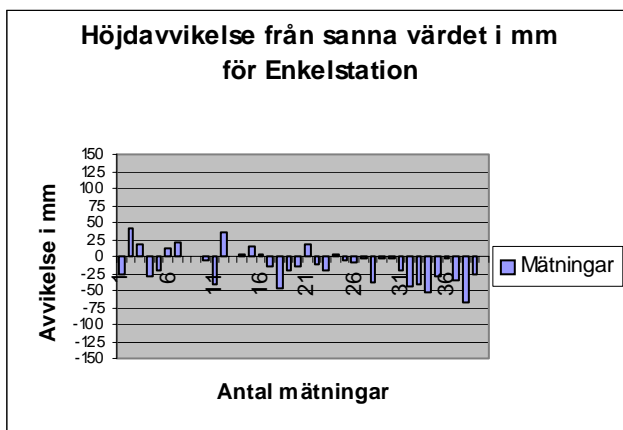
Punkt 3



Leica

Höjd

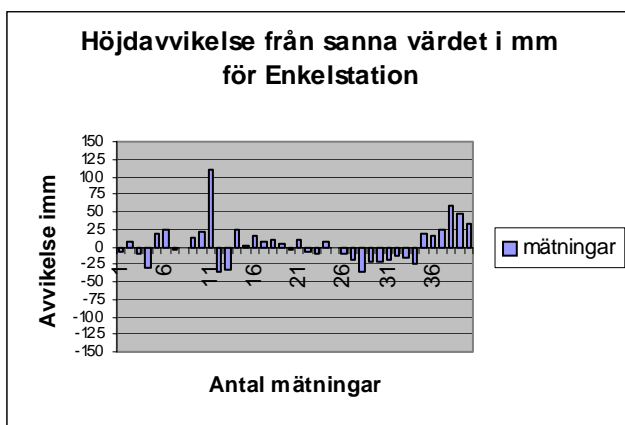
Precision	13
Noggrannhet	24
Medelavvik.	-20



Topcon

Höjd

Precision	24
Noggrannhet	26
Medelavvik.	-12

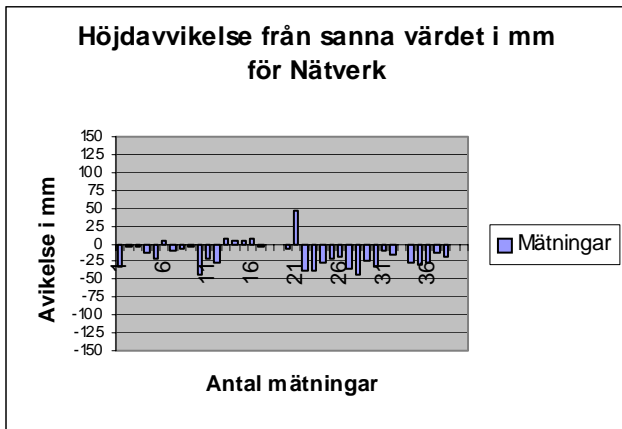


Trimble

Höjd

Precision	27
Noggrannhet	27
Medelavvik.	4

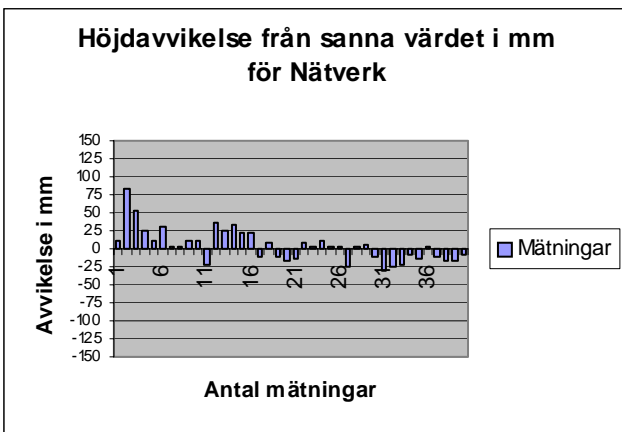
Punkt 3



Leica

Höjd

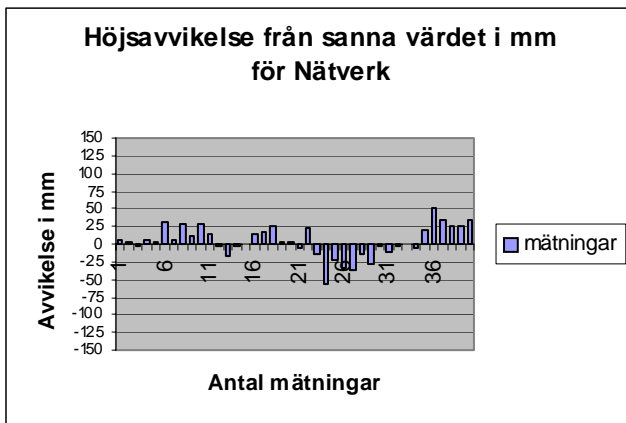
Precision	18
Noggrannhet	23
Medelavvik.	-14



Topcon

Höjd

Precision	23
Noggrannhet	23
Medelavvik.	4

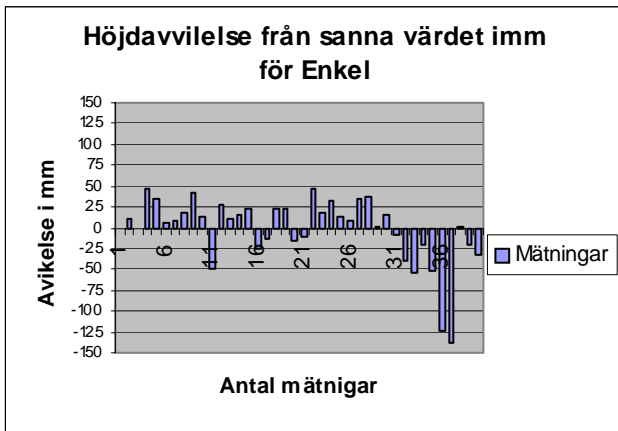


Trimble

Höjd

Precision	22
Noggrannhet	22
Medelavvik.	4

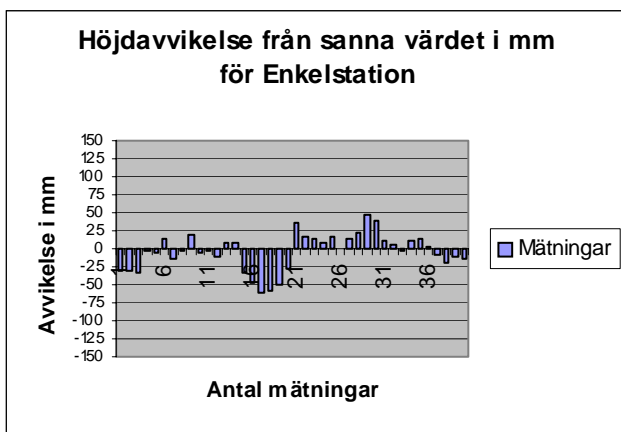
Punkt 4



Leica

Höjd

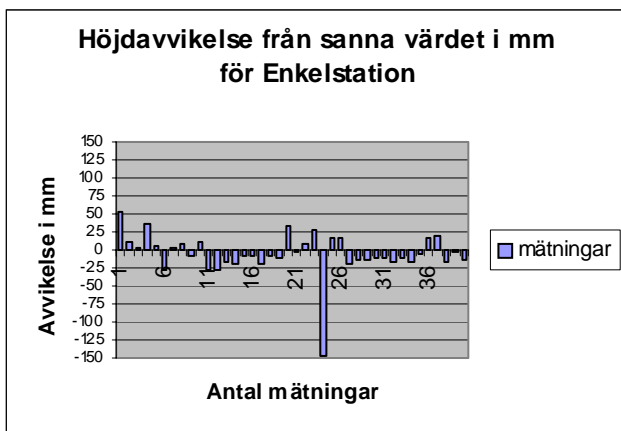
Precision	40
Noggrannhet	40
Medelavvik.	-2



Topcon

Höjd

Precision	25
Noggrannhet	25
Medelavvik.	-4

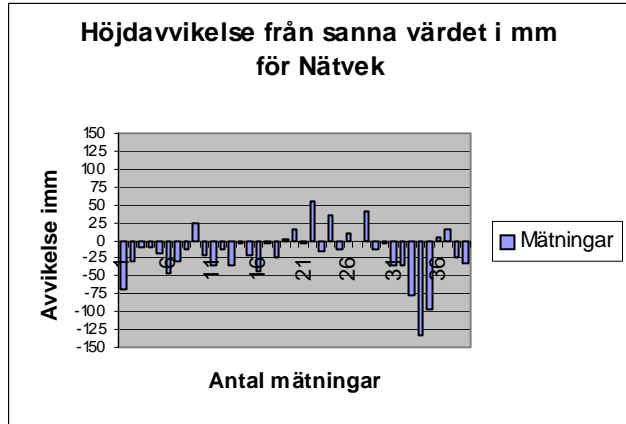


Trimble

Höjd

Precision	29
Noggrannhet	30
Medelavvik.	-6

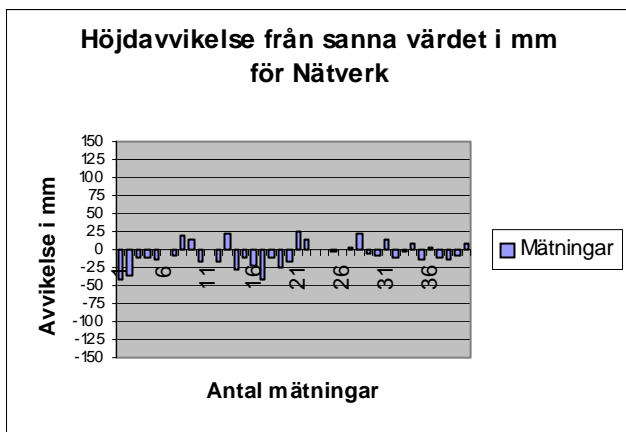
Punkt 4



Leica

Höjd

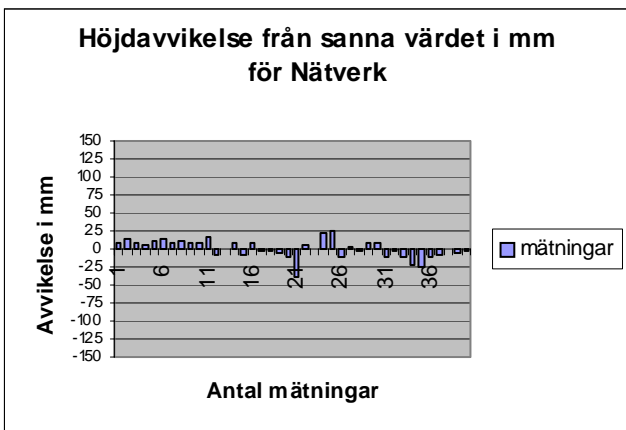
Precision	35
Noggrannhet	39
Medelavvik.	-19



Topcon

Höjd

Precision	17
Noggrannhet	17
Medelavvik.	-6

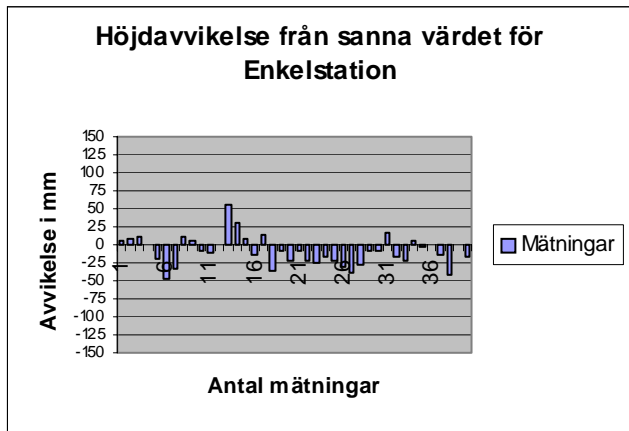


Trimble

Höjd

Precision	13
Noggrannhet	13
Medelavvik.	0

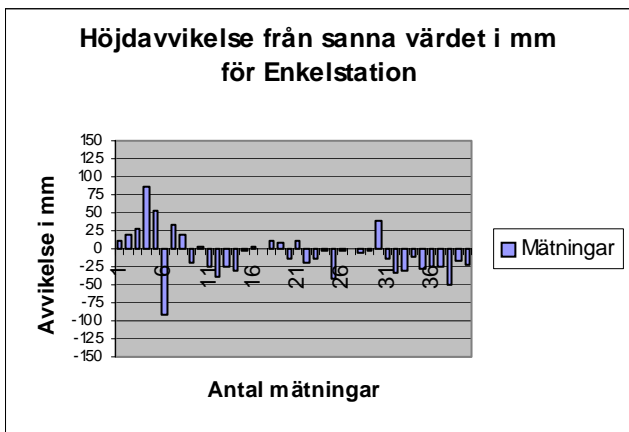
Punkt 5



Leica

Höjd

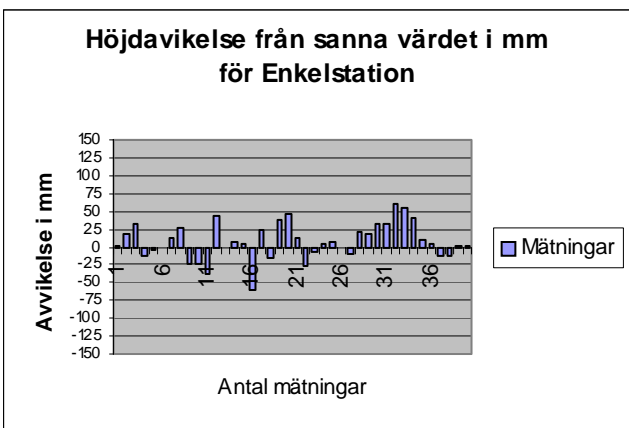
Precision	20
Noggrannhet	22
Medelavvik.	-9



Topcon

Höjd

Precision	30
Noggrannhet	31
Medelavvik.	-7

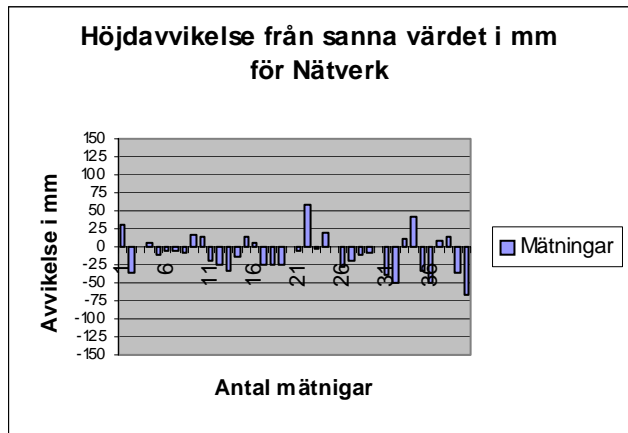


Trimble

Höjd

Precision	25
Noggrannhet	26
Medelavvik.	8

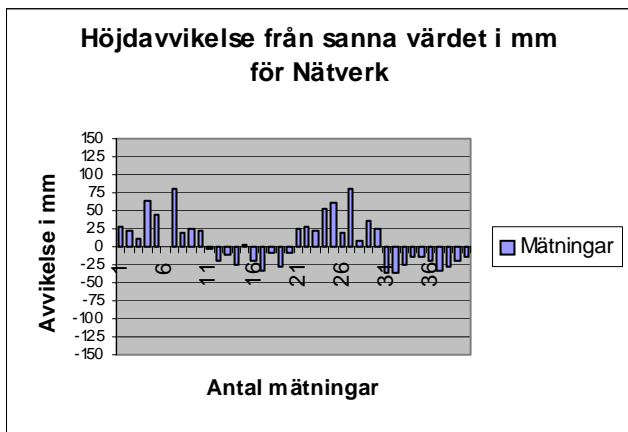
Punkt 5



Leica

Höjd

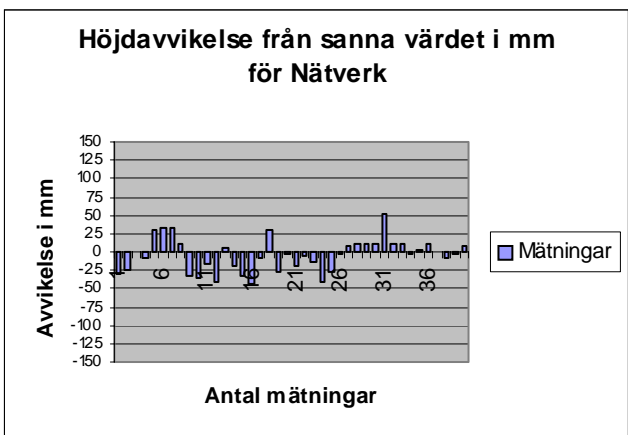
Precision	25
Noggrannhet	26
Medelavvik.	-9



Topcon

Höjd

Precision	32
Noggrannhet	33
Medelavvik.	7

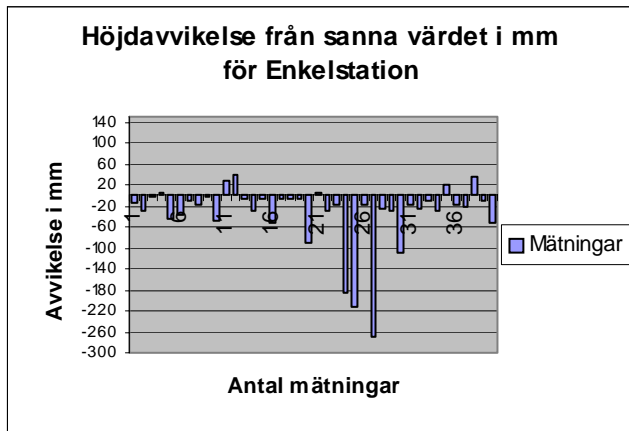


Trimble

Höjd

Precision	23
Noggrannhet	23
Medelavvik.	-4

Punkt 6

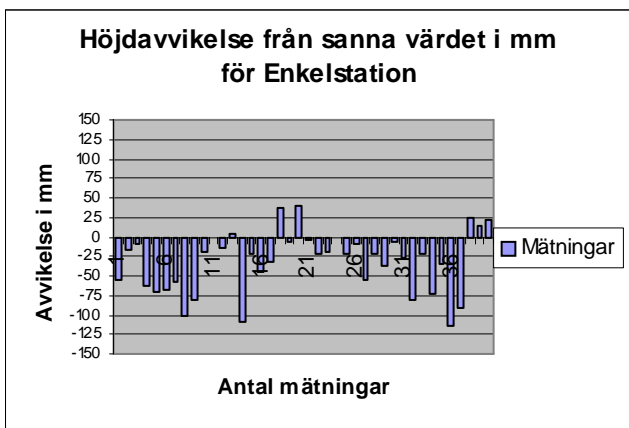


Leica

Höjd

Precision	40
Noggrannhet	45
Medelavvik.	-23

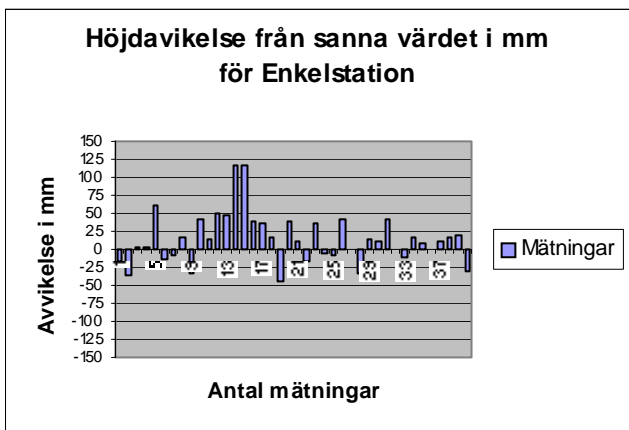
* Obs skalan!



Topcon

Höjd

Precision	39
Noggrannhet	50
Medelavvik.	-33

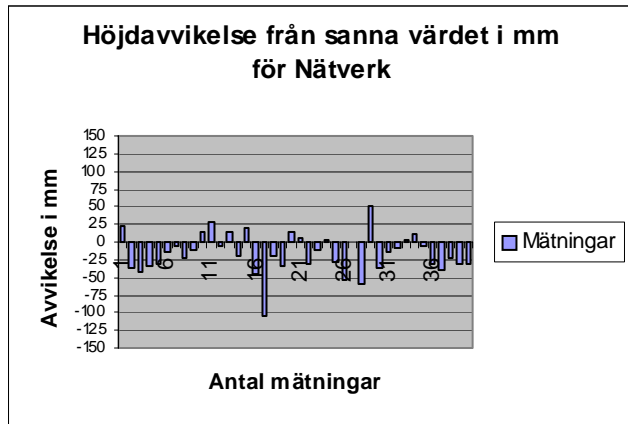


Trimble

Höjd

Precision	35
Noggrannhet	37
Medelavvik.	14

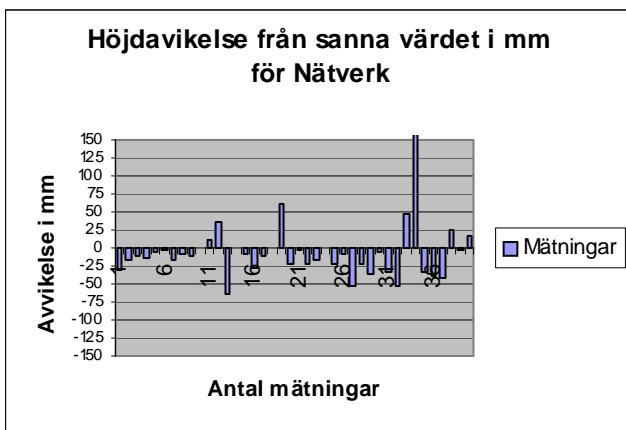
Punkt 6



Leica

Höjd

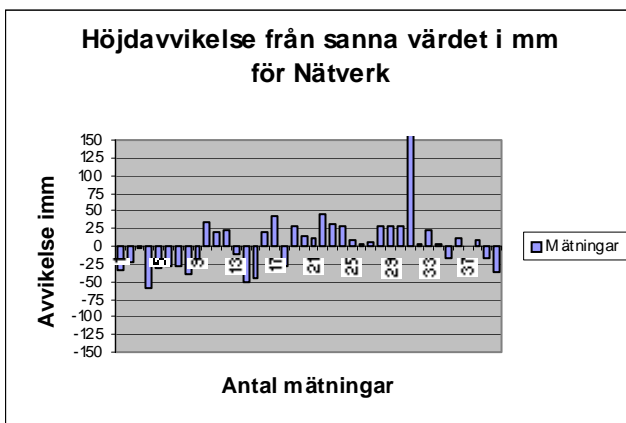
Precision	29
Noggrannhet	33
Medelavvik.	-17



Topcon

Höjd

Precision	40
Noggrannhet	40
Medelavvik.	-7

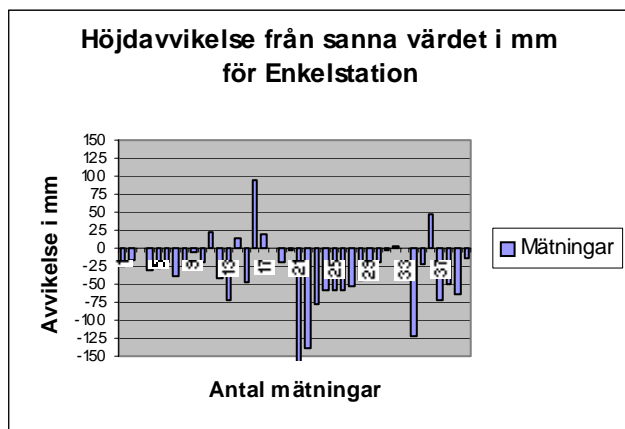


Trimble

Höjd

Precision	38
Noggrannhet	38
Medelavvik.	4

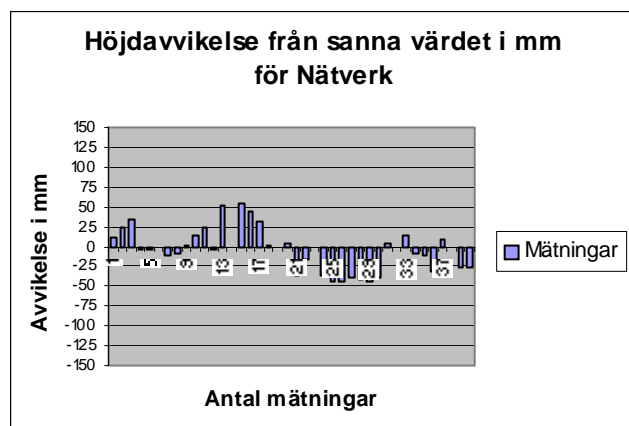
Punkt 7



Trimble

Höjd

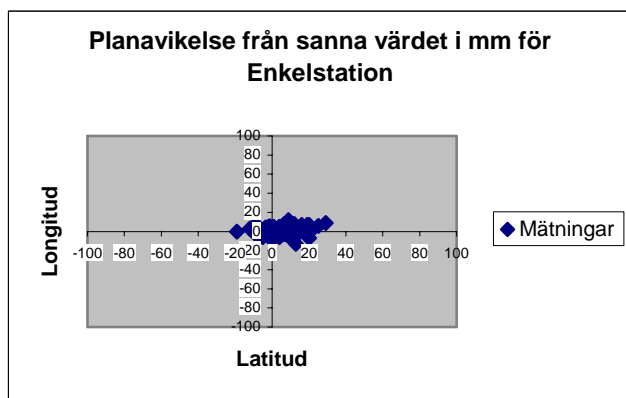
Precision	42
Noggrannhet	50
Medelavvik.	-28



Trimble

Höjd

Precision	28
Noggrannhet	28
Medelavvik.	-3

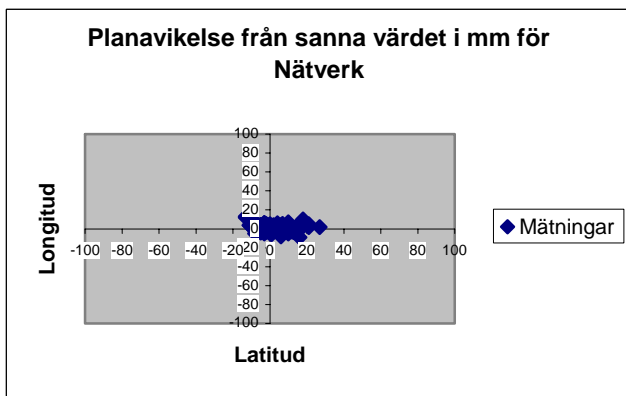


Samtliga mätningar punkt 1

(mm)	Lat	Long
Precision	8	4
Noggrannhet	9	4
Medelavvik.	4	1

Radiellt

Precision	9
Noggrannhet	10
Medelavvik.	4

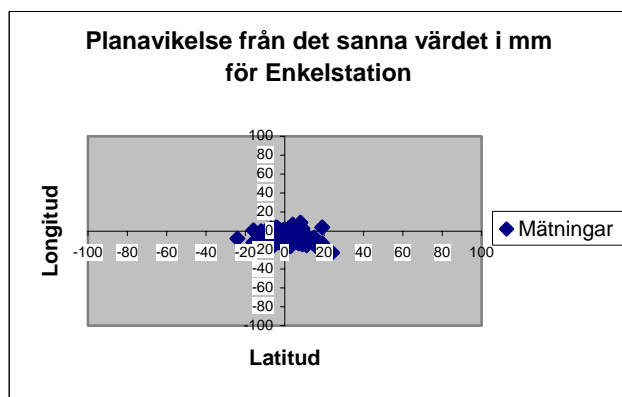


Samtliga mätningar punkt 1

(mm)	Lat	Long
Precision	8	4
Noggrannhet	8	4
Medelavvik.	2	1

Radiellt

Precision	9
Noggrannhet	9
Medelavvik.	3

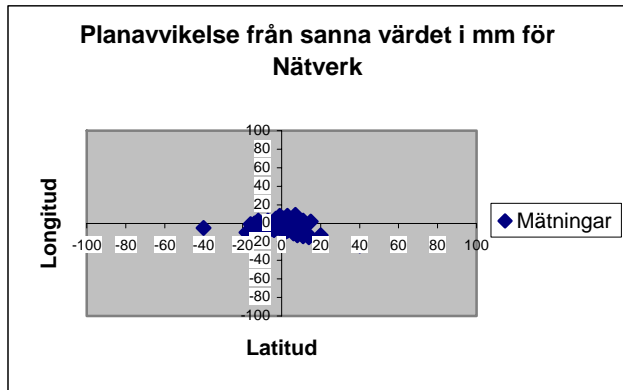


Samtliga mätningar punkt 2

(mm)	Lat	Long
Precision	8	5
Noggrannhet	8	7
Medelavvik.	1	-5

Radiellt

Precision	9
Noggrannhet	11
Medelavvik.	5

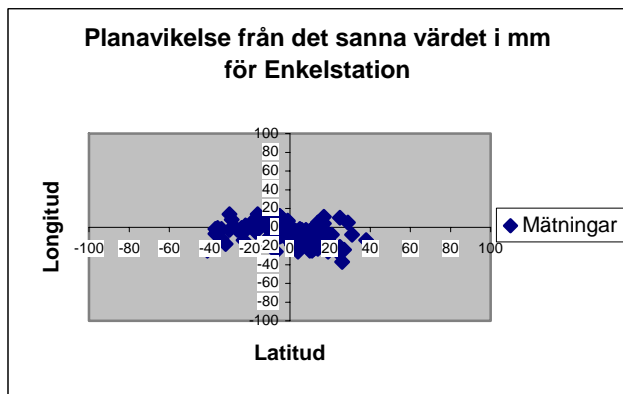


Samtliga mätningar punkt 2

(mm)	Lat	Long
Precision	8	5
Noggrannhet	8	5
Medelavvik.	0	-2

Radiellt

Precision	10
Noggrannhet	10
Medelavvik.	2

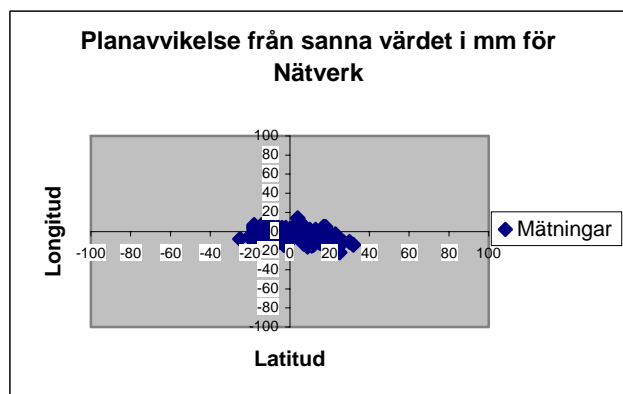


Samtliga mätningar punkt 3

(mm)	Lat	Long
Precision	17	11
Noggrannhet	17	13
Medelavvik.	-1	-7

Radiellt

Precision	20
Noggrannhet	21
Medelavvik.	7

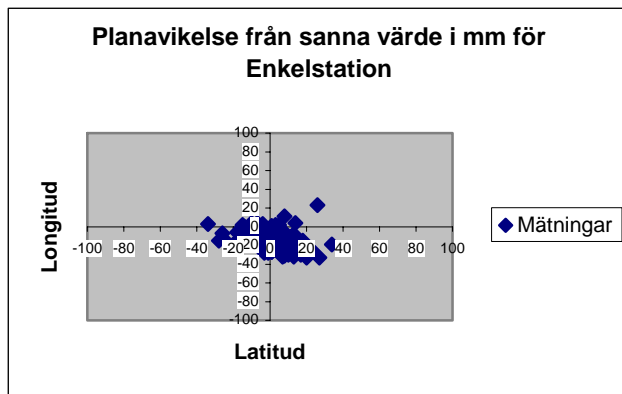


Samtliga mätningar punkt 3

(mm)	Lat	Long
Precision	12	7
Noggrannhet	12	8
Medelavvik.	1	-4

Radiellt

Precision	14
Noggrannhet	14
Medelavvik.	4

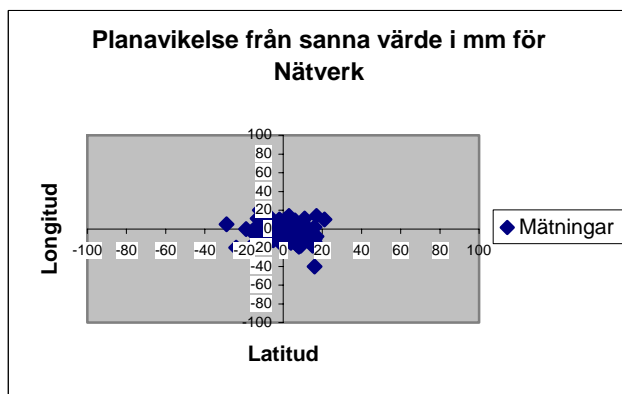


Samtliga mätningar punkt 4

(mm)	Lat	Long
Precision	11	11
Noggrannhet	11	18
Medelavvik.	1	-14

Radiellt

Precision	15
Noggrannhet	21
Medelavvik.	14

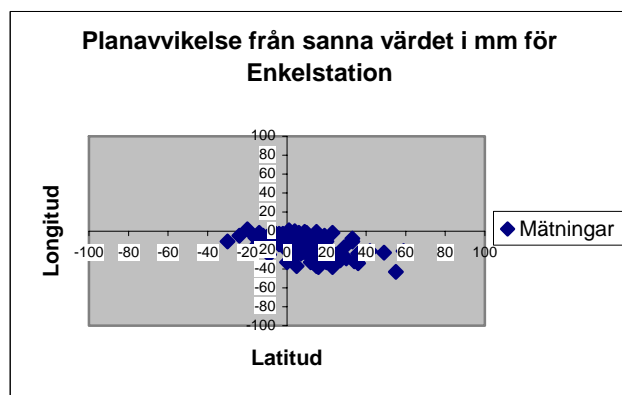


Samtliga mätningar punkt 4

(mm)	Lat	Long
Precision	9	9
Noggrannhet	9	9
Medelavvik.	-1	-4

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	13
Medelavvik.	4

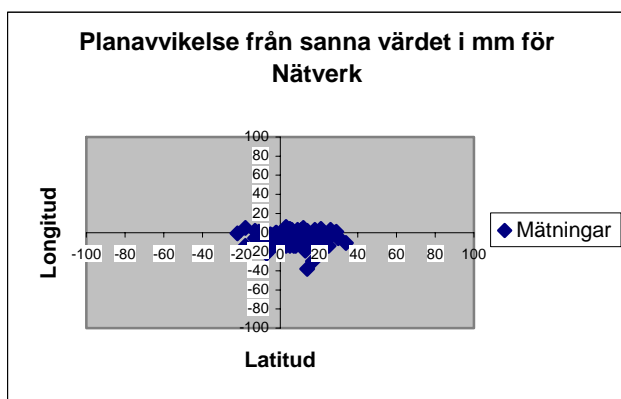


Samtliga mätningar punkt 5

(mm)	Lat	Long
Precision	16	11
Noggrannhet	18	20
Medelavvik.	10	-17

Radiellt

Precision	19
Noggrannhet	27
Medelavvik.	19

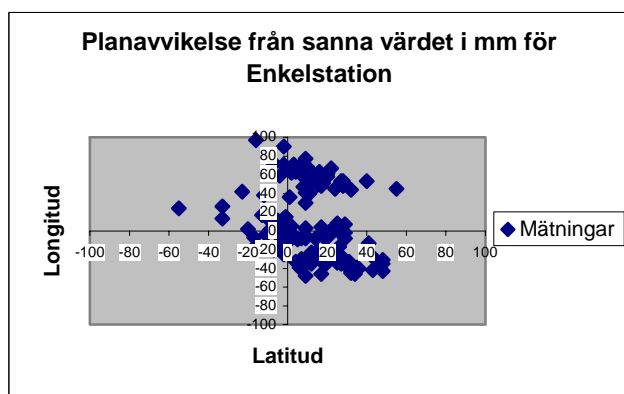


Samtliga mätningar punkt 5

(mm)	Lat	Long
Precision	11	7
Noggrannhet	12	10
Medelavvik.	5	-7

Radiellt

Precision	13
Noggrannhet	15
Medelavvik.	8

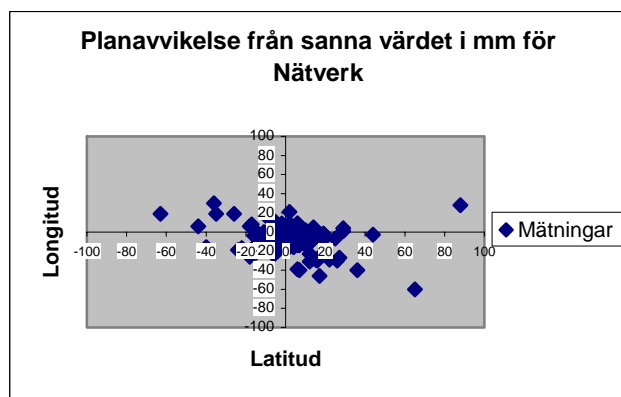


Samtliga mätningar punkt 6

(mm)	Lat	Long
Precision	18	39
Noggrannhet	21	40
Medelavvik.	11	10

Radiellt

Precision	42
Noggrannhet	45
Medelavvik.	15

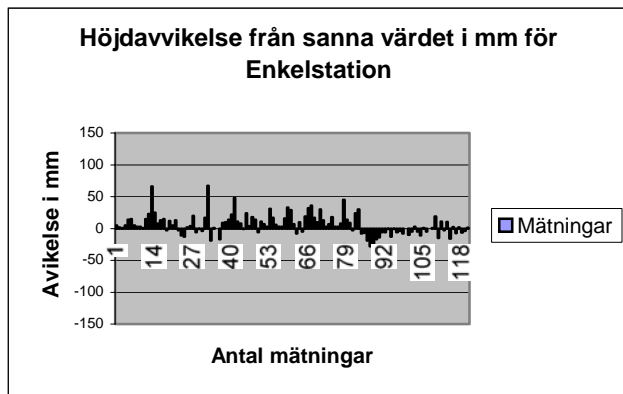


Samtliga mätningar punkt 6

(mm)	Lat	Long
Precision	18	15
Noggrannhet	18	16
Medelavvik.	1	-6

Radiellt

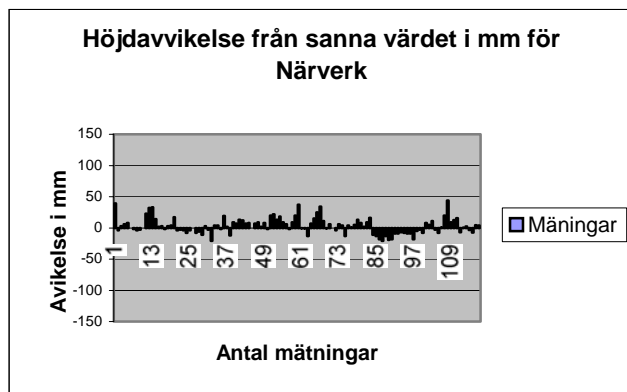
Precision	23
Noggrannhet	24
Medelavvik.	6



Samtliga mätningar punkt 1

Höjd

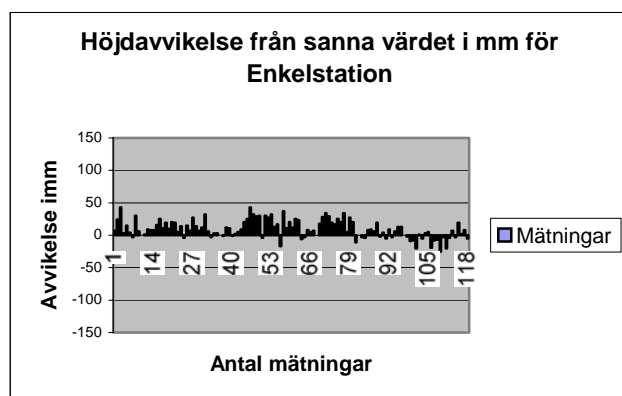
Precision	16
Noggrannhet	17
Medelavvik.	6



Samtliga mätningar punkt 1

Höjd

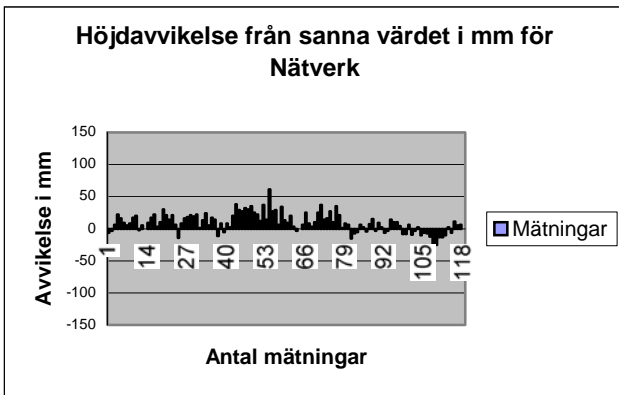
Precision	12
Noggrannhet	13
Medelavvik.	3



Samtliga mätningar punkt 2

Höjd

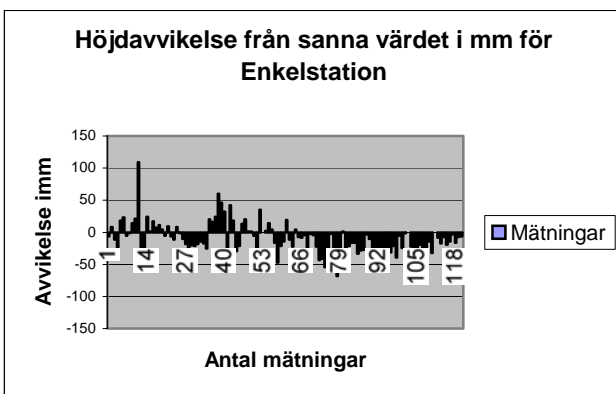
Precision	14
Noggrannhet	17
Medelavvik.	10



Samtliga mätningar punkt 2

Höjd

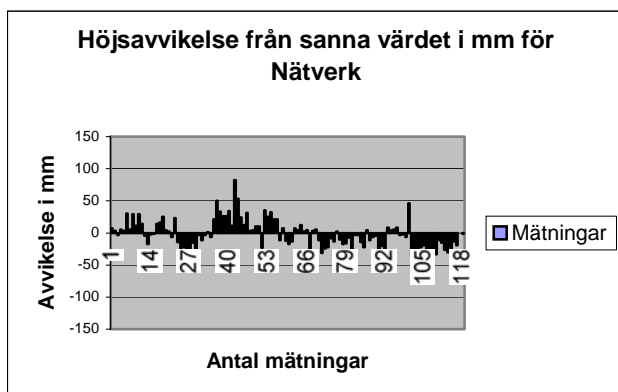
Precision	14
Noggrannhet	17
Medelavvik.	9



Samtliga mätningar punkt 3

Höjd

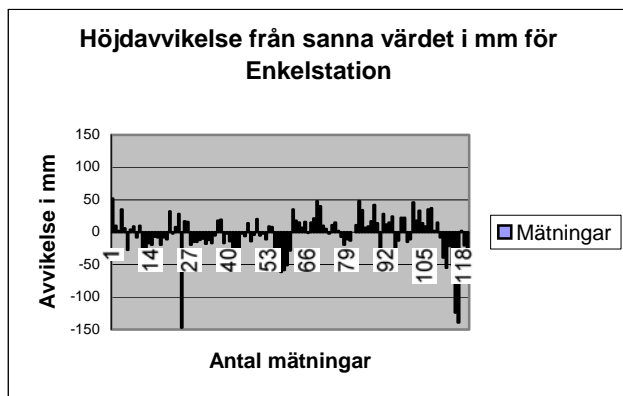
Precision	24
Noggrannhet	26
Medelavvik.	-9



Samtliga mätningar punkt 3

Höjd

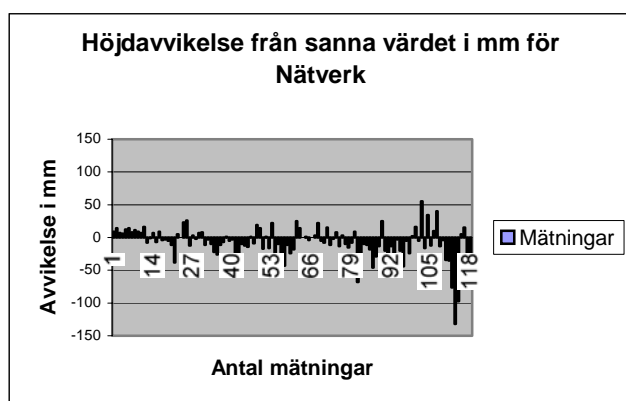
Precision	22
Noggrannhet	22
Medelavvik.	-2



Samtliga mätningar punkt 4

Höjd

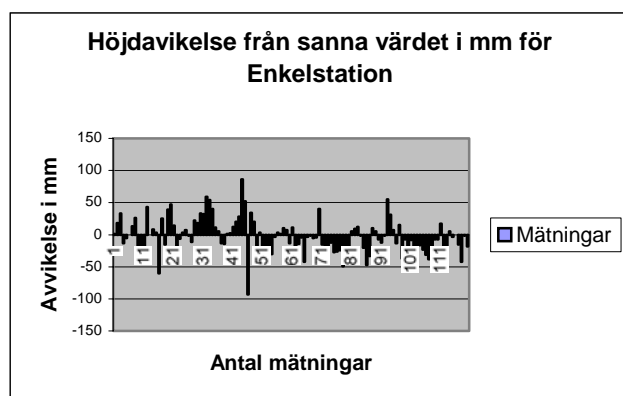
Precision	32
Noggrannhet	32
Medelavvik.	-4



Samtliga mätningar punkt 4

Höjd

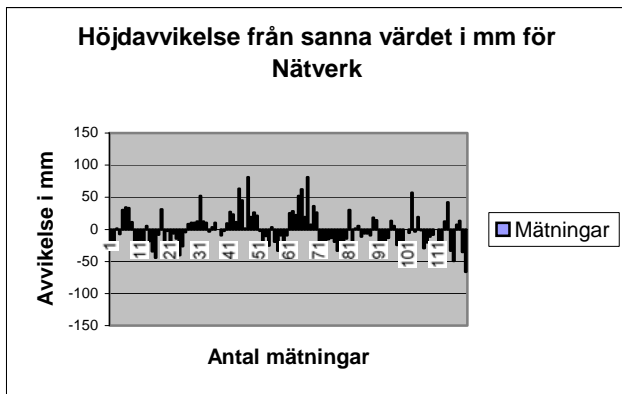
Precision	24
Noggrannhet	26
Medelavvik.	-8



Samtliga mätningar punkt 5

Höjd

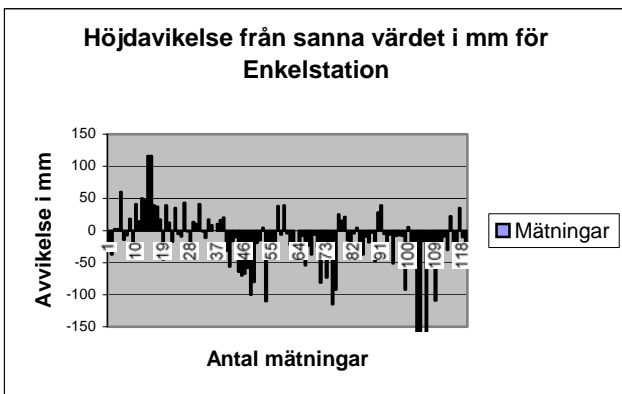
Precision	27
Noggrannhet	27
Medelavvik.	-3



Samtliga mätningar punkt 5

Höjd

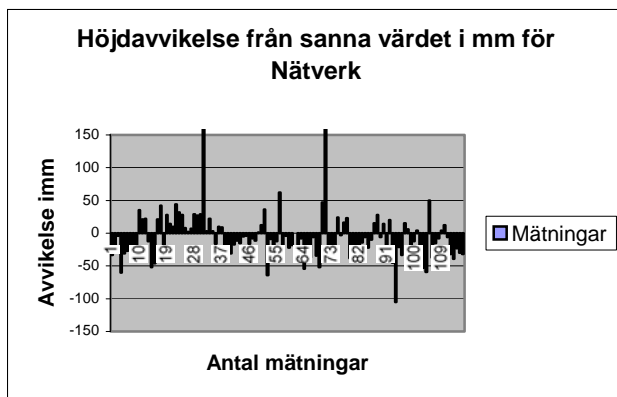
Precision	28
Noggrannhet	28
Medelavvik.	-2



Samtliga mätningar punkt 6

Höjd

Precision	43
Noggrannhet	45
Medelavvik.	-14



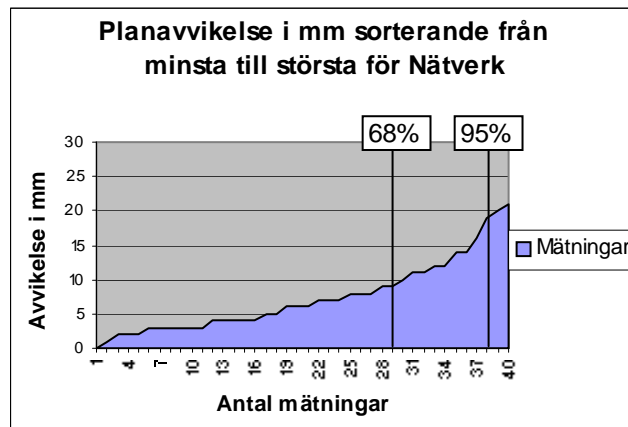
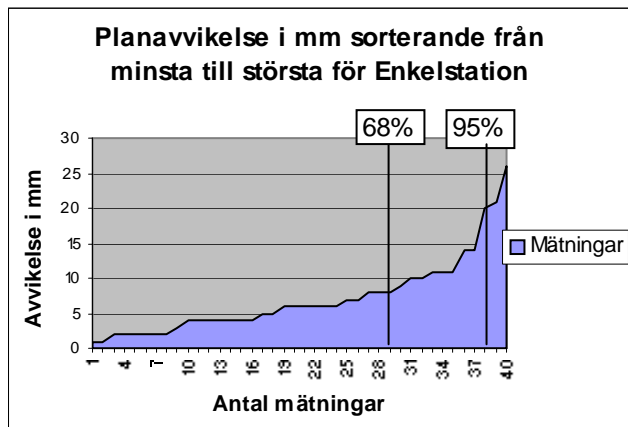
Samtliga mätningar punkt 6

Höjd

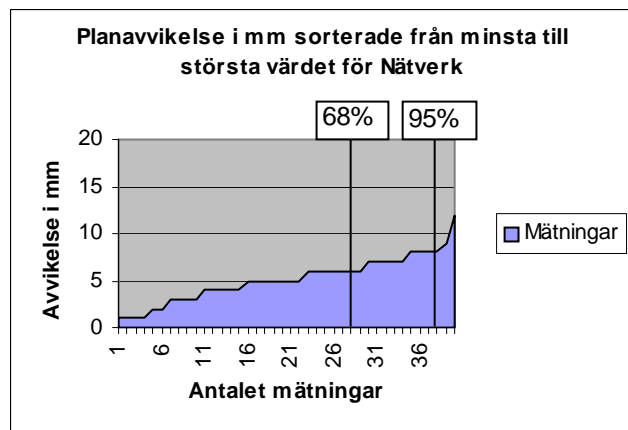
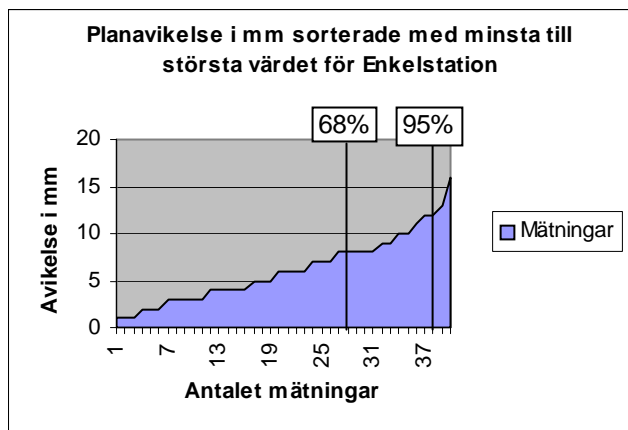
Precision	37
Noggrannhet	37
Medelavvik.	-7

Leica samtliga mätningar för punkt 1-3

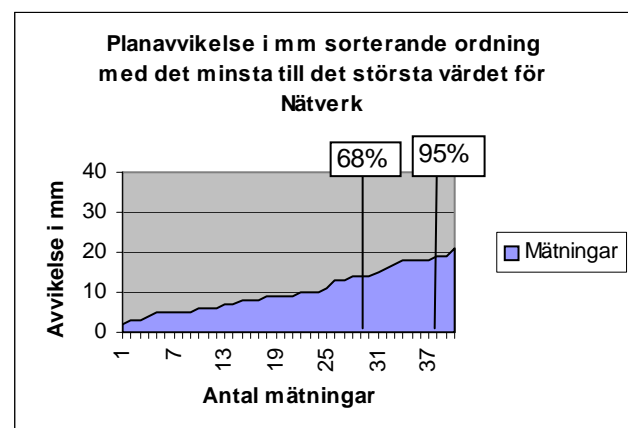
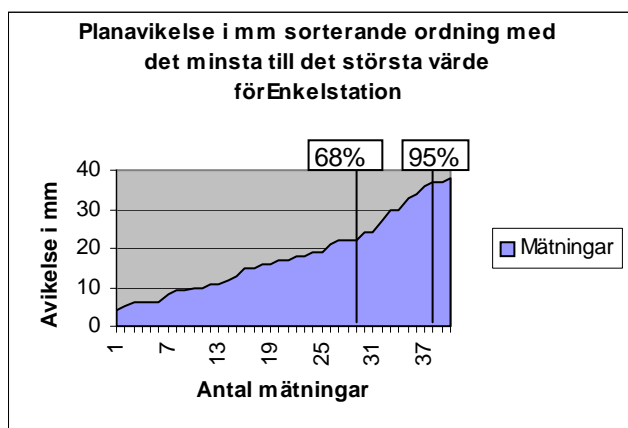
Punkt 1



Punkt 2

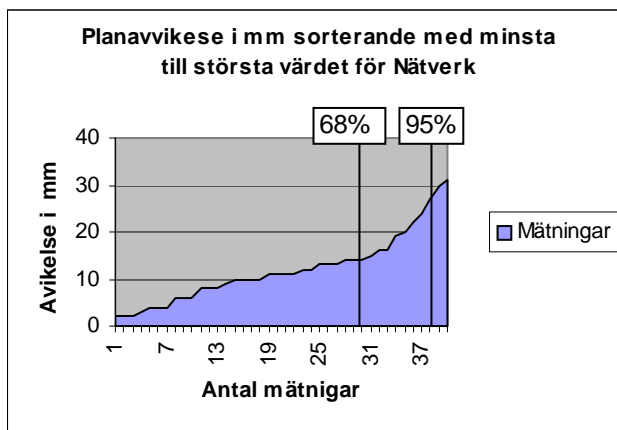
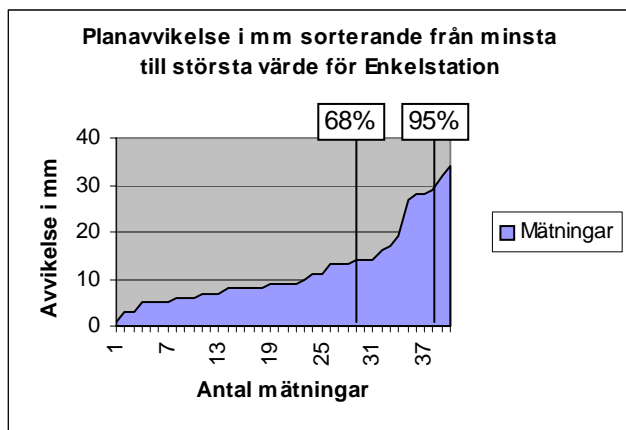


Punkt 3

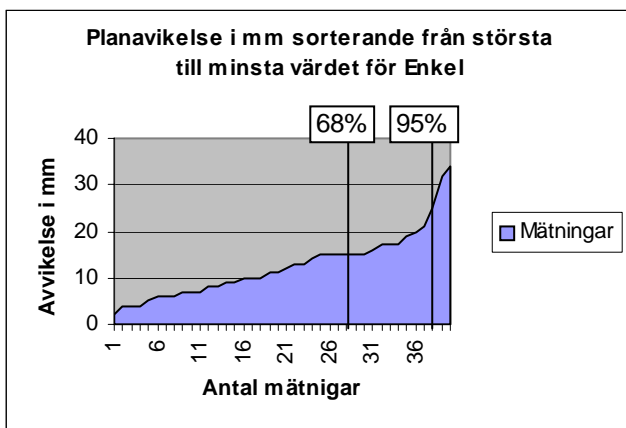


Leica samtliga mätningar för punkt 4-6

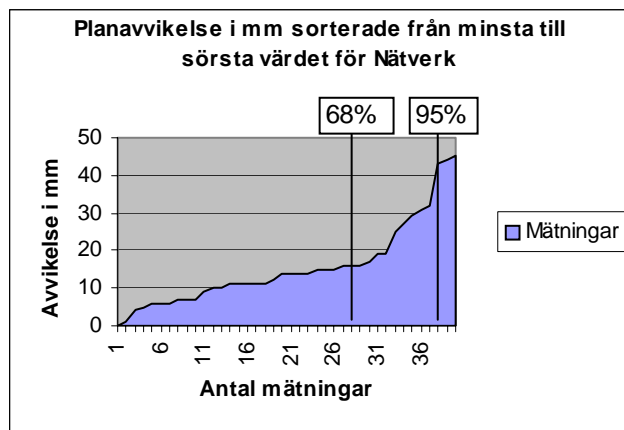
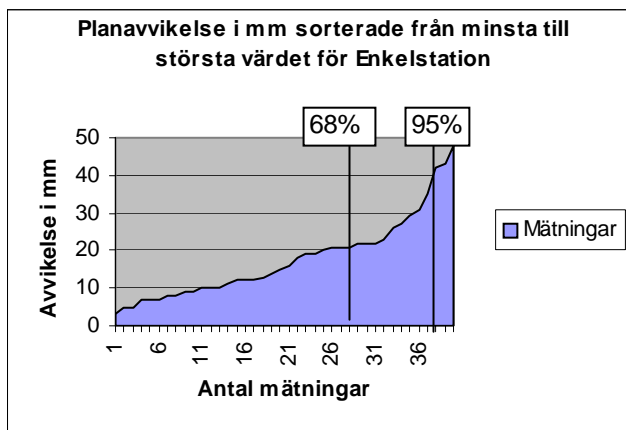
Punkt 4



Punkt 5

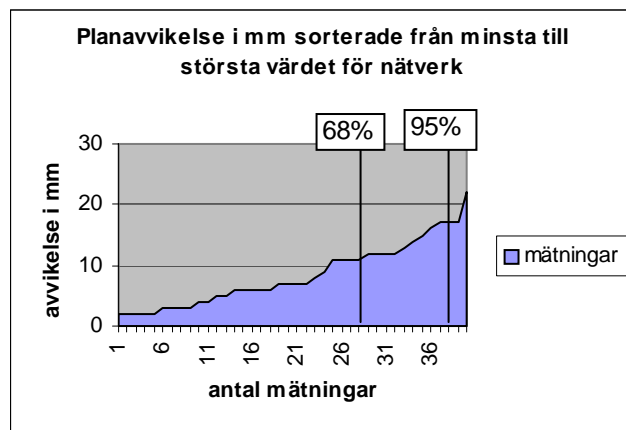
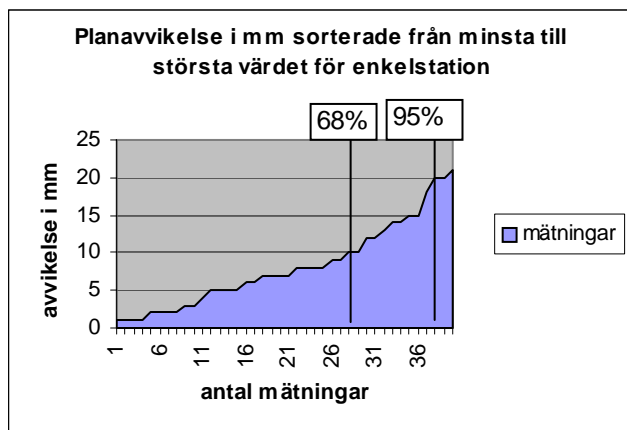


Punkt 6

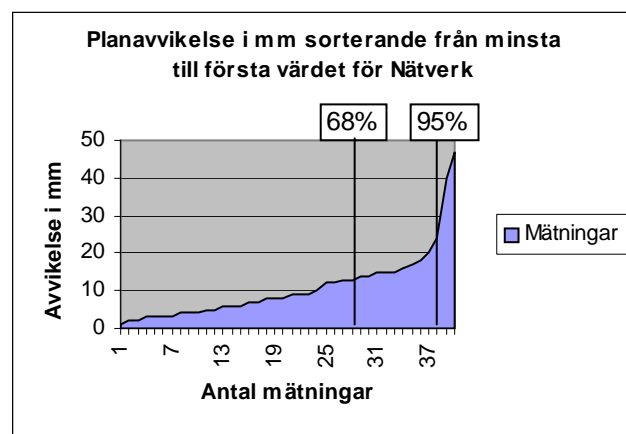
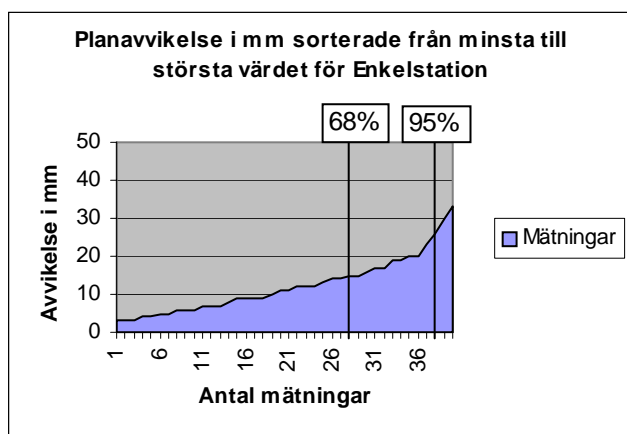


Topcon samtliga mätningar för punkt 1-3

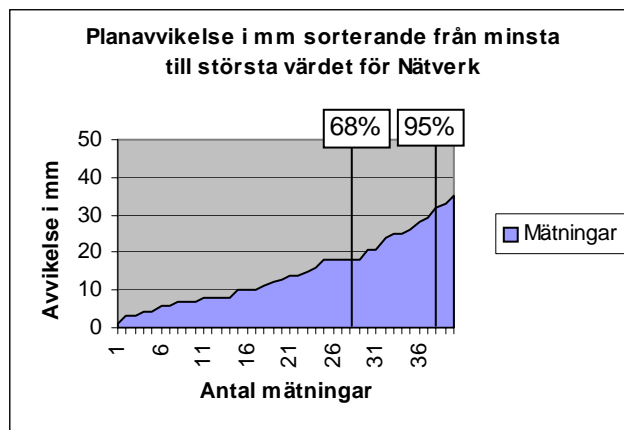
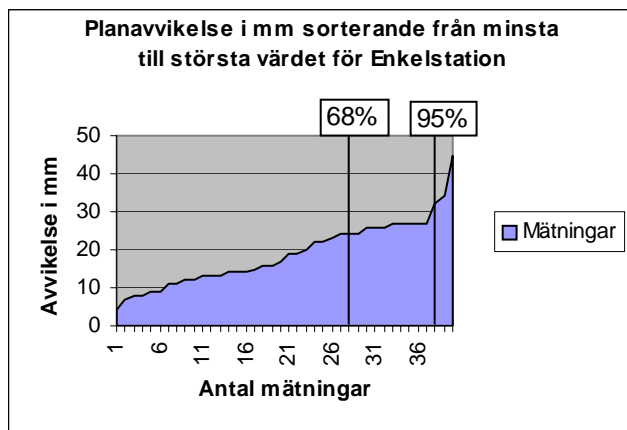
Punkt 1



Punkt 2

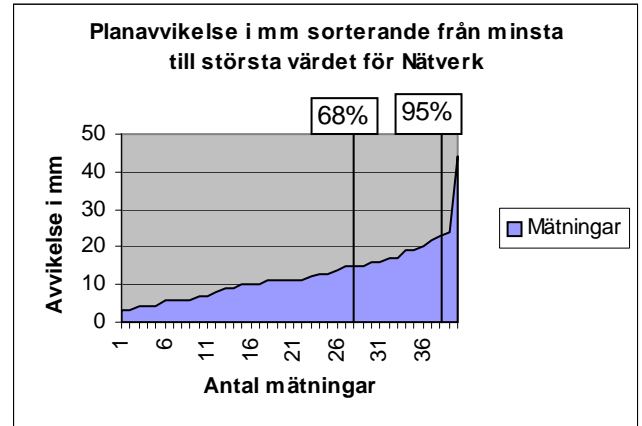
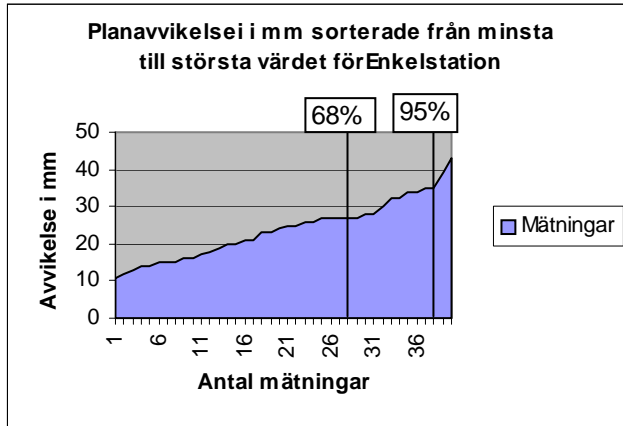


Punkt 3

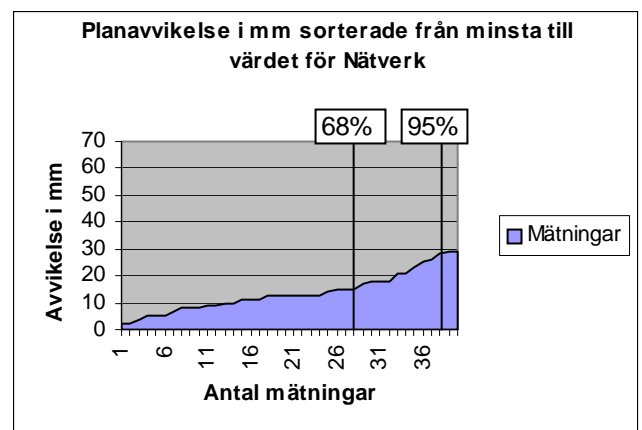
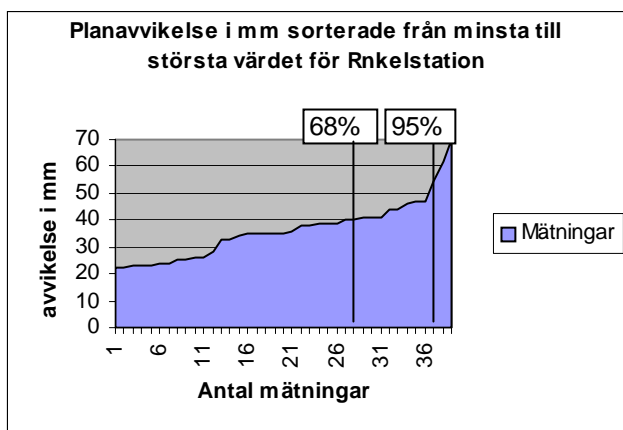


Topcon samtliga mätningar för punkt 4-6

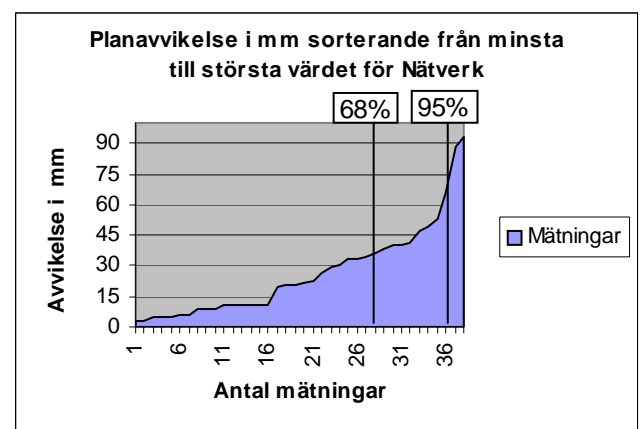
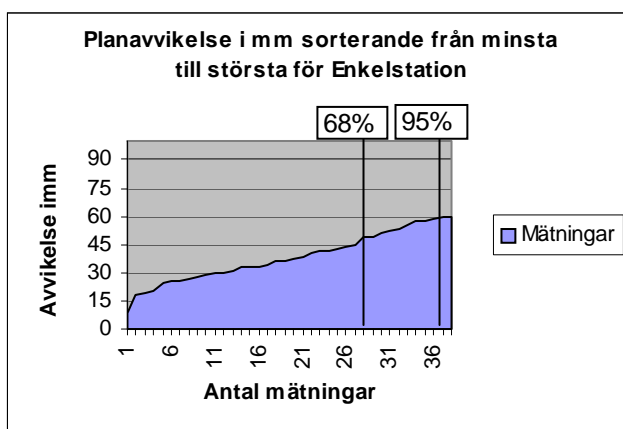
Punkt 4



Punkt 5

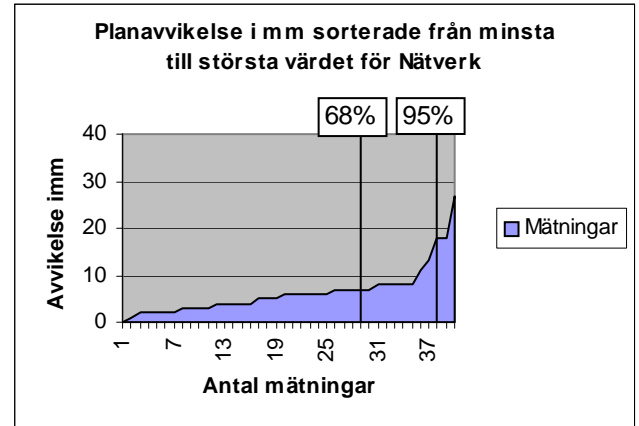
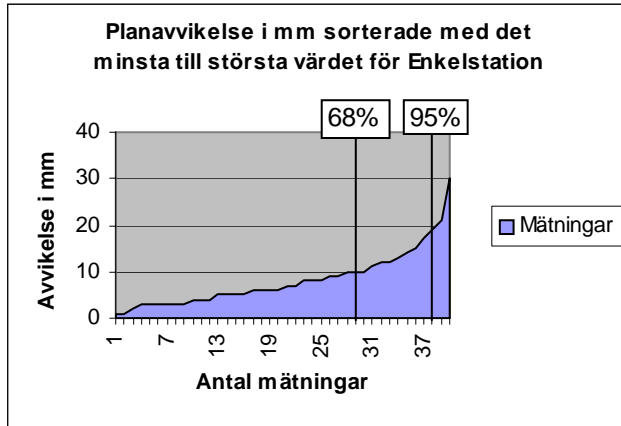


Punkt 6

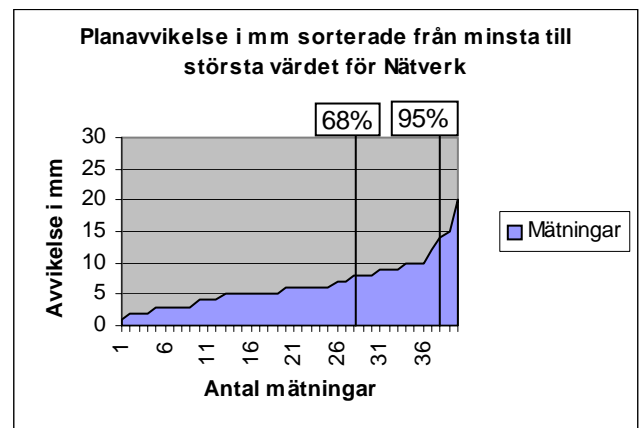
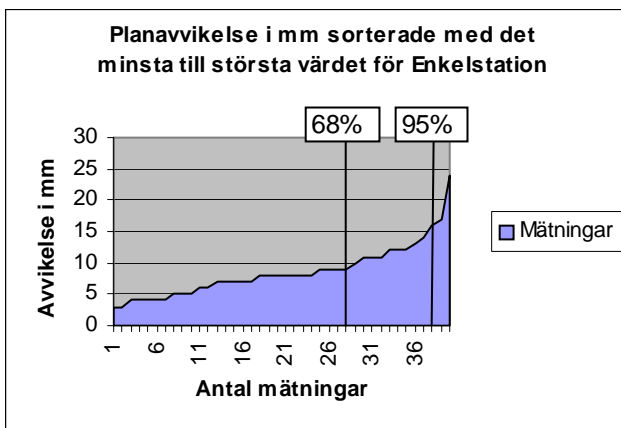


Trimble samtliga mätningar för punkt 1-3

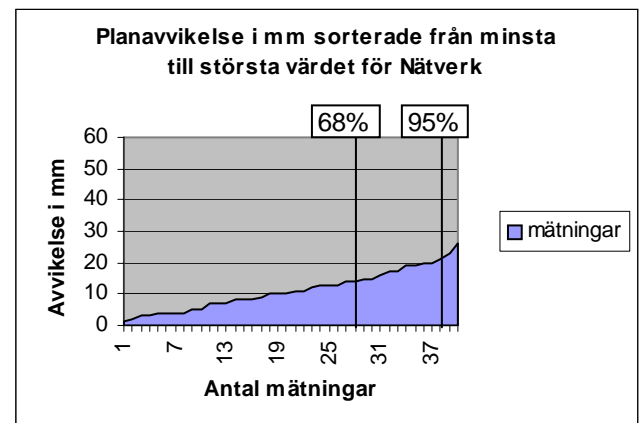
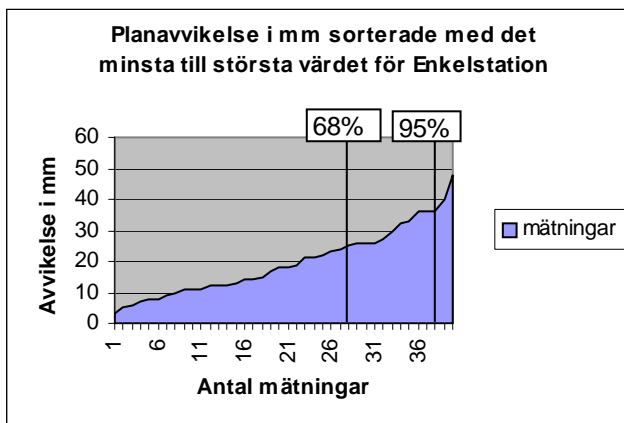
Punkt 1



Punkt 2

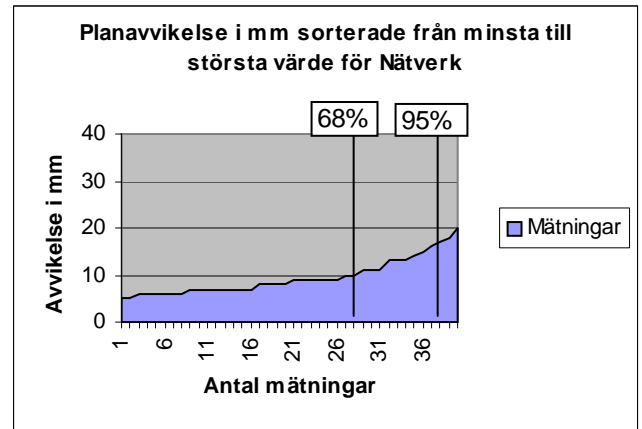
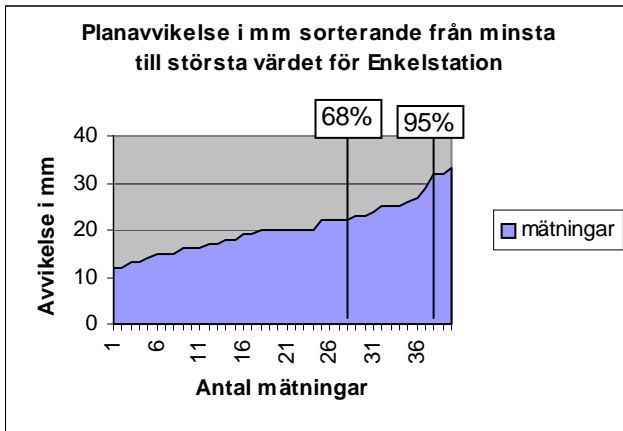


Punkt 3

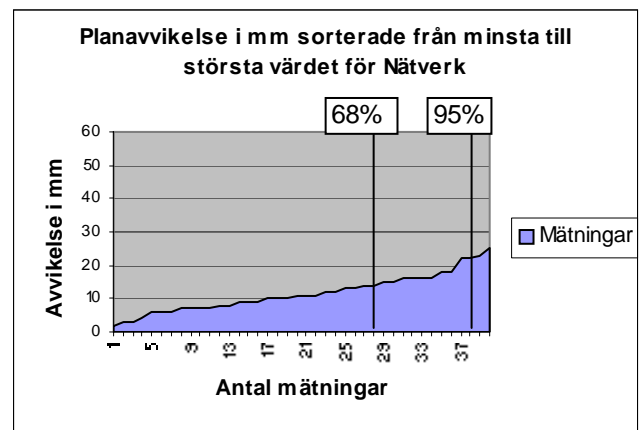


Trimble samtliga mätningar för punkt 4-6

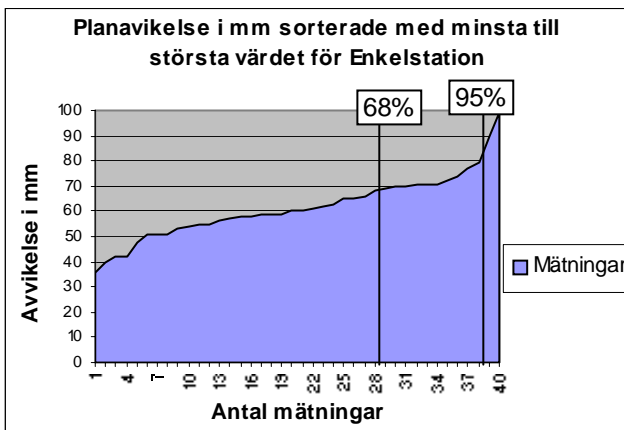
Punkt 4



Punkt 5

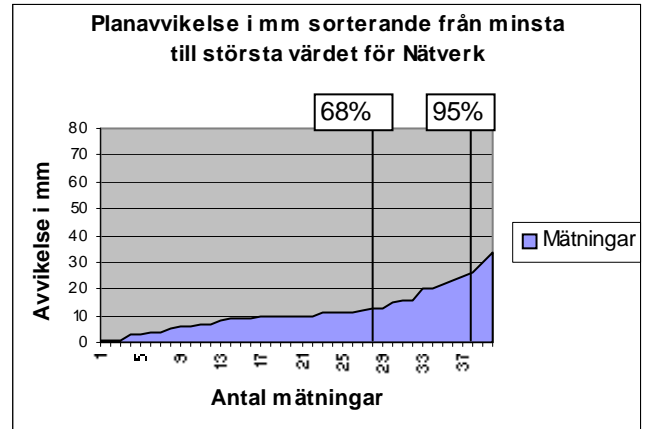
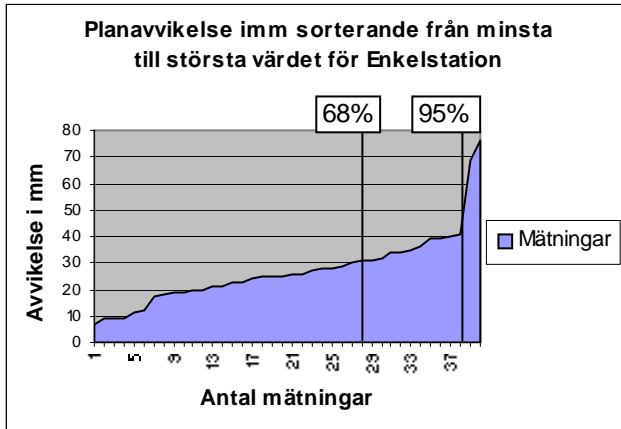


Punkt 6



Trimble samtliga mätningar för punkt 7

Punkt 7

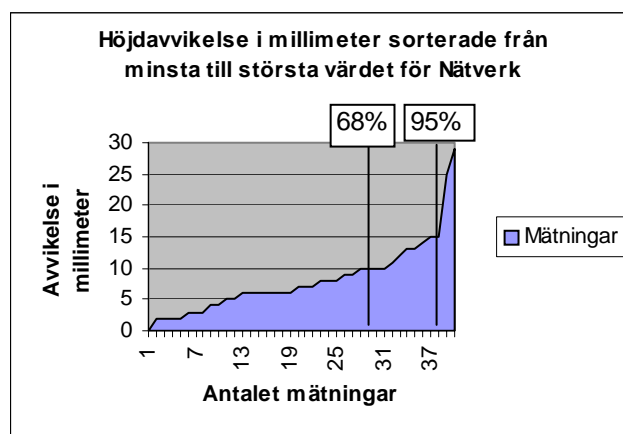
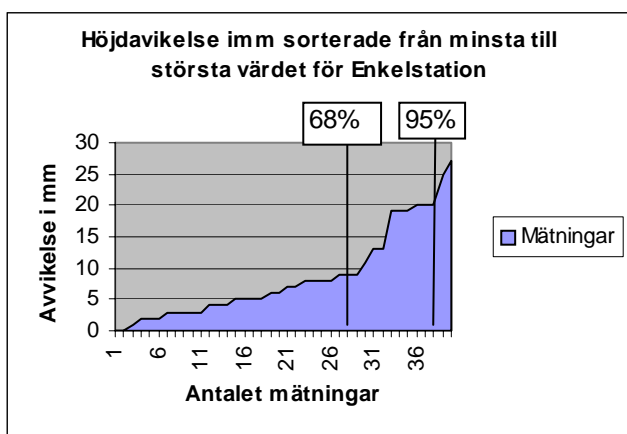


Leica samtliga mätningar för punkt 1-3

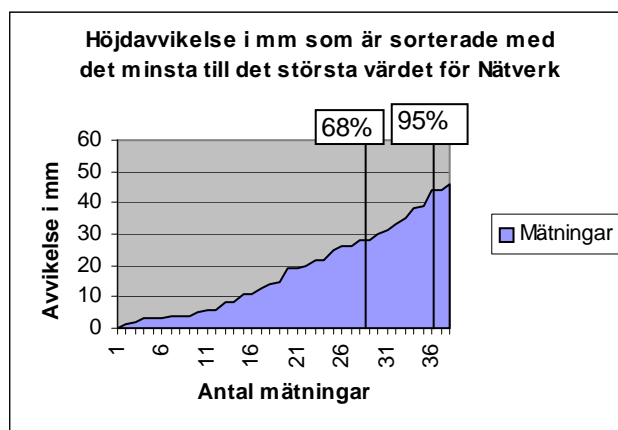
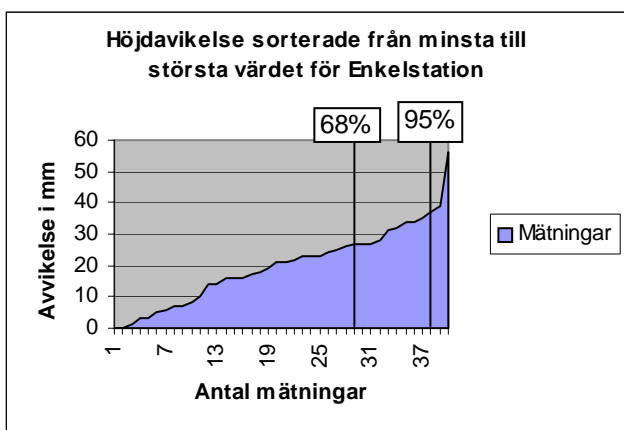
Punkt 1



Punkt 2

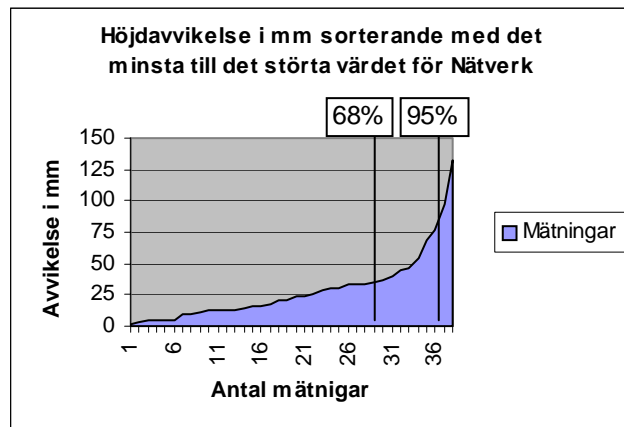
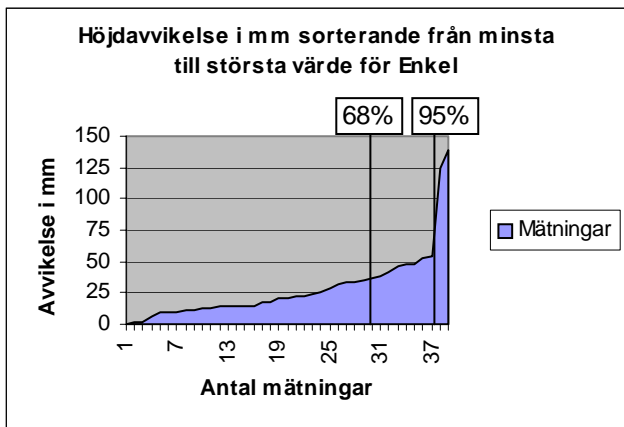


Punkt 3

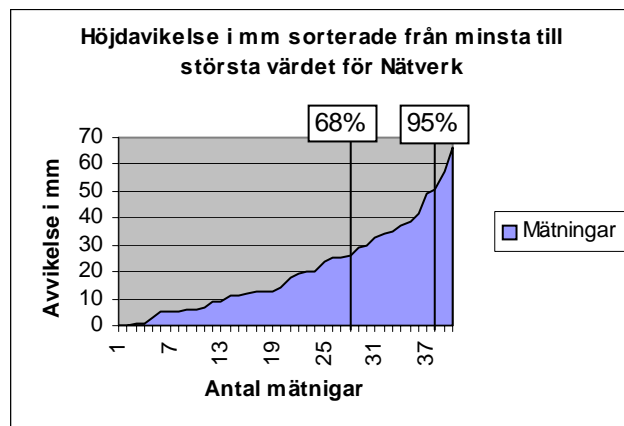


Leica samtliga mätningar för punkt 4-6

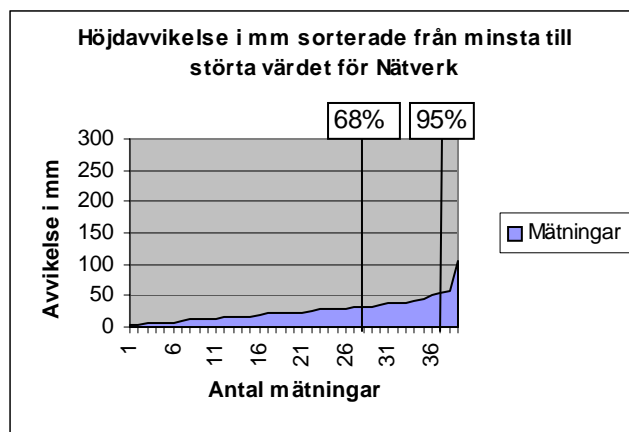
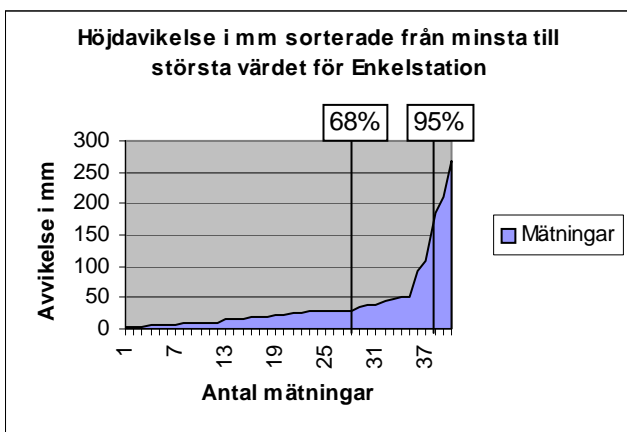
Punkt 4



Punkt 5

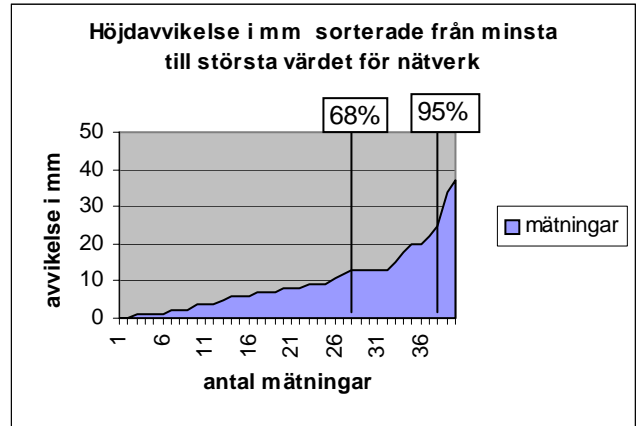
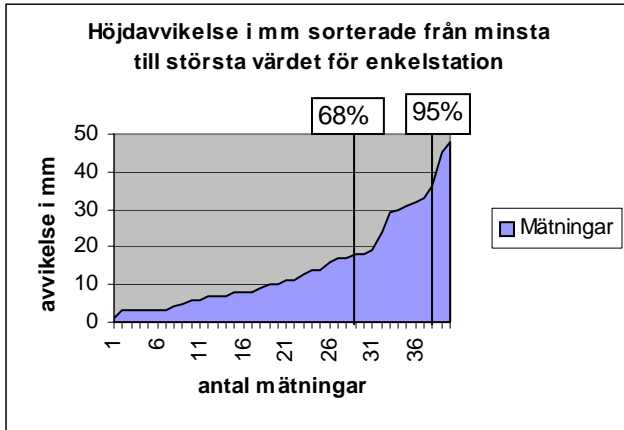


Punkt 6

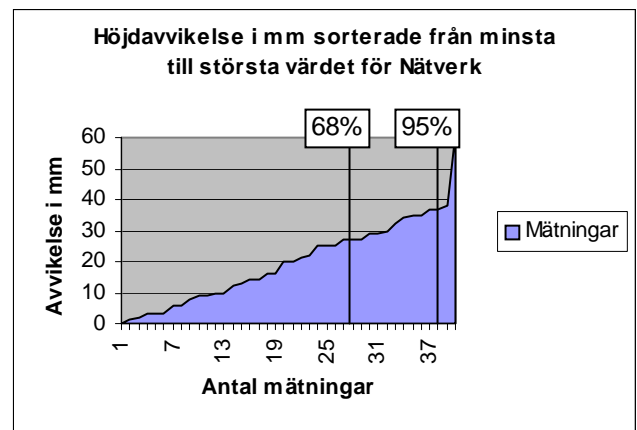
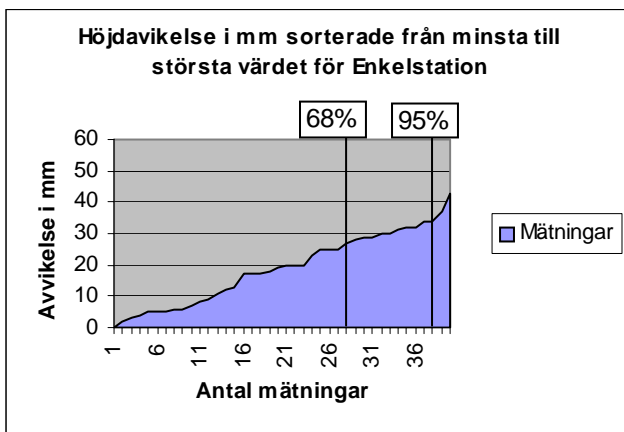


Topcon samtliga mätningar för punkt 1-3

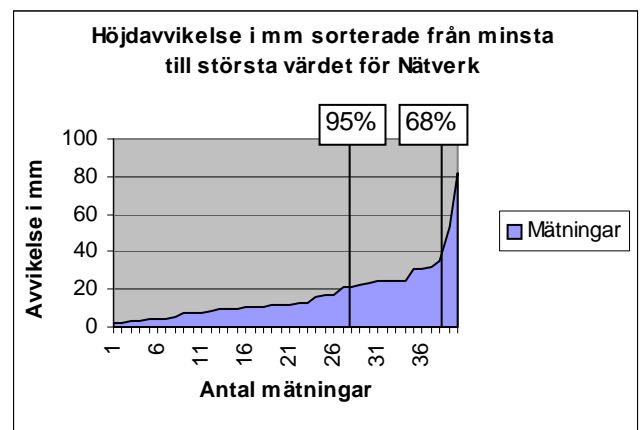
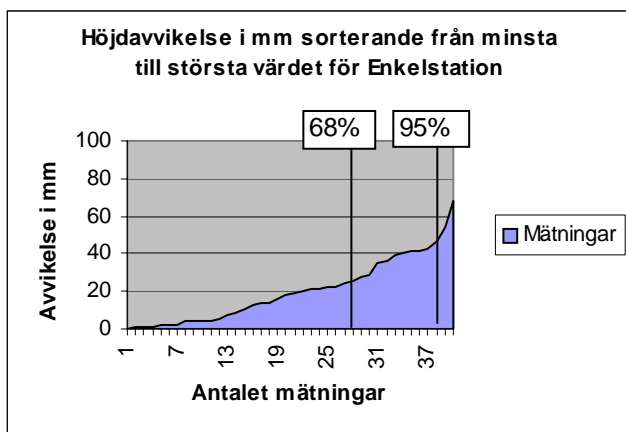
Punkt 1



Punkt 2

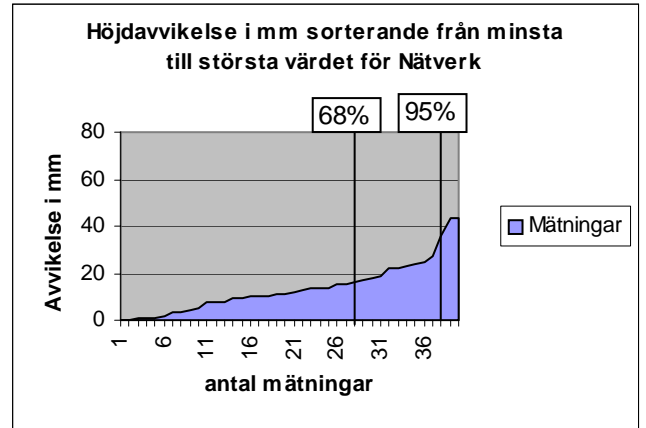
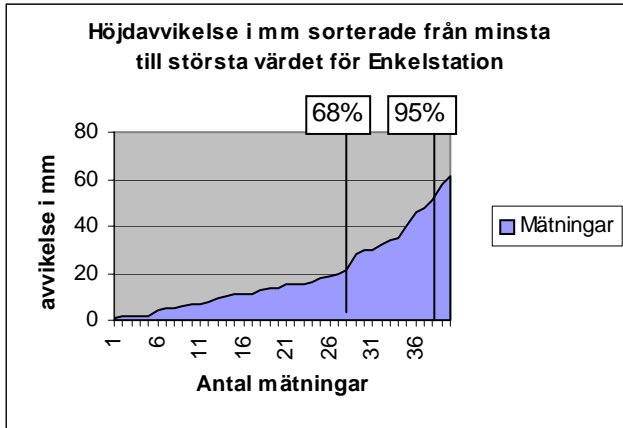


Punkt 3

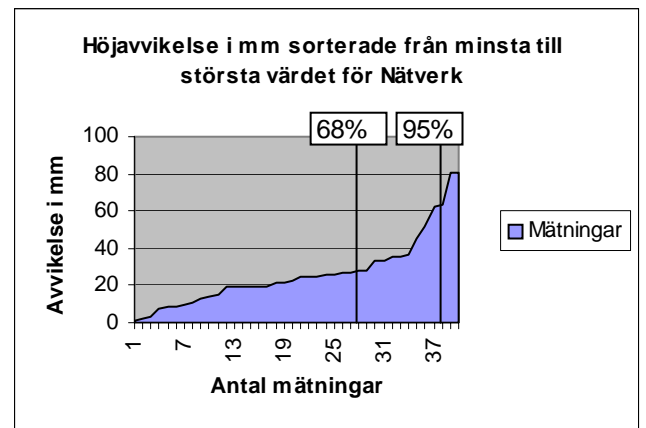
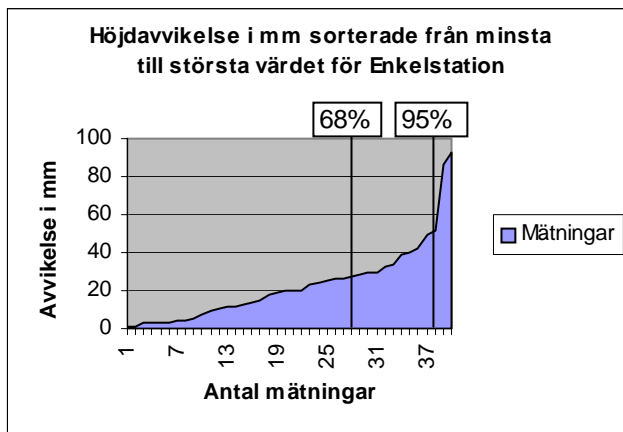


Topcon samtliga mätningar för punkt 4-6

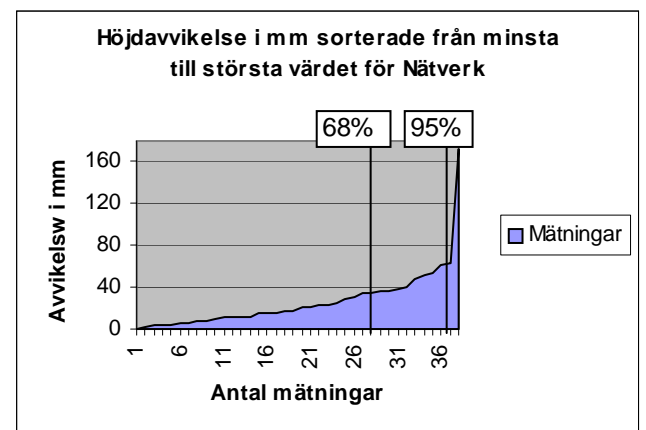
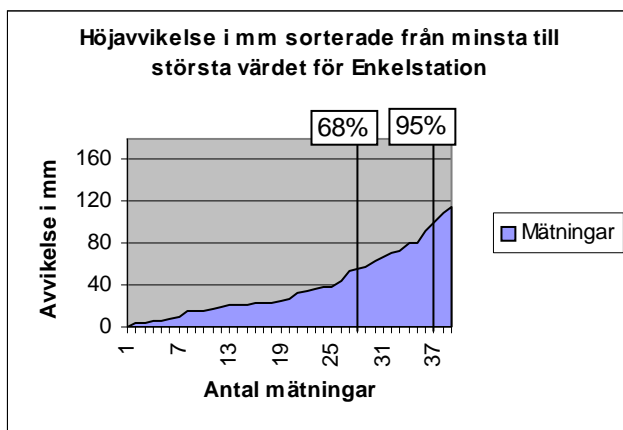
Punkt 4



Punkt 5

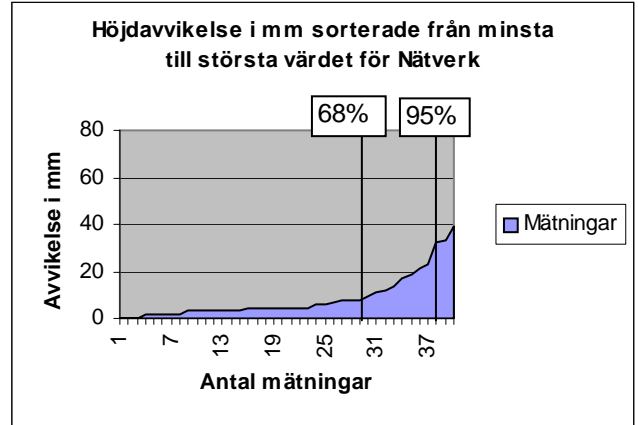
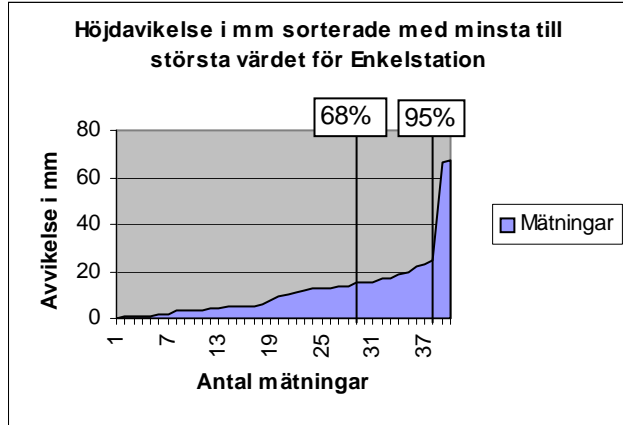


Punkt 6

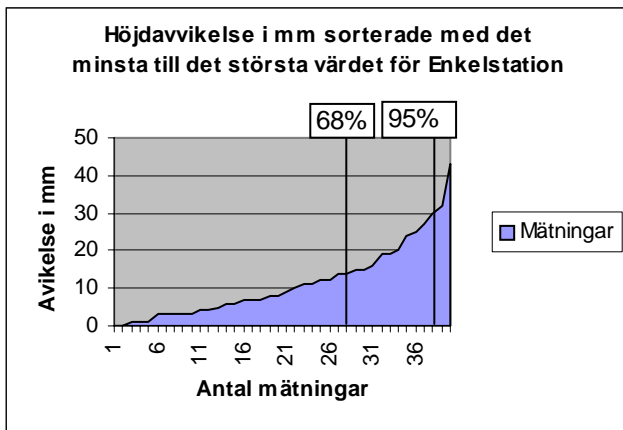


Trimble samtliga mätningar punkt 1-3

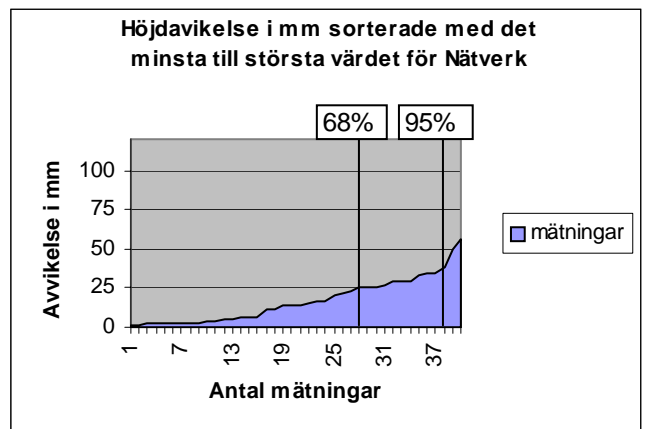
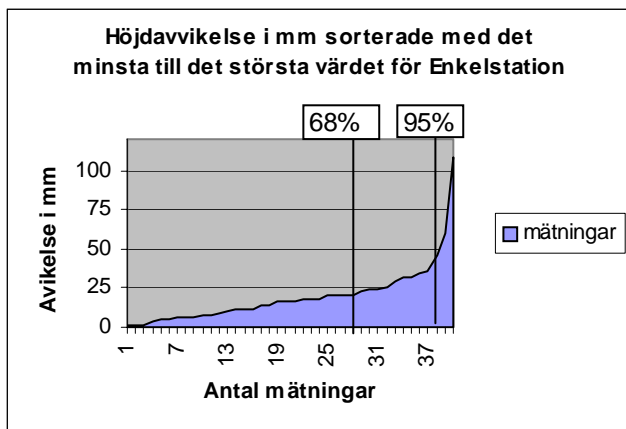
Punkt 1



Punkt 2

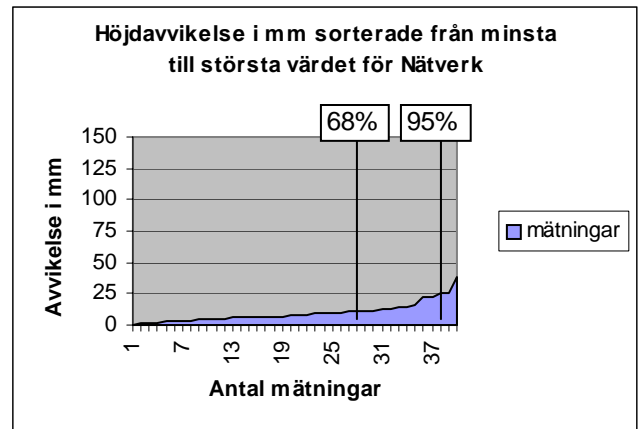
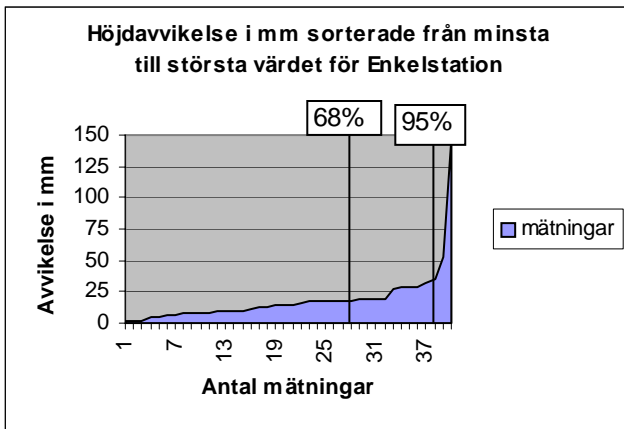


Punkt 3

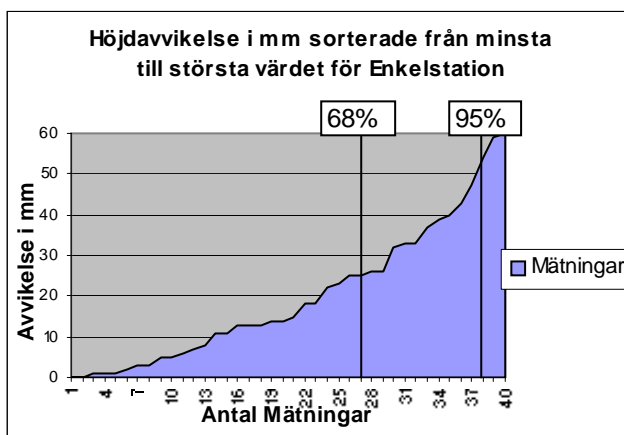


Trimble samtliga mätningar för punkt 4-6

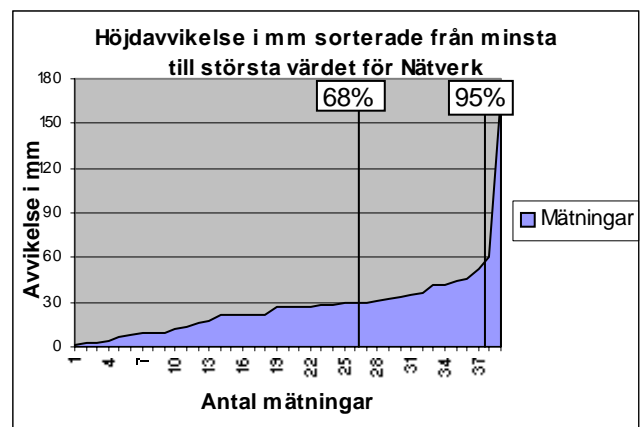
Punkt 4



Punkt 5

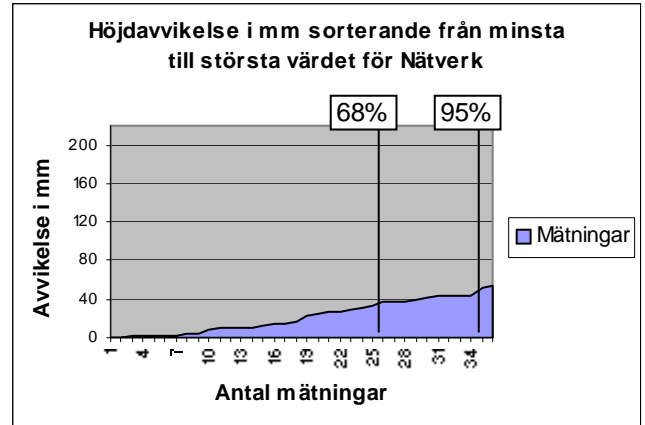
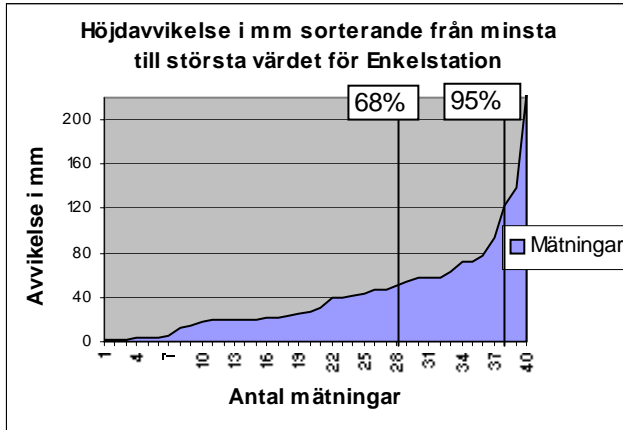


Punkt 6



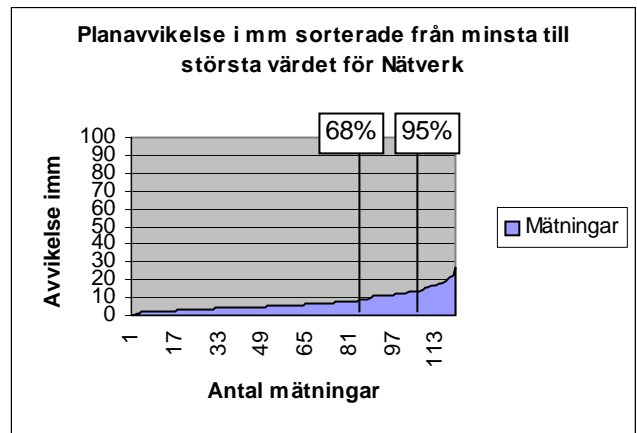
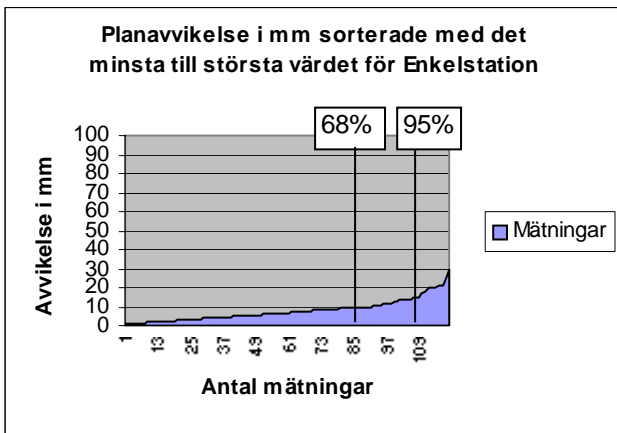
Trimble samtliga mätningar för punkt 7

Punkt 7

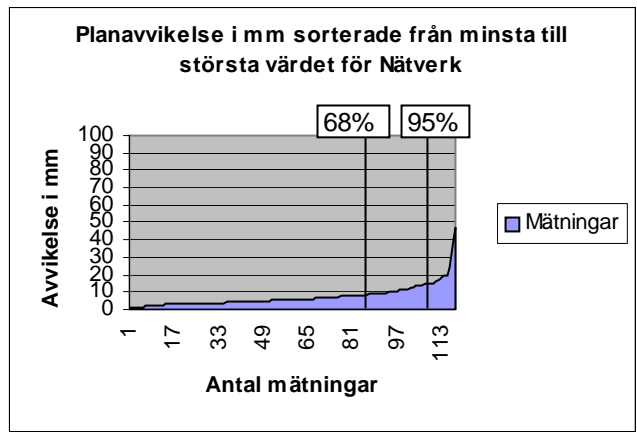
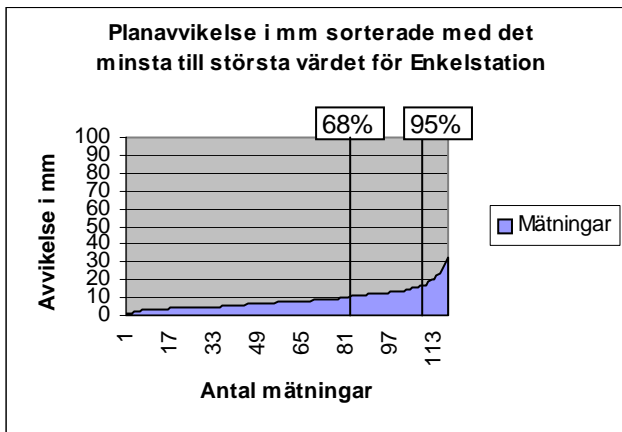


Samtliga mätningar punkt 1-3

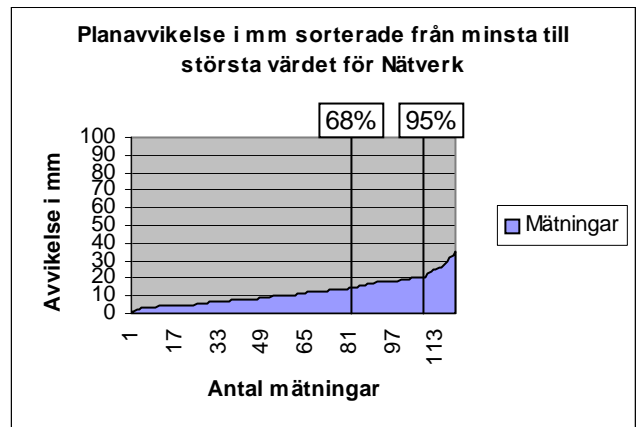
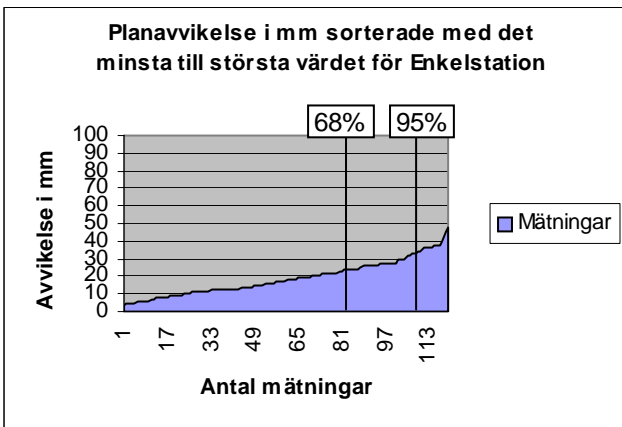
Punkt 1



Punkt 2

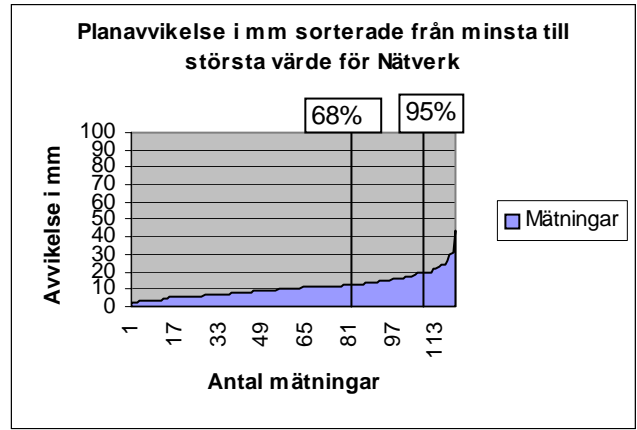
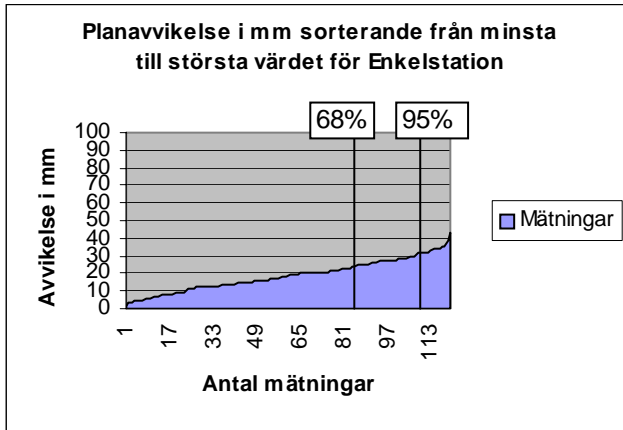


Punkt 3

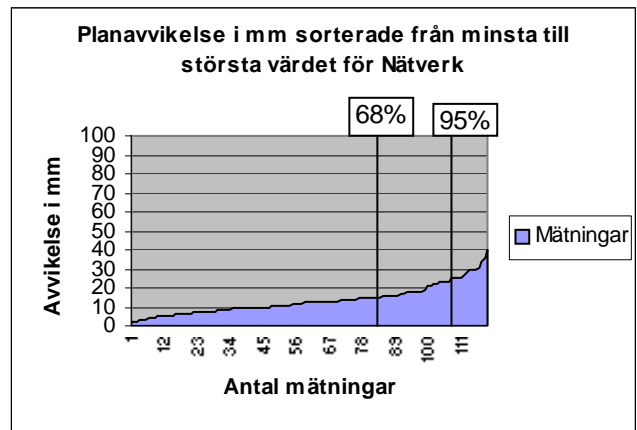
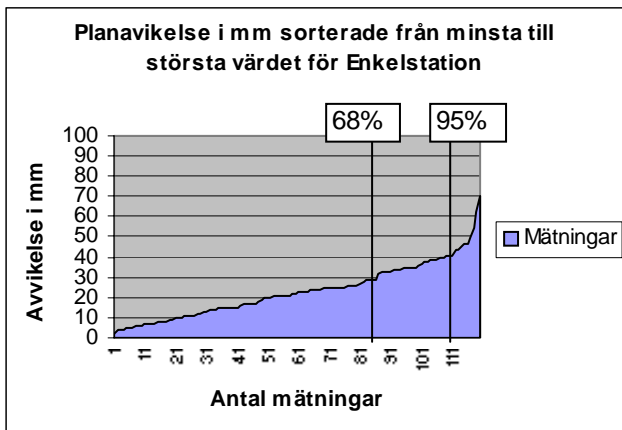


Samtliga mätningar punkt 4-6

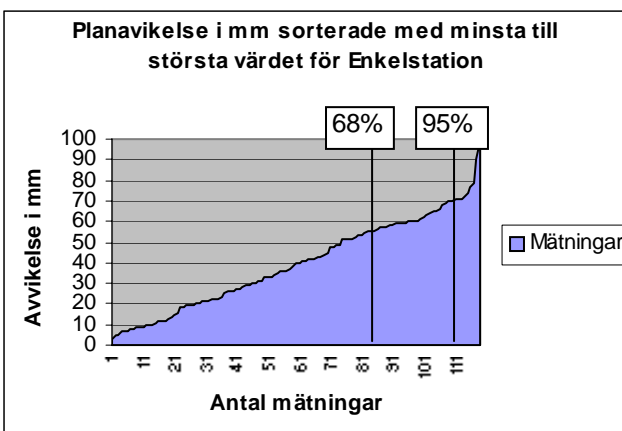
Punkt 4



Punkt 5

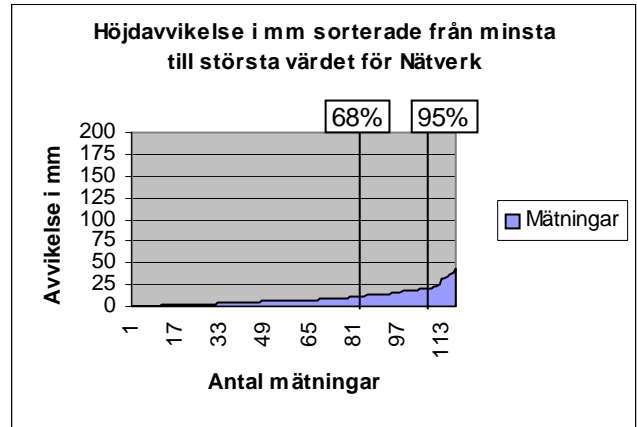
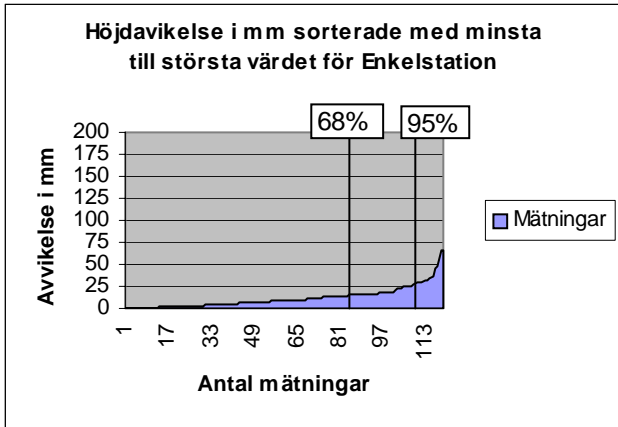


Punkt 6

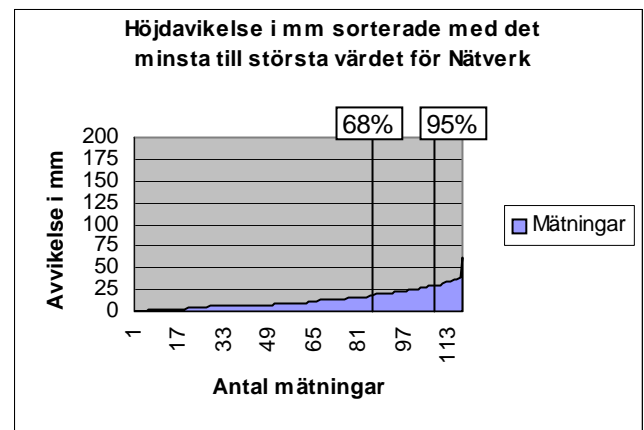
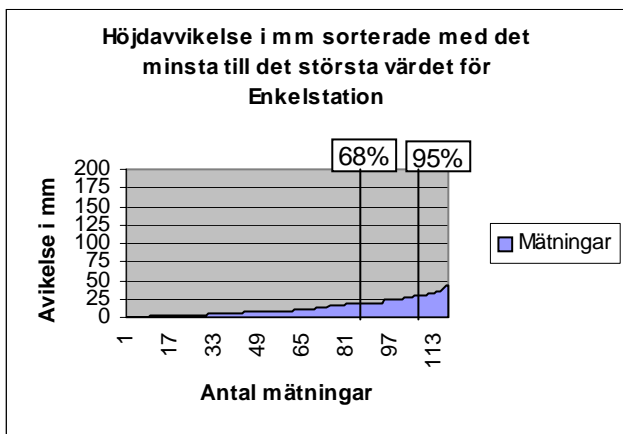


Samtliga mätningar punkt 1-3

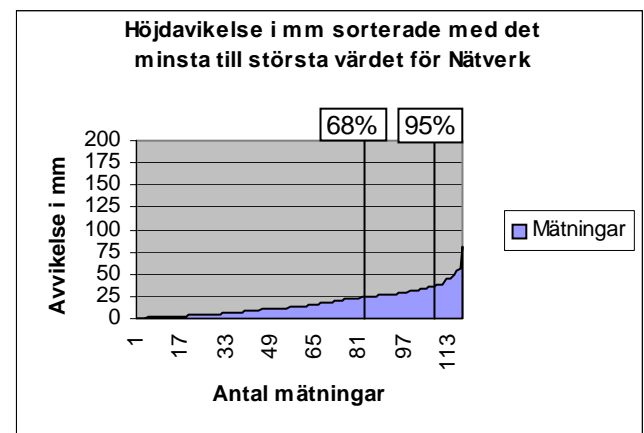
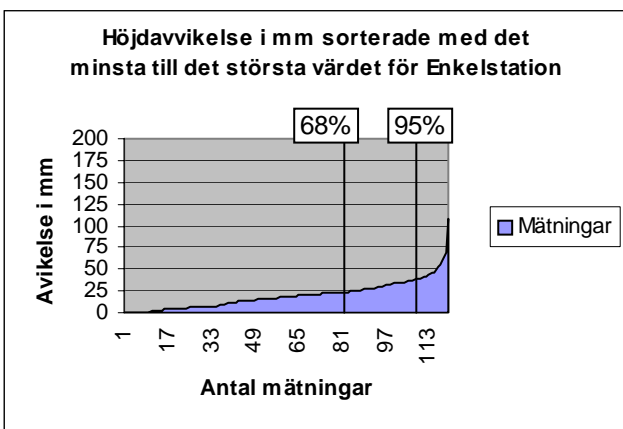
Punkt 1



Punkt 2

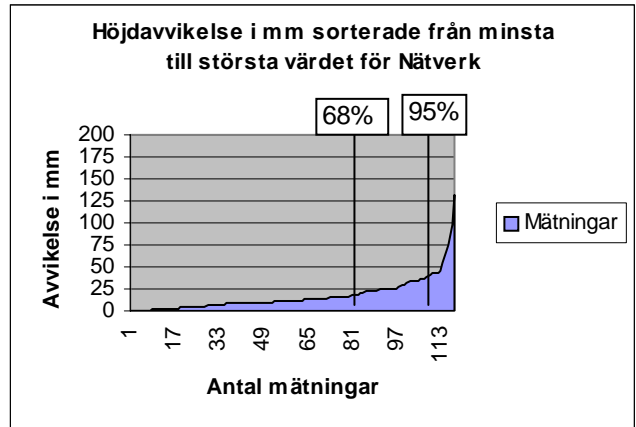
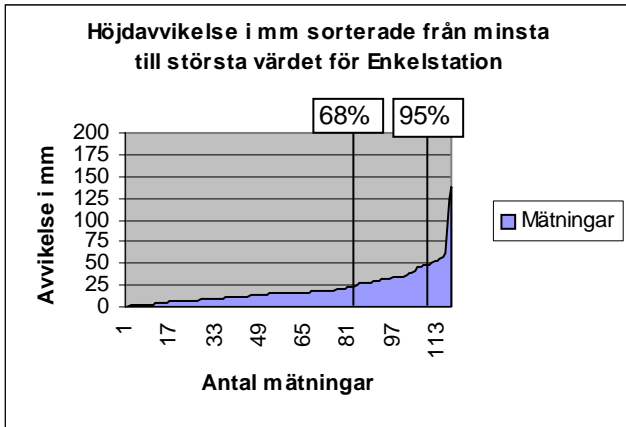


Punkt 3

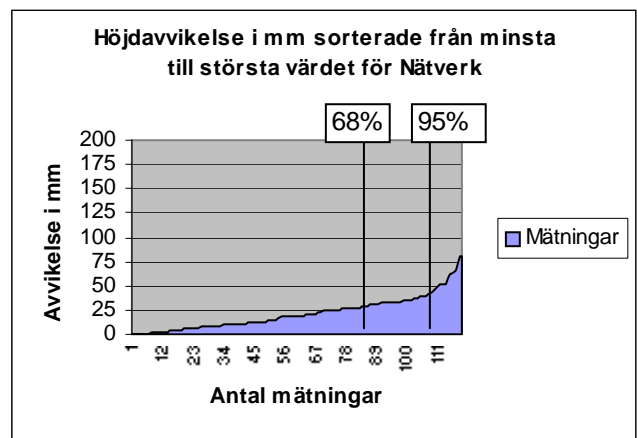
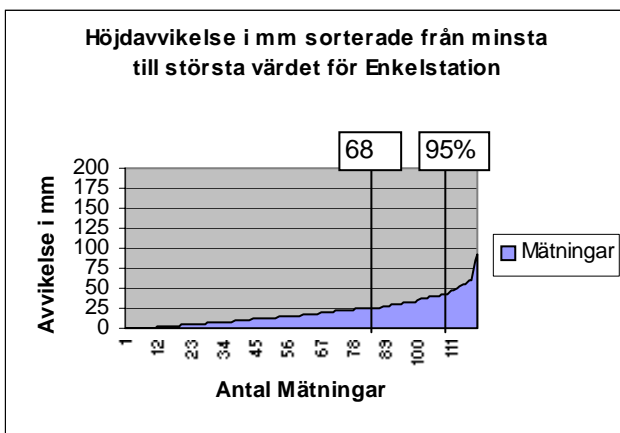


Samtliga mätningar punkt 4-6

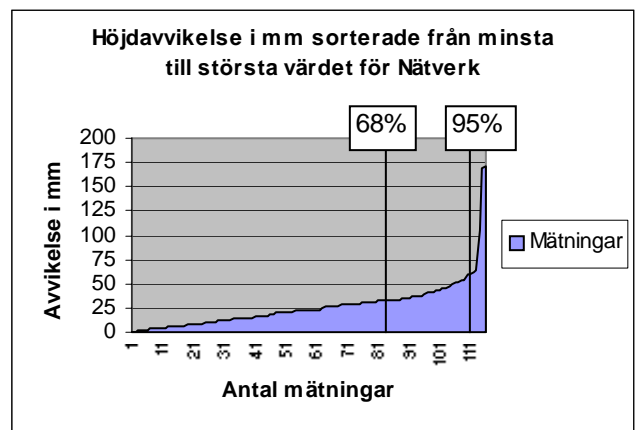
Punkt 4



Punkt 5

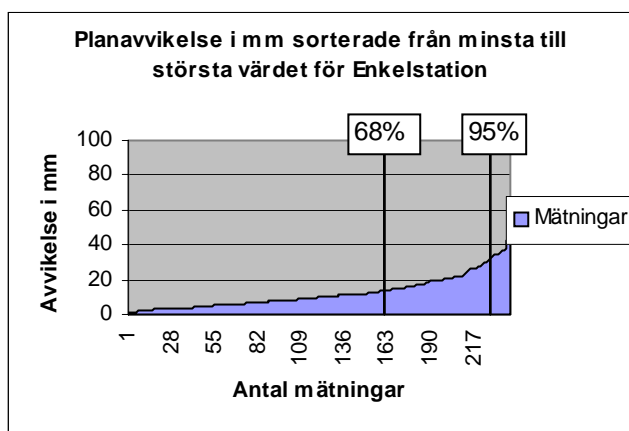


Punkt 6

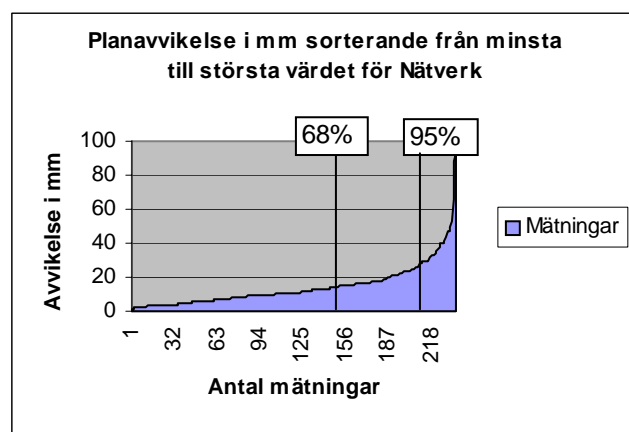
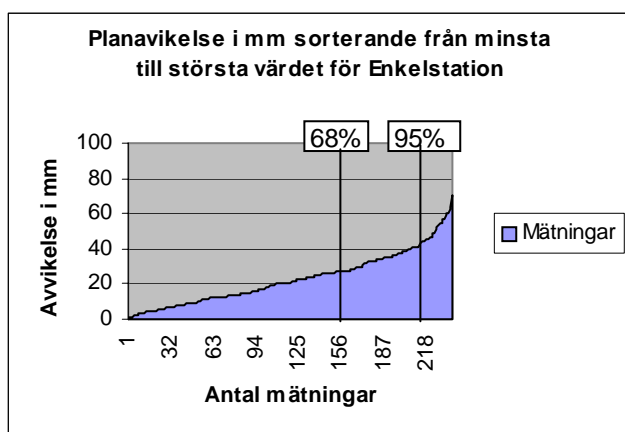


Samtliga mätningar för varje fabrikat

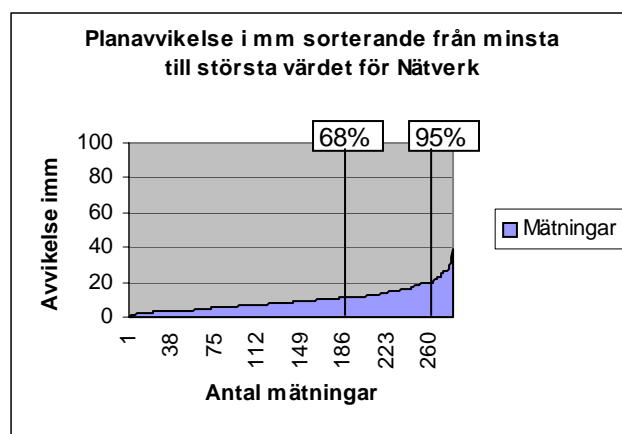
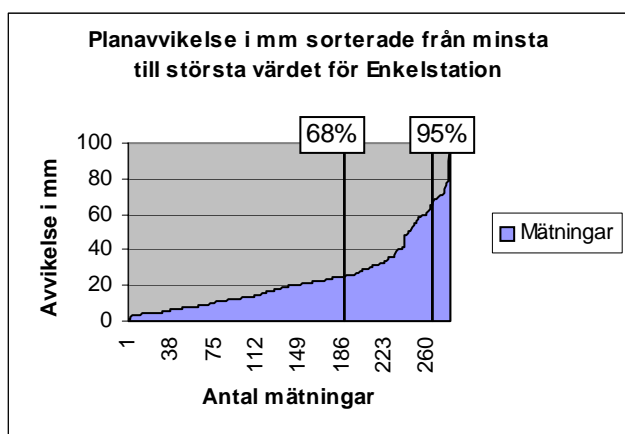
Leica



Topcon

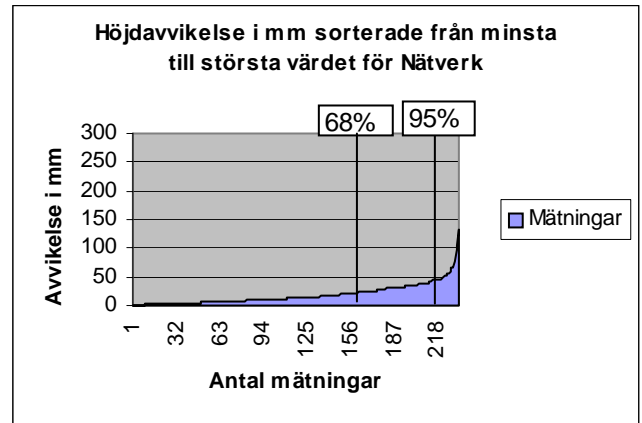


Trimble

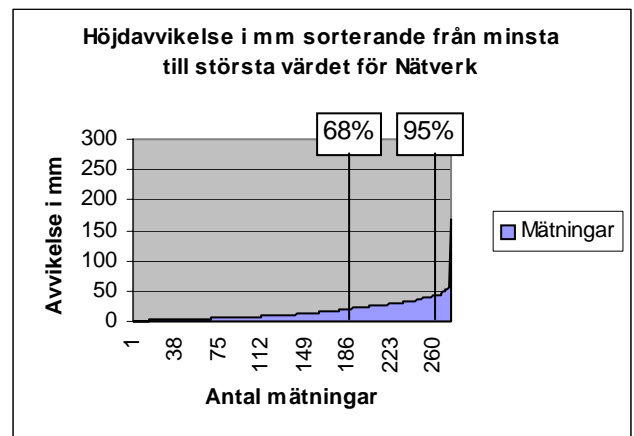
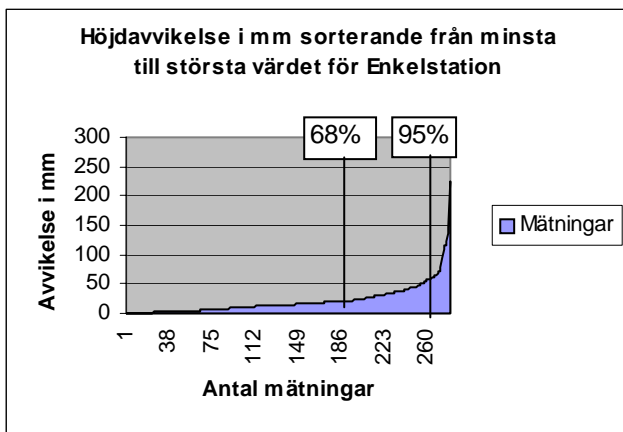


Samtliga mätningar för varje fabrikat

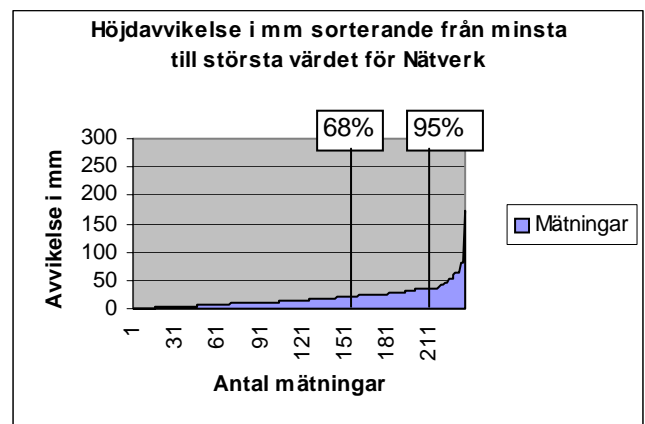
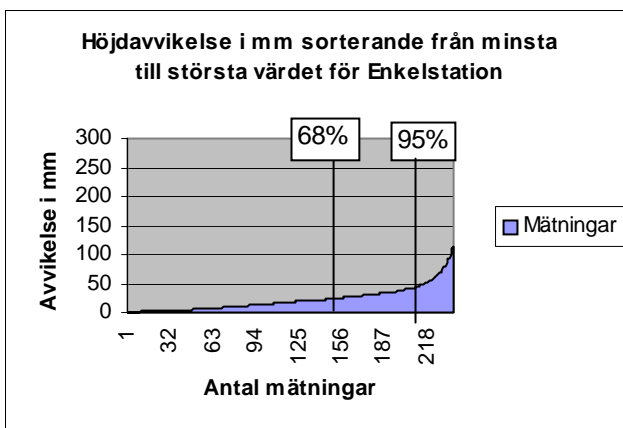
Leica



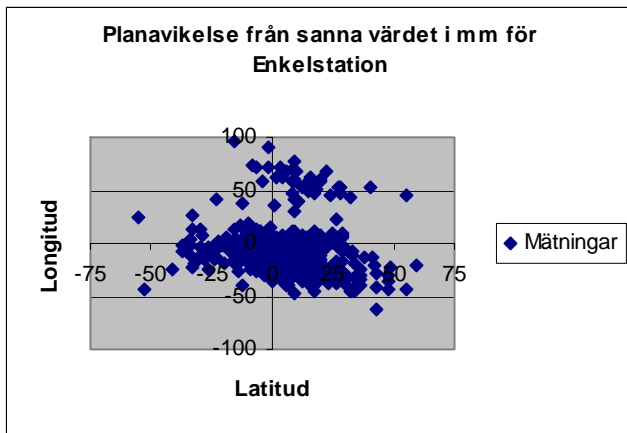
Topcon



Trimble



Alla mätningar för alla fabrikat

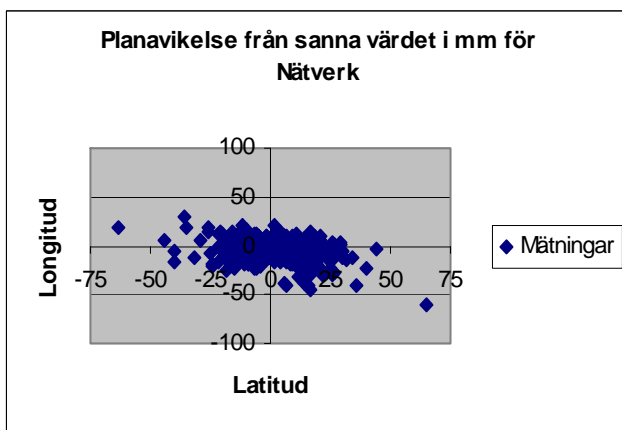


Samtliga mätningar

(mm)	Lat	Long
Precision	14	20
Noggrannhet	15	21
Medelavvik.	4	-6

Radiellt

Precision	24
Noggrannhet	26
Medelavvik.	7

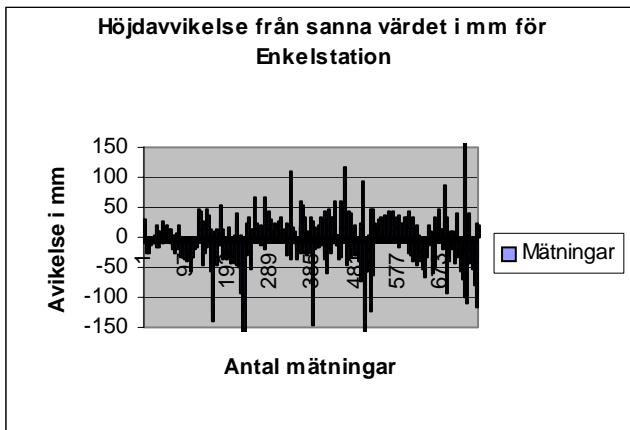


Samtliga mätningar

(mm)	Lat	Long
Precision	12	9
Noggrannhet	12	9
Medelavvik.	1	-3

Radiellt

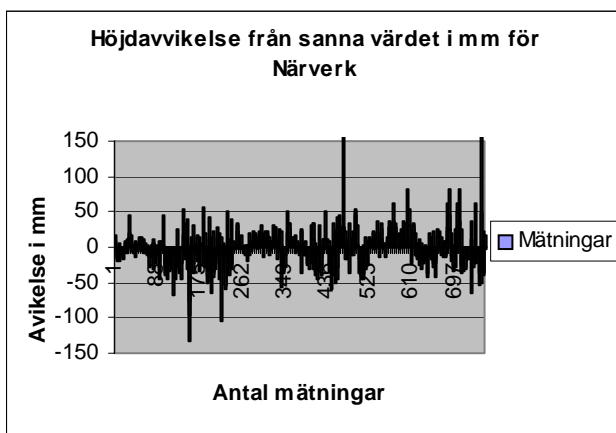
Precision	15
Noggrannhet	15
Medelavvik.	4



Samtliga mätningar

Höjd

Precision	30
Noggrannhet	30
Medelavvik.	-4



Samtliga mätningar

Höjd

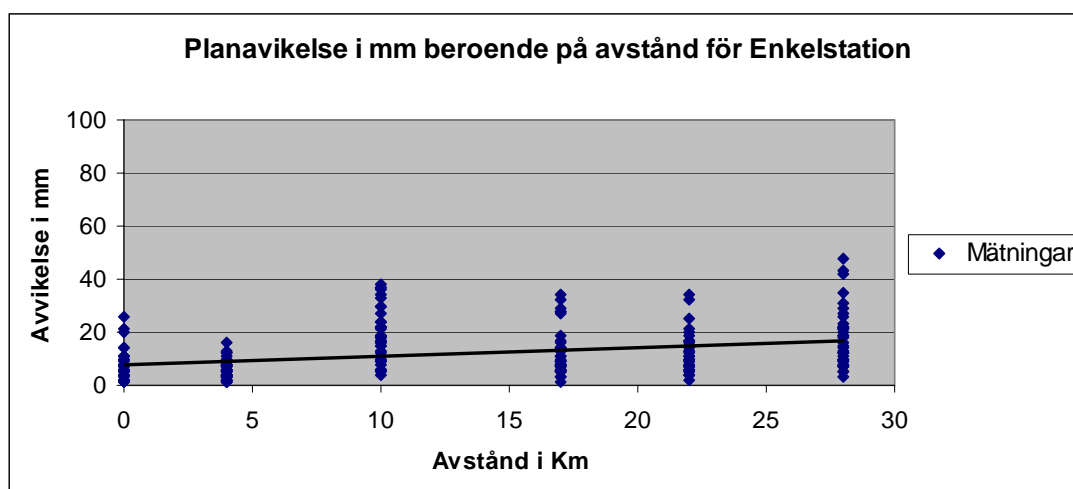
Precision	25
Noggrannhet	25
Medelavvik.	-1

Avståndsberoende i plan

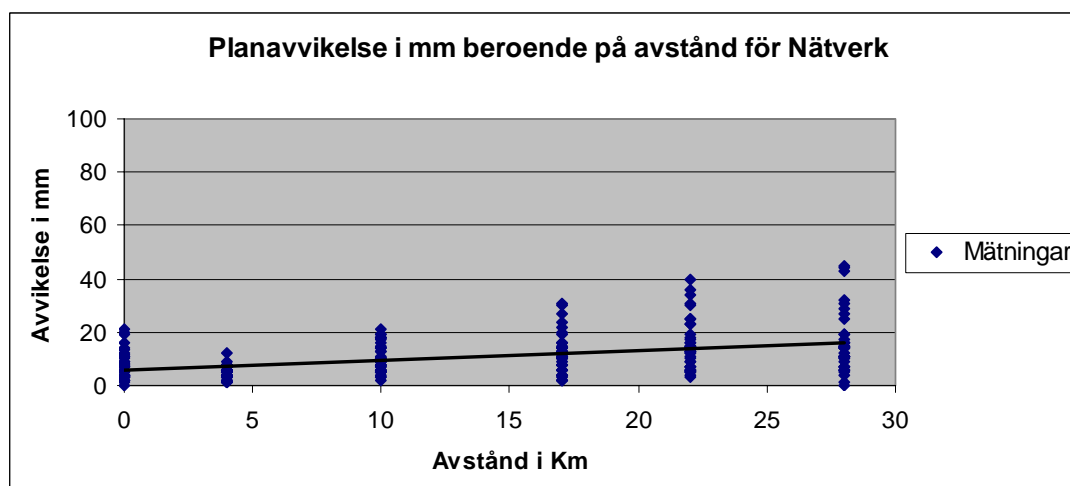
Leica

Tabellen visar avståndsberoendet för planavvikelsen vid respektive teknik

Plan	
Enkelstations-RTK	8 mm + 0,36 ppm
Nätverks-RTK	6 mm + 0,32 ppm



Figuren visar planavvikelsen för alla mätningar vid varje punkt, för enkelstations-RTK.

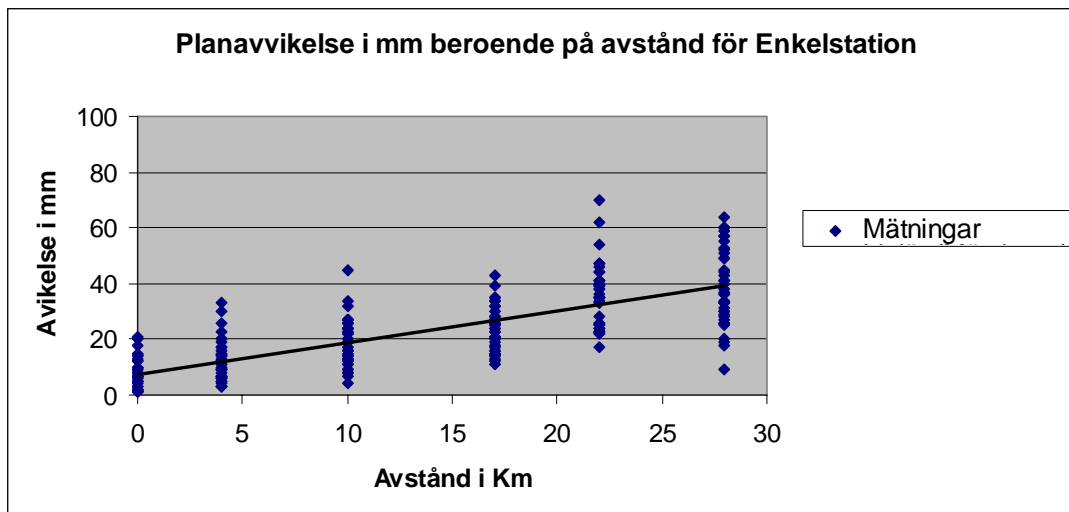


Figur visar planavvikelsen för alla mätningar vid varje punkt för nätverks-RTK

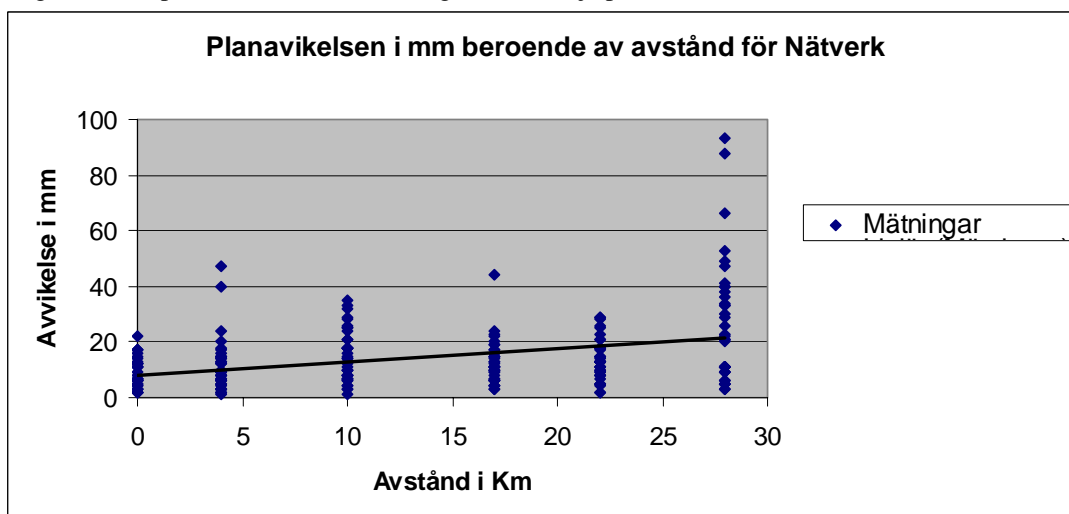
Topcon

Tabellen visar avståndsberoendet för planavvikelsen vid respektive teknik

Plan	
Enkelstations-RTK	7mm + 1,15 ppm
Nätverks-RTK	8mm + 0,47 ppm



Figuren visar planavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för enkelstations-RTK

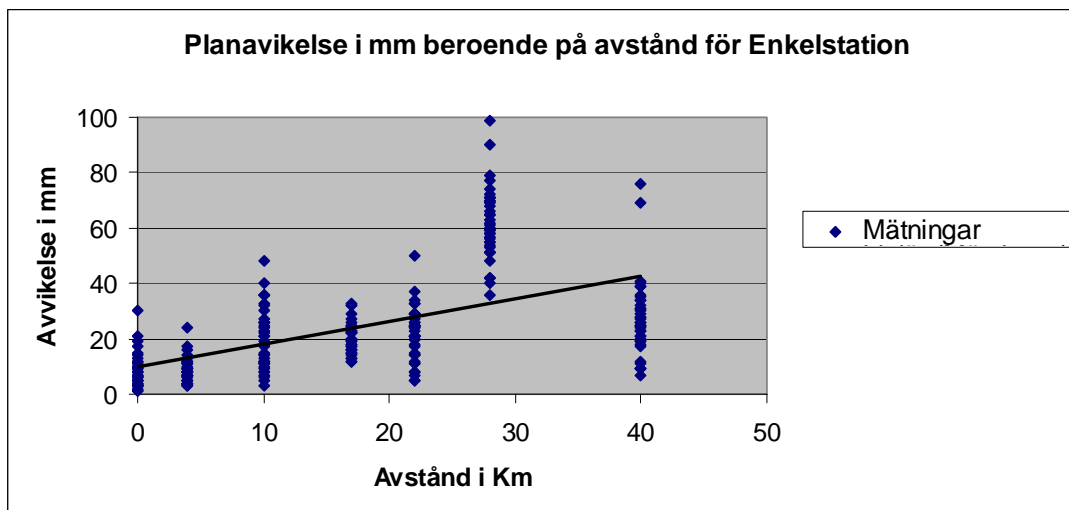


Figur visar planavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

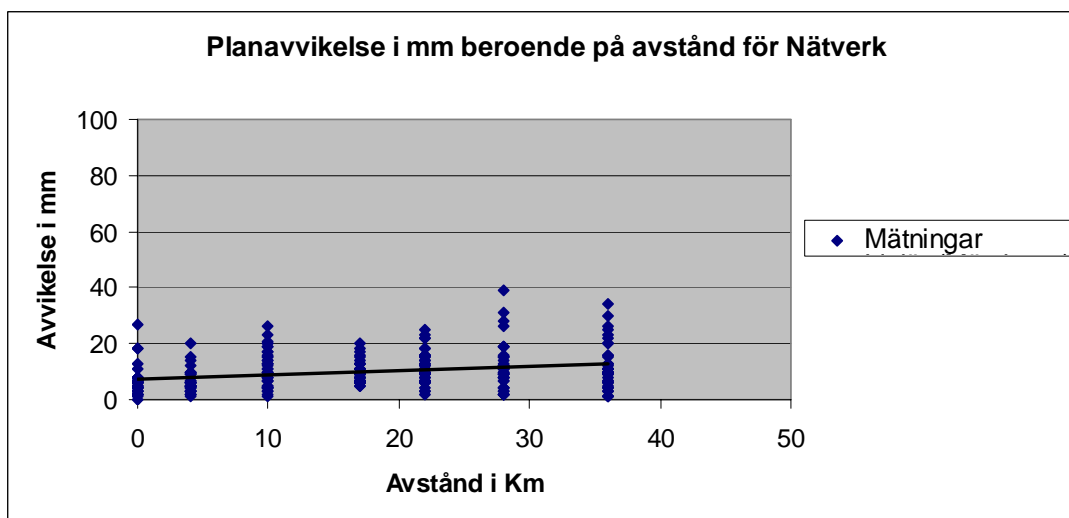
Trimble

Tabellen visar avståndsberoendet för planavvikelsen vid respektive teknik

Plan	
Enkelstations-RTK	10 mm + 0,83 ppm
Nätverks-RTK	7 mm + 0,16 ppm



Figur visar planavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för enkelstations-RTK



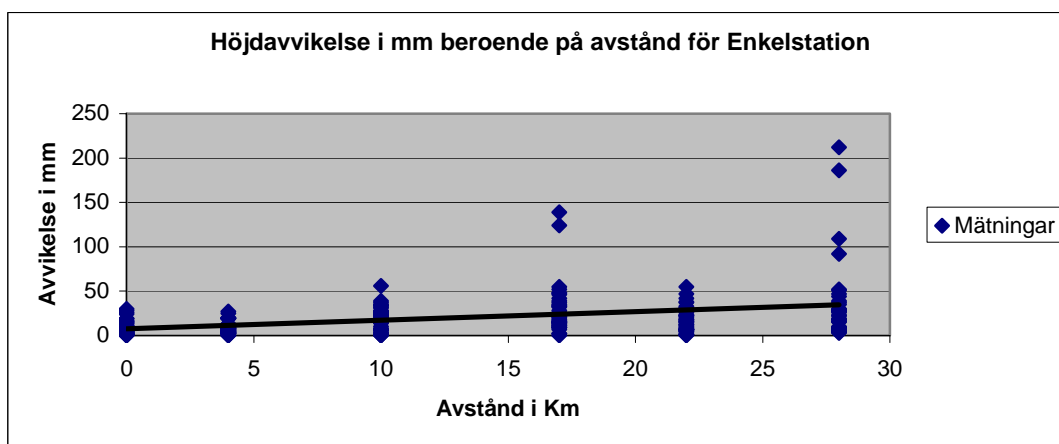
Figur visar planavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

Avståndsberoende i höjd

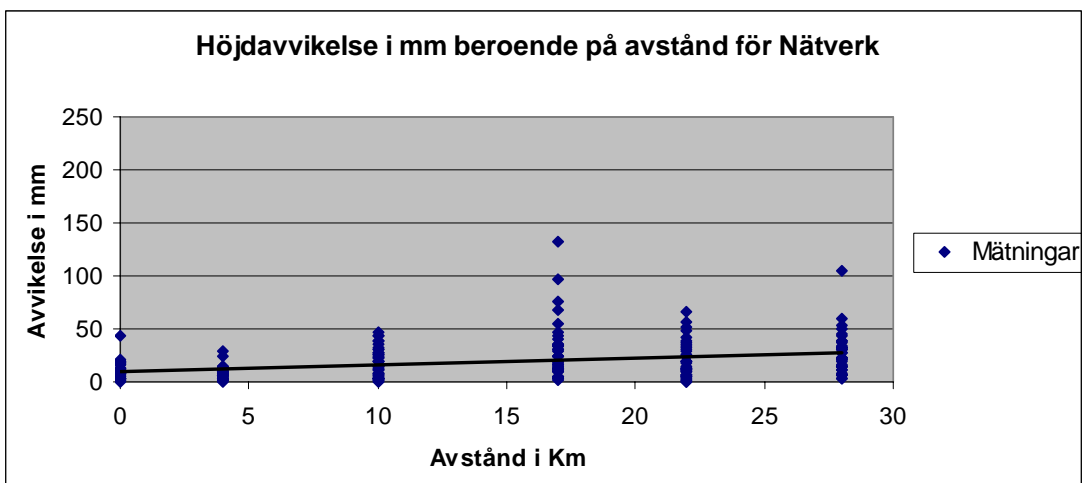
Leica

Tabellen visar avståndsberoendet för höjdavvikelsen vid respektive teknik

Plan	
Enkelstations-RTK	9 mm + 0,71 ppm
Nätverks-RTK	10 mm + 0,66 ppm



Figur visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för enkelstations-RTK

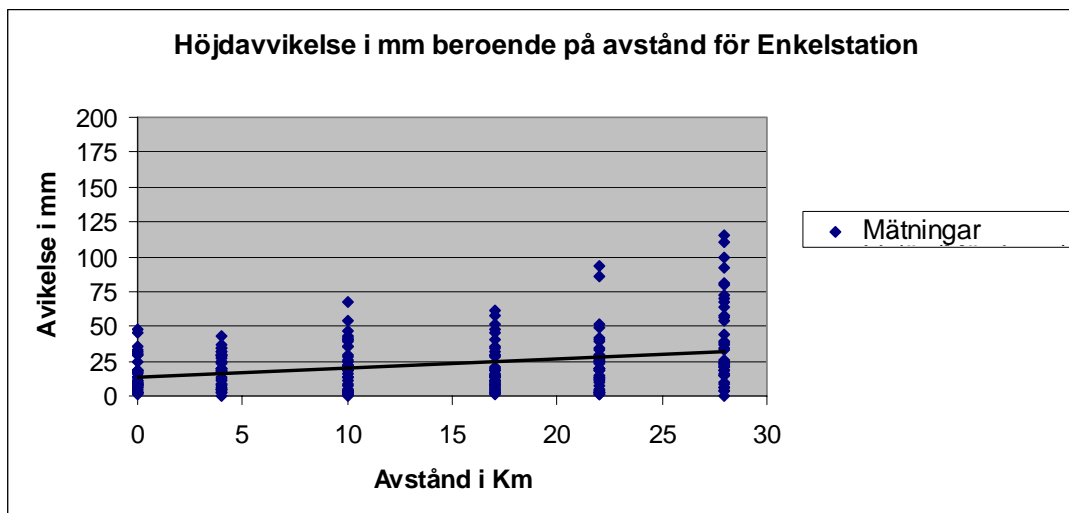


Figur 7.8.3.1.2 Visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

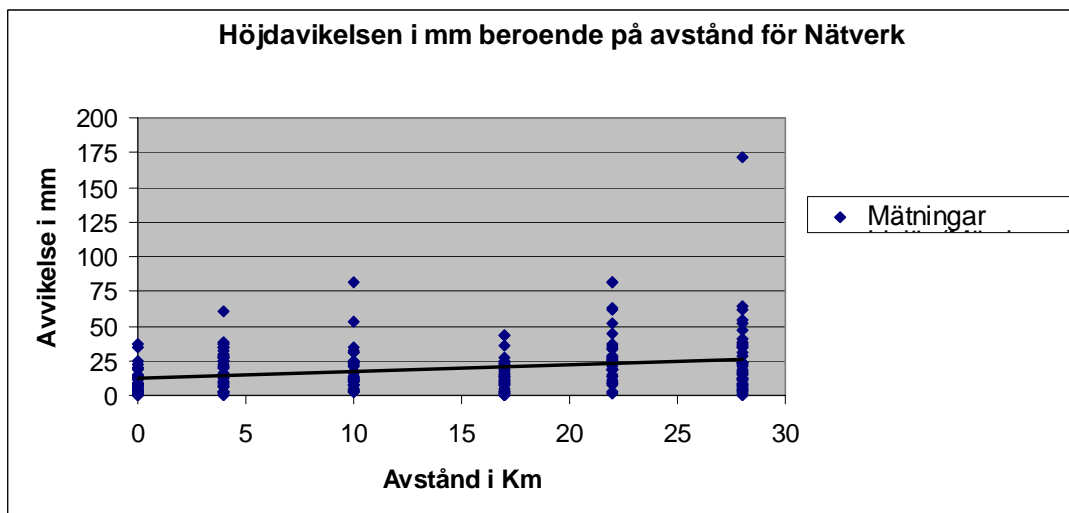
Topcon

Tabellen visar avståndsberoendet för höjdavvikelsen

Plan	
Enkelstations-RTK	14 mm + 0,67 ppm
Nätverks-RTK	12 mm + 0,49 ppm



Figur visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för enkelstations-RTK.

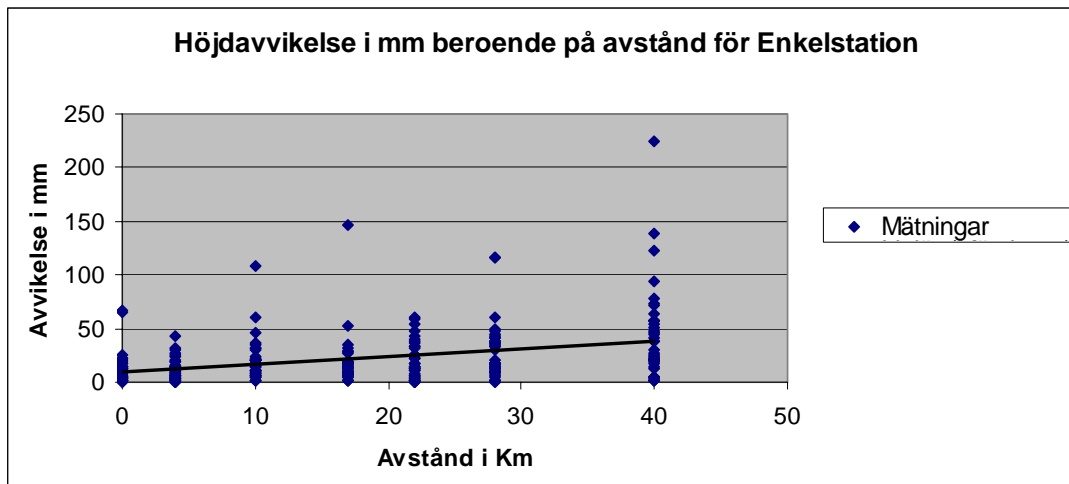


Figur visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

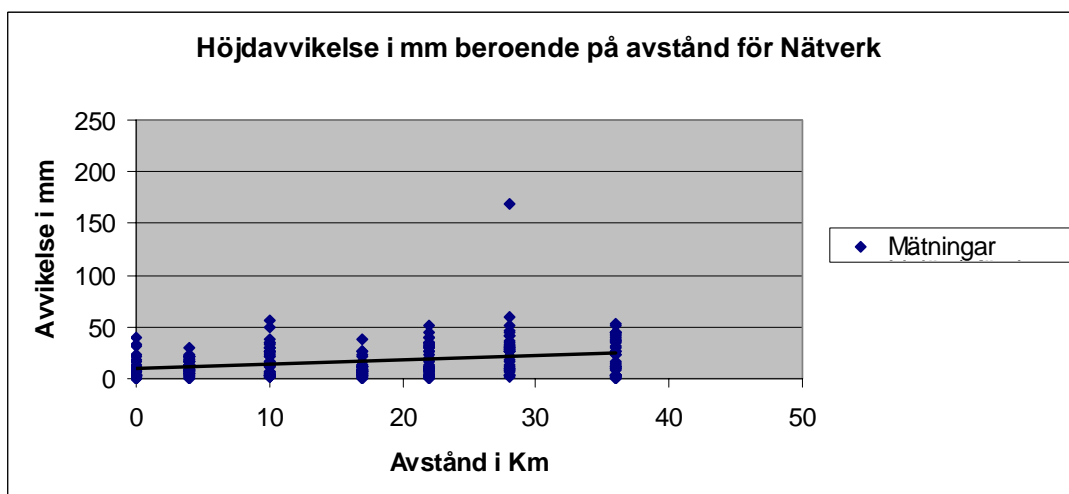
Trimble

Tabellen visar avståndsberoendet för höjdavvikelsen

Plan	
Enkelstations-RTK	10 mm + 0,63 ppm
Nätverks-RTK	9 mm + 0,43 ppm



Figur visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för enkelstations-RTK



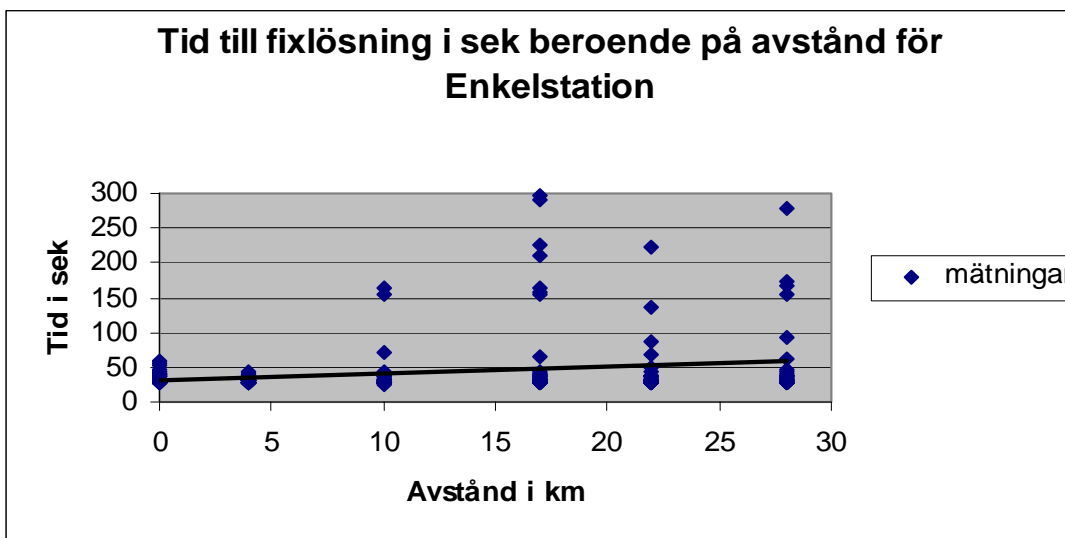
Figur visar höjdavvikelsen för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

Avståndsberoende för initialiseringstiden

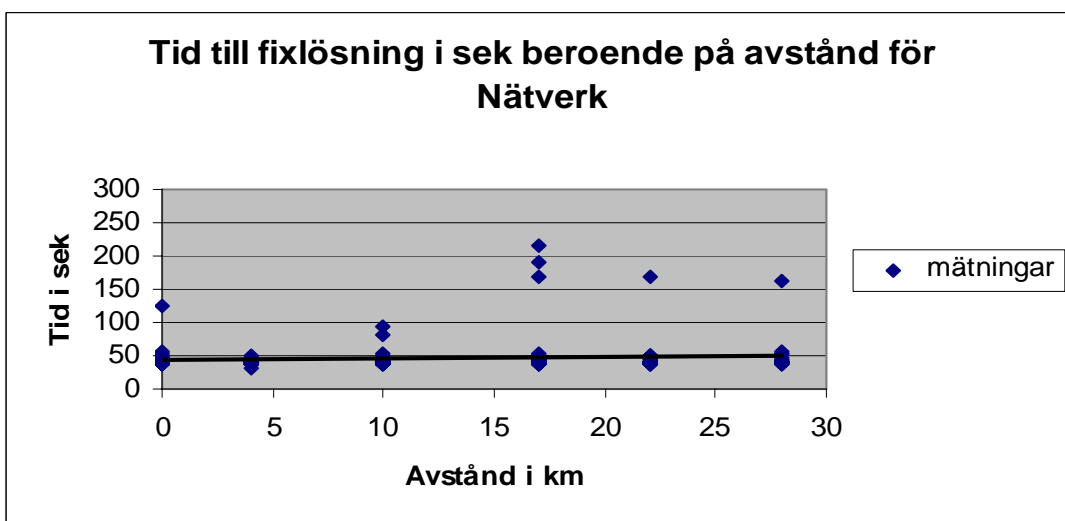
Leica

Tabellen visar avståndsberoendet för tiden till initialisering

Initialisering	
Enkelstations-RTK	32 sekunder + 0,91 * antal kilometer
Nätverks-RTK	43 sekunder + 0,19 * antal kilometer



Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för enkelstnätningarna.

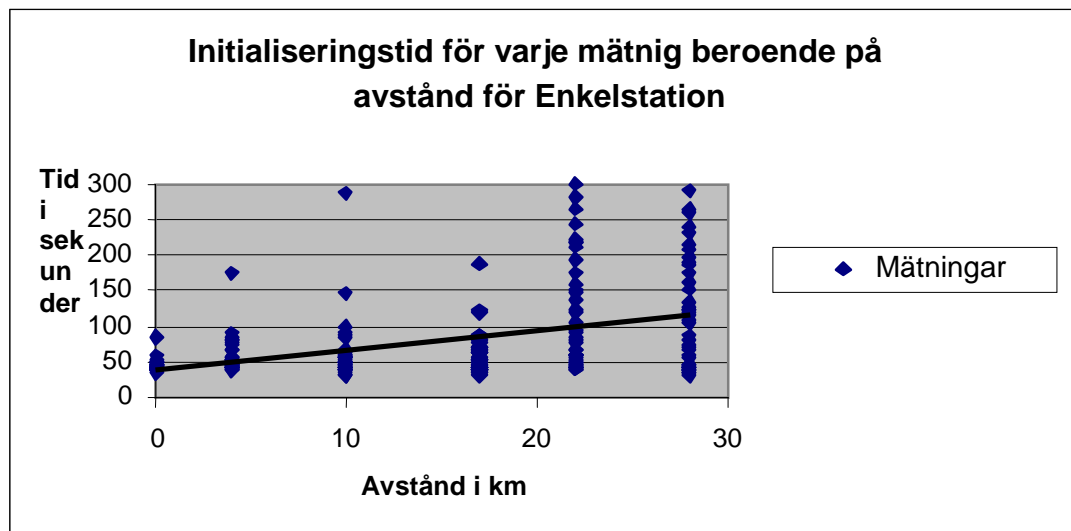


Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

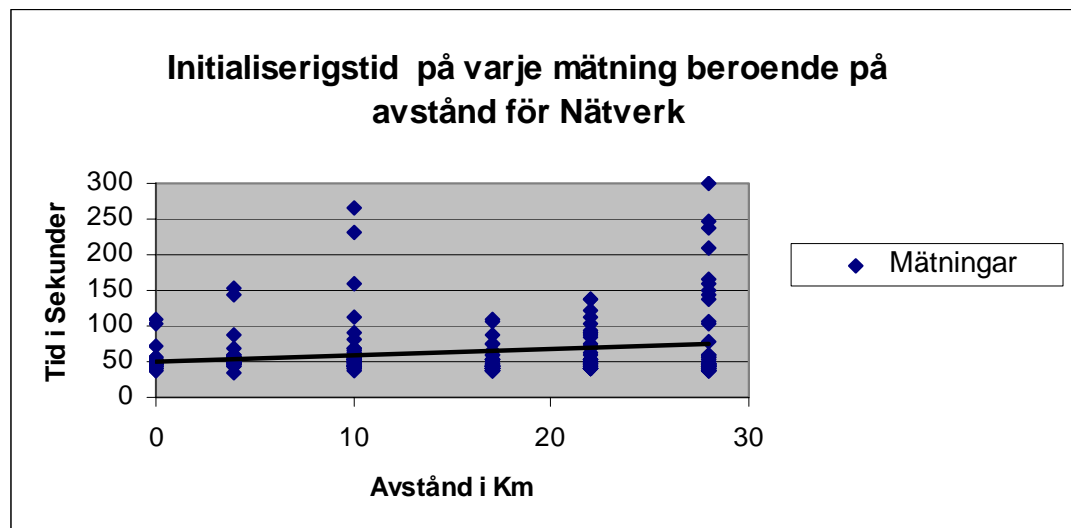
Topcon

Tabellen visar avståndsberoendet för tiden till initialisering

Initialiseringstid	
Enkelstations-RTK	40 sekunder + 2,67 * antal kilometer
Nätverks-RTK	51 sekunder + 0,80 * antal kilometer



Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för enkelstnmätningarna.

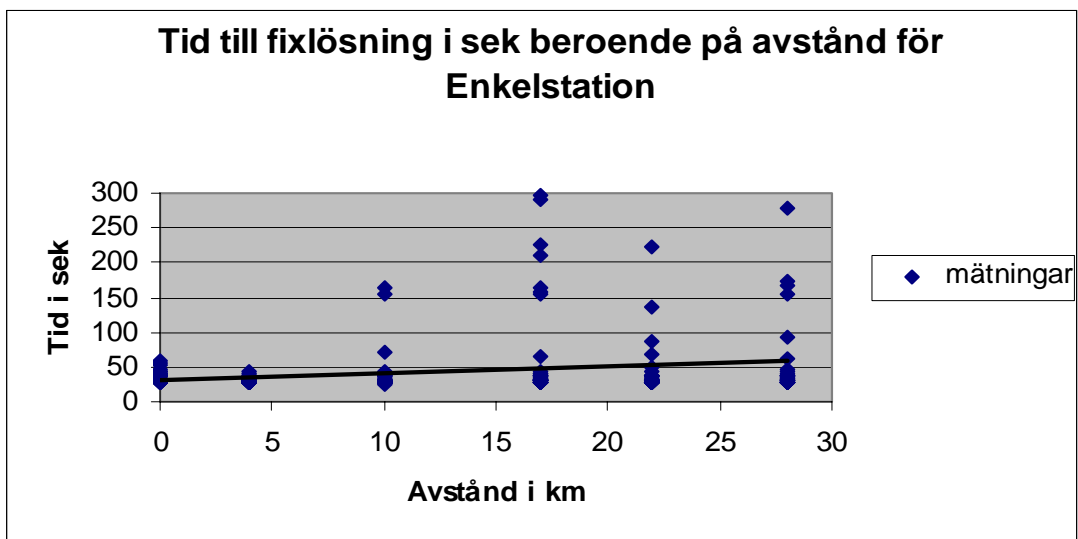


Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för nätverks-RTK

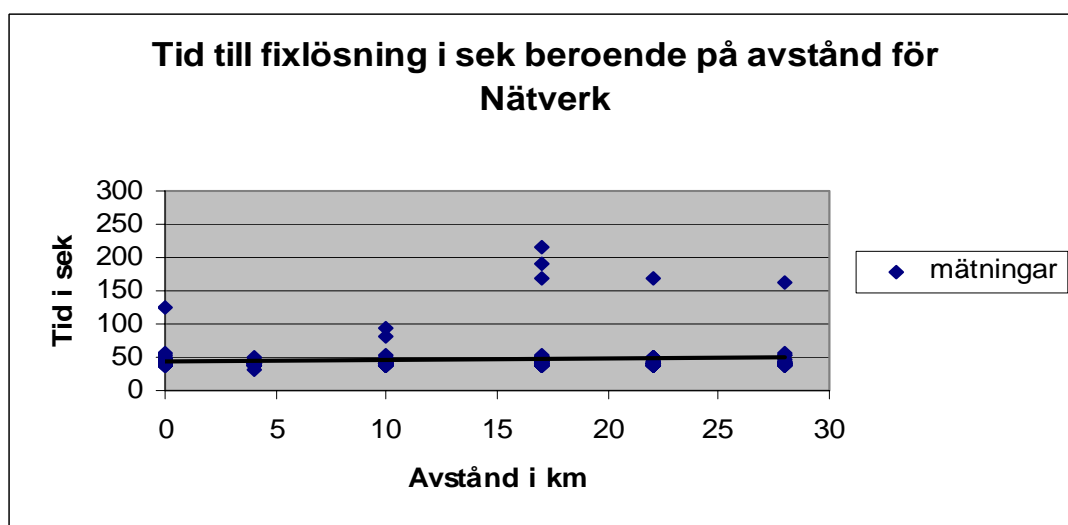
Trimble

Tabellen visar avståndsberoendet för tiden till initialisering

Initialiseringstid	
Enkelstations-RTK	68 sekunder + 3,45 * antal kilometer
Nätverks-RTK	83 sekunder + 0,67 * antal kilometer



Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för enkelstn-mätningarna.



Figur visar initialiseringstiderna för mätningarna vid varje punkt för Nätverks-RTK

Bilaga II

Begreppet regression.....	125
Formler som nyttjats vid regressionsanalysen.....	125
Formler och teorier som nyttjats vid utvärderingen av regressionsanalysen.....	126

Regressionsanalys

En stokastisk variabel, X , består av en serie värden (x_1, \dots, x_n) . Varje sådant värde blir en punkt i ett koordinatsystem, där ena storheten motsvaras av x-axeln och den andra storheten av y-axeln. Med hjälp av en regressionsanalys kan man få en uppfattning av vilket samband som råder mellan de studerade storheterna (variablerna) som den stokastiska variabeln påverkas av.

Vi har valt att använda oss utav en enkel linjär regression. I ett spridningsdiagram (se figur nedan) approximeras punktsvärmen med den räta linjens ekvation $y = a + bx$, vilket är ett matematiskt uttryck för att beskriva tendensen i materialet. Vid regressionsanalysen anpassas den räta linjen, regressionslinjen, till punktsvärmen med hjälp av minsta kvadratmetoden (MK). MK innebär i korthet följande: Man bestämmer linjens ekvation så att summan av kvadraterna på alla avvikelser (mätta lodrätt) från de observerade värdena (y_i) till motsvarande värden på den tänkta linjen (y_i^*) blir så liten som möjligt. Matematiskt innebär detta, att konstanterna a och b i linjens ekvation

$$y_i^* = a + bx_i$$

skall bestämmas så att uttrycket

$$\sum (y_i - y_i^*)^2 = \sum [y_i - (a + bx_i)]^2$$

blir så litet som möjligt.

Konstanterna a och b i den räta linjens ekvation

$$y = a + bx$$

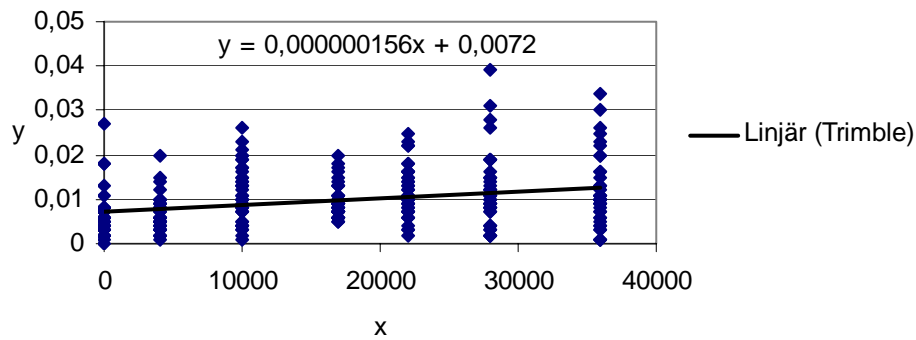
kan bestämmas med följande uttryck:

$$a = y_m - bx_m$$

där y_m och x_m är medelvärdena för de båda variablerna och

$$b = \frac{\sum (x - x_m)(y - y_m)}{\sum (x - x_m)^2} = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}$$

a anger var regressionsaxeln skär y-axeln. b är linjens riktningskoefficient. Den anger med hur många enheter y ändras när x ökar med en enhet.



Figur. Ett exempel på enkel linjär regression

Residualspridningen, s , mäter spridningen kring regressionslinjen och är ett mått på styrkan i det linjära sambandet:

$$s = \sqrt{\frac{(y - y^*)^2}{n - 2}}$$

Standardfelet för lutningen b och interceptet a på regressionslinjen är:

$$s_b = \frac{s}{\sum (x_i - x_m)^2}$$

$$s_a = s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{x_m^2}{\sum (x_i - x_m)^2}}$$

Intervallskattning innebär, att ett konfidensintervall för b och a skattas. Ett konfidensintervall för den skattade lutningen och interceptet beräknas enligt:

$$b \pm t^* s_b$$

$$a \pm t^* s_a$$

där uttrycket t^* är ett kritiskt värde för $t(n-2)$ -fördelningen.

För att testa hypotesen $H_0 : \beta = 0$ samt $H_1 : \beta \neq 0$ beräknas signifikansen enligt (β är en beteckning på populationens lutningskoefficient):

$$t = \frac{b}{s_b}$$

(Moore D S, Mccabe G P, 1993)

Bilaga III

Lantmäteriet har själva utfört testmätningar med mottagarfabrikatet Ashtech. Dessa mätningar är utförda av Christina Norrström, som även sammanställt PM:et ”Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK med mottagarfabrikatet Ashtech” om detta. Detta PM bifogas i sin helhet i denna bilaga på sidorna 131-144.

Jämförelse av enkelstations-RTK och nätverks-RTK med mottagarfabrikatet Ashtech

Christina Norrström

Genomförande

GPS-utrustning:

Mottagare, Ashtech Z-Extreme Fw ver. ZC00

Antenn, Ashtech Geodetic IV Antenna

Handdator, Psion workabout med mjukvaran Geodos ver. 11.73.09 från Viker Data

GSM-modem, Siemens

Testmätningarna utfördes på 7 olika punkter inom nätverks-RTK-triangeln bestående av SWEPOS-stationerna Söderboda - Östervåla - Gävle. Avståndet från punkterna till närmaste referensstation varierade från 0 till 36 kilometer. Vid enkelstations-RTK-mätningarna användes SWEPOS-stationen Gävle som referensstation. På varje punkt utfördes totalt 6 mätserier på 10 mätningar vardera. 3 mätserier utnyttjade nätverks-RTK-tekniken och 3 mätserier enkelstations-RTK-tekniken. Varje punkt besöktes vid 3 olika tillfällen, vid varje besök mättes 1 mätserie med respektive teknik.

Resultat

Vid nätverks-RTK-mätningarna erhöles 3 stycken outliers, dessa har ej tagits med i beräkningarna. Från punkt 7, som ligger i Skärplinge ca 40 kilometer från SWEPOS-stationen Gävle, gick det ej att få någon fixlösning vid mätning med enkelstations-RTK. Vidare har en av de 3 mätserierna utförda på punkt 7 med nätverks-RTK uteslutits från beräkningarna, då SWEPOS-stationen Söderboda var nere då, och resultatet är därför ej jämförbart. Totalt erhöles 377 mätningar, 180 stycken med enkelstations-RTK och 197 stycken med nätverks-RTK.

Från resultatet av testmätningarna kan man se att noggrannheten i både plan och höjd med nätverks-RTK-tekniken är bättre, i plan avsevärt mycket bättre!

Enkelstations-RTK

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	23	32
Precision	19	30
Medeldifferens	13	-11
Största avvikelse	58	86
95 %	45	67
68 %	25	29

Nätverks-RTK

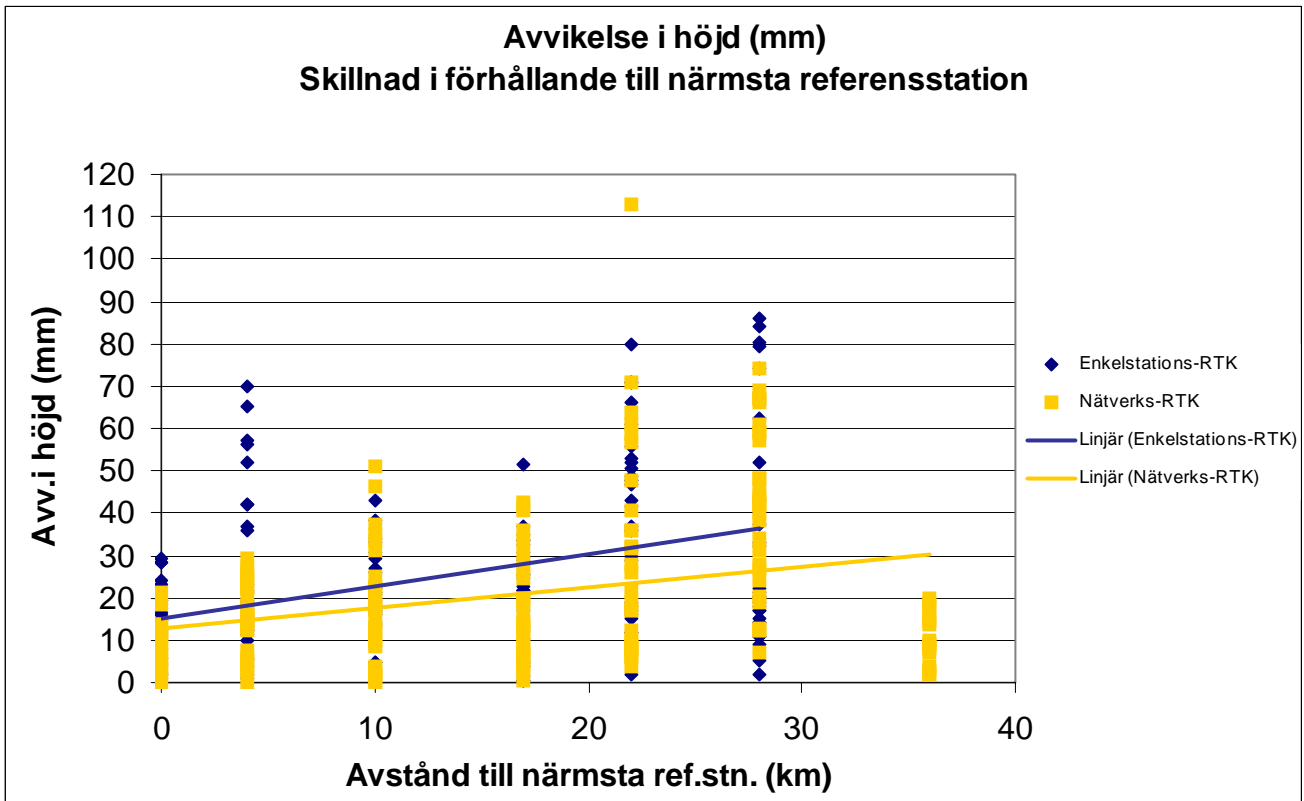
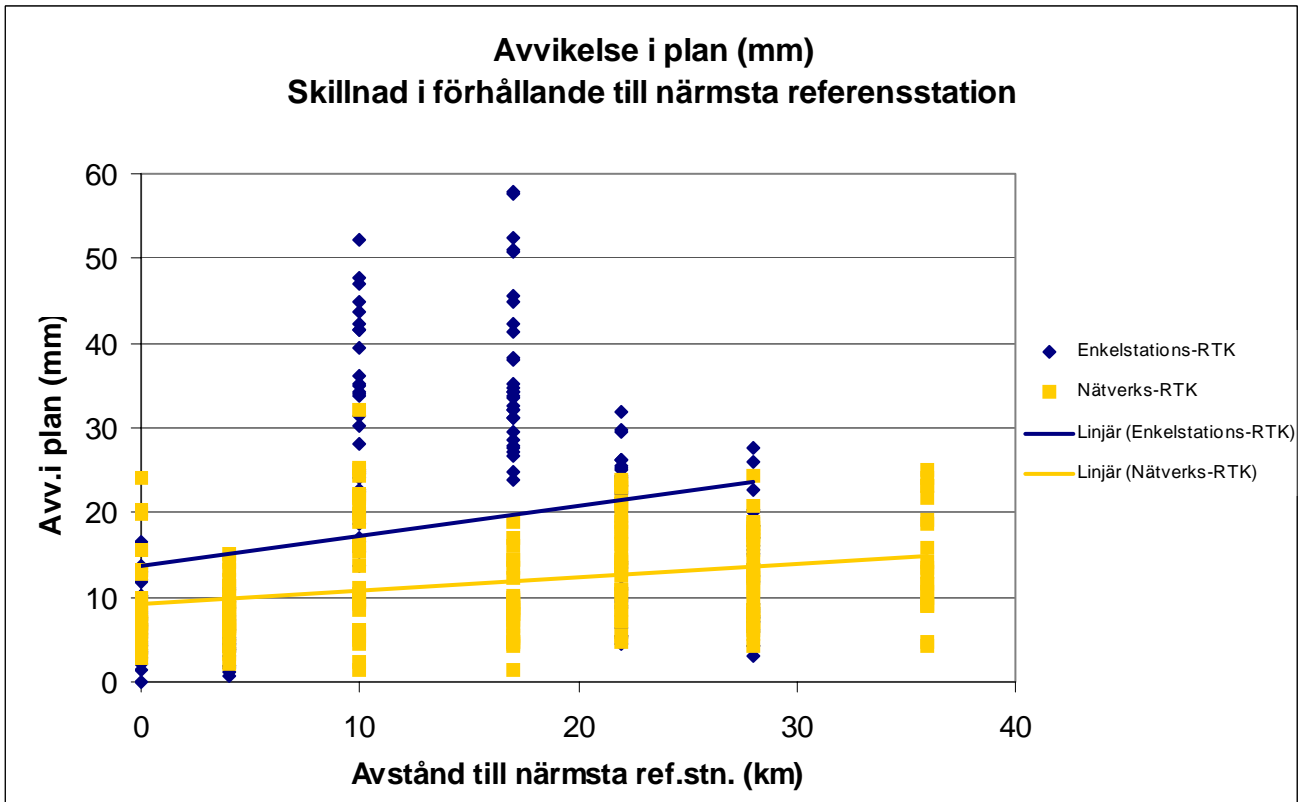
(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	13	27
Precision	13	26
Medeldifferens	2	-8
Största avvikelse	32	113
95 %	23	59
68 %	14	22

Slutsatser avståndsberoende

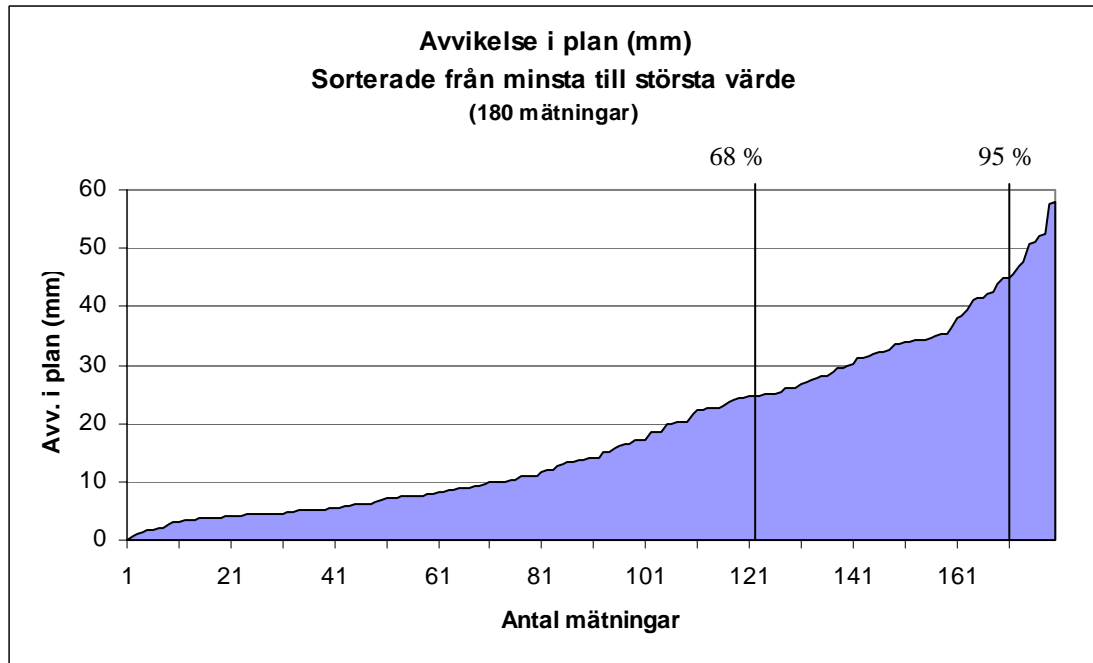
<i>Plan</i>	
Enkelstations-RTK	14 mm + 0,36 ppm
Nätverks-RTK	9 mm + 0,16 ppm
<i>Höjd</i>	
Enkelstations-RTK	15 mm + 0,76 ppm
Nätverks-RTK	12 mm + 0,49 ppm
<i>Initialiseringstid</i>	
Enkelstations-RTK	56 s + 0,14 x antal km
Nätverks-RTK	57 s + 0,04 x antal km

Outliers för nätverks-RTK

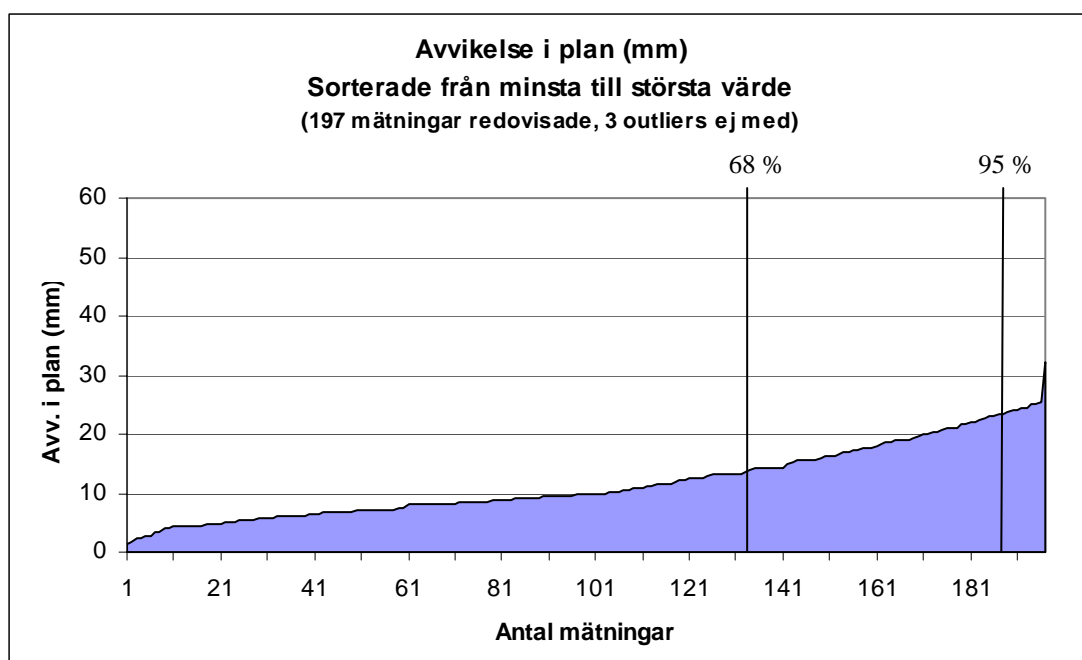
Punkt	5	5	6
Planfel	3099 mm	2372 mm	2744 mm
Höjdfel	5590 mm	278 mm	-4446 mm
Init.tid	57 s	57 s	65 s
PDOP	2,6	2,6	2,0
Kvalitetstal	3 mm	6 mm	9 mm



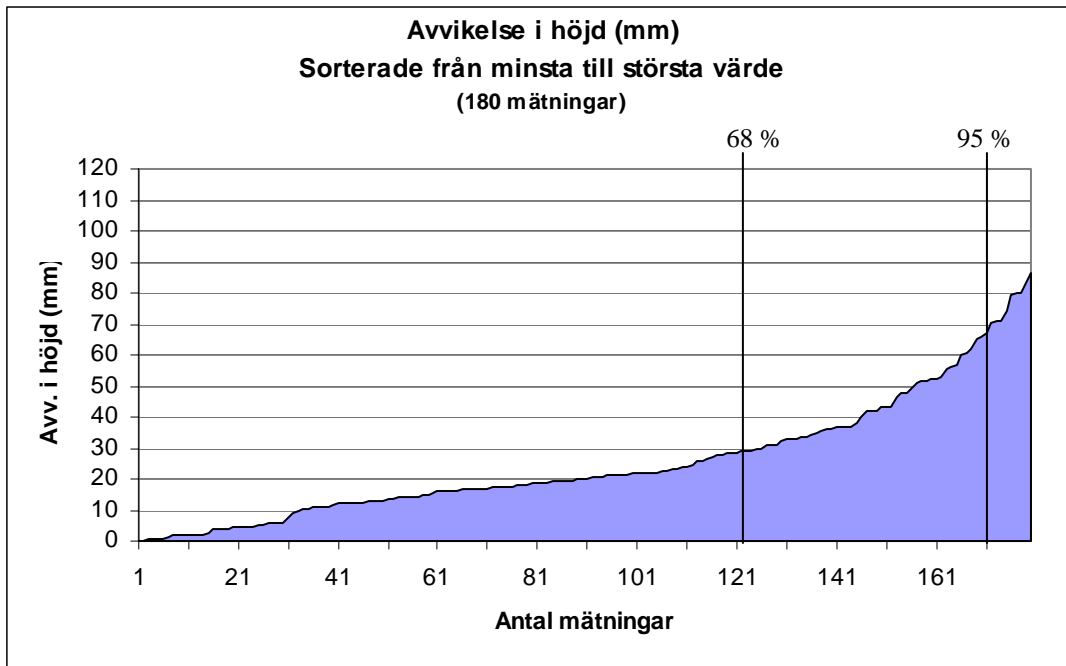
Enkelstations-RTK



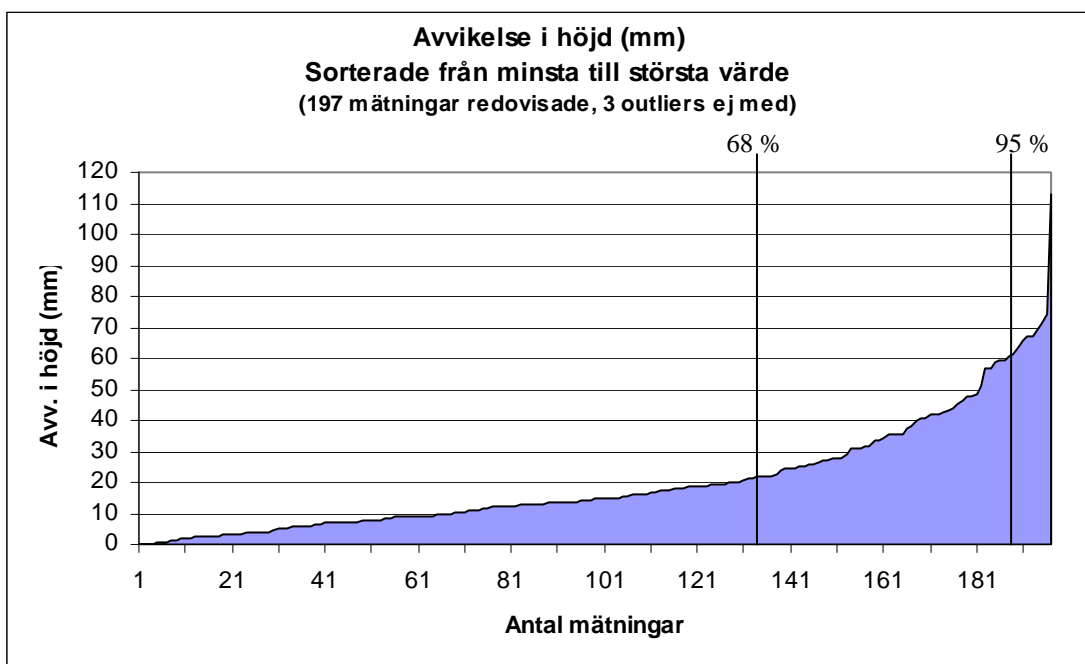
Nätverks-RTK



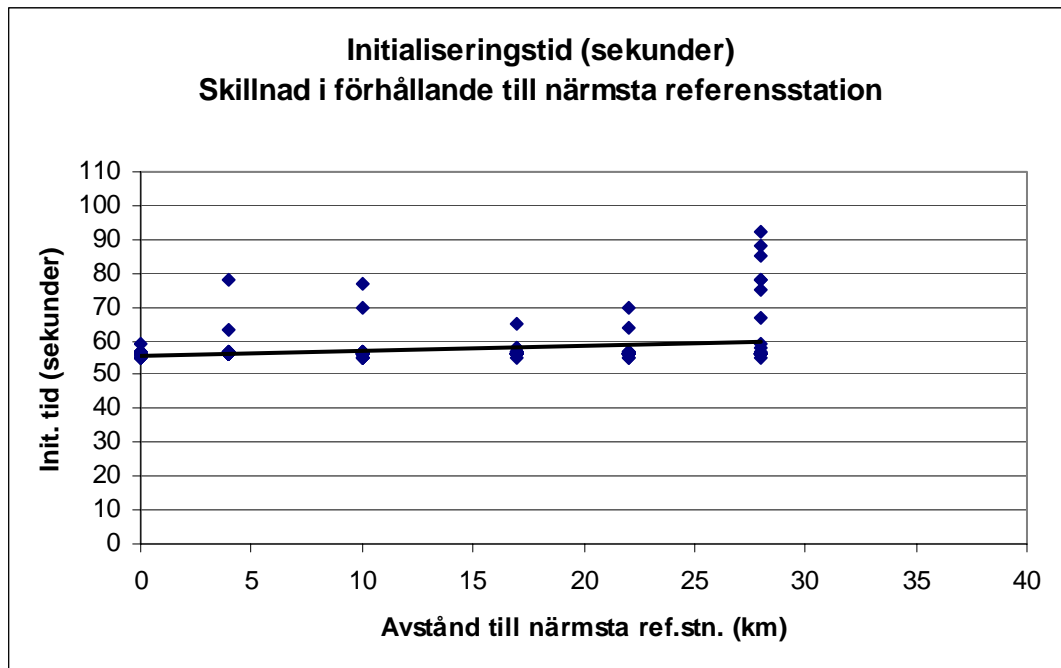
Enkelstations-RTK



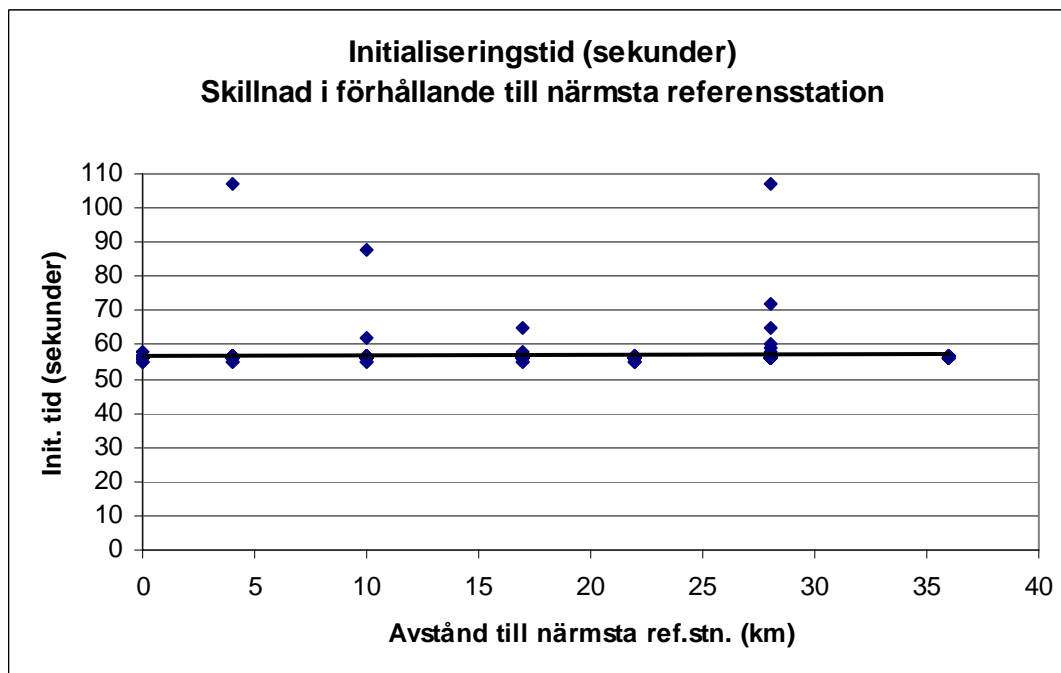
Nätverks-RTK



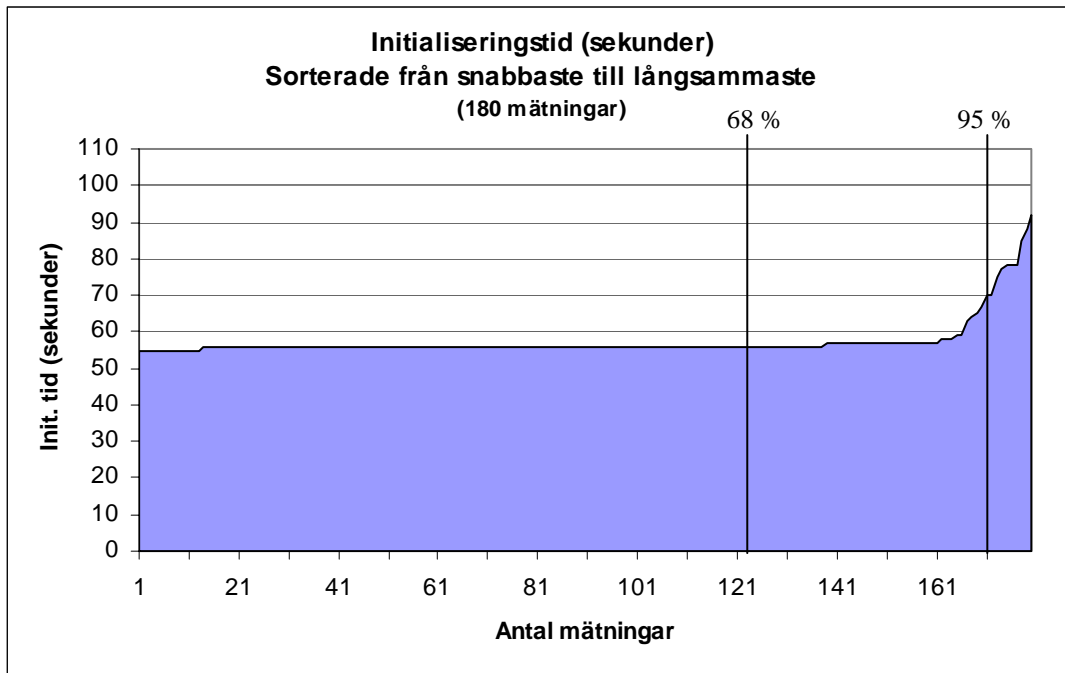
Enkelstations-RTK



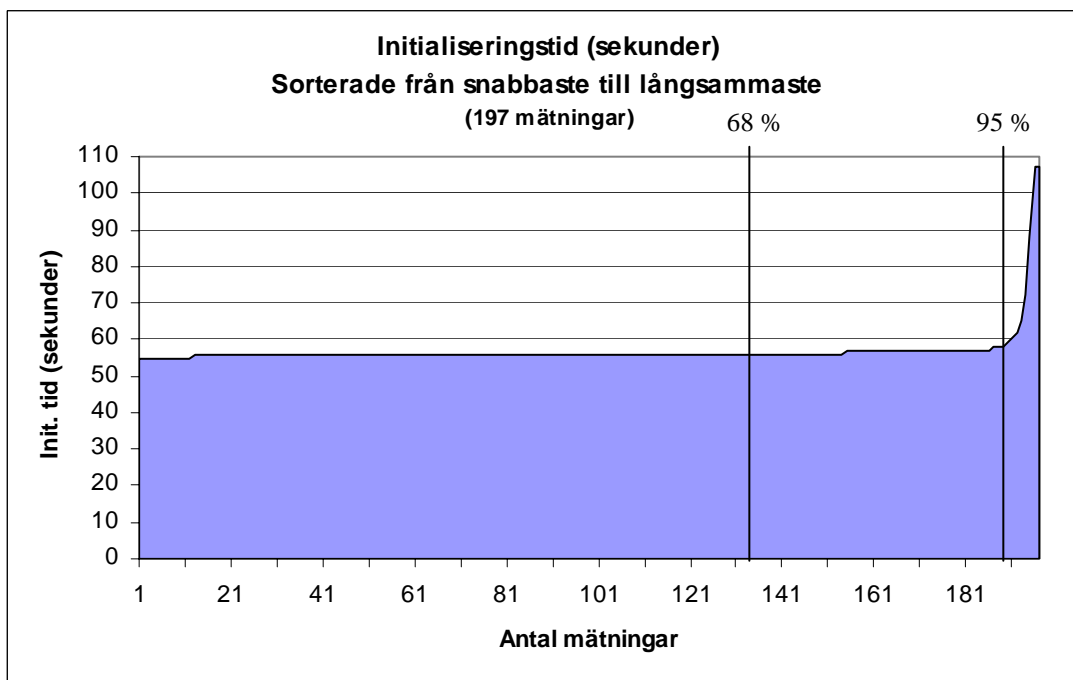
Nätverks-RTK



Enkelstations-RTK



Nätverks-RTK



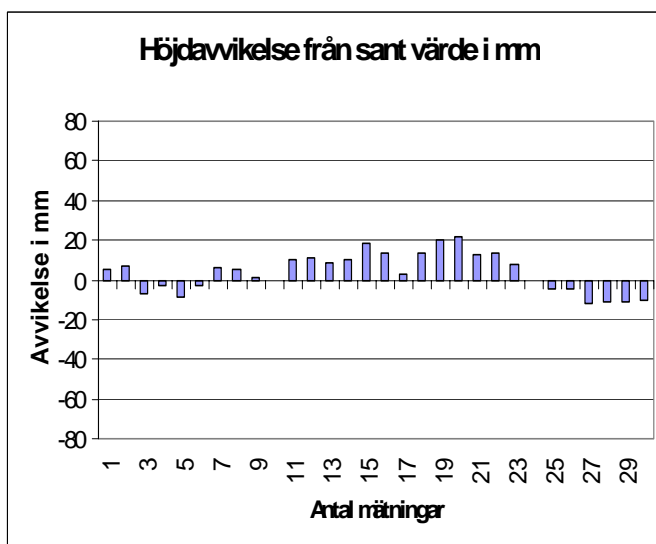
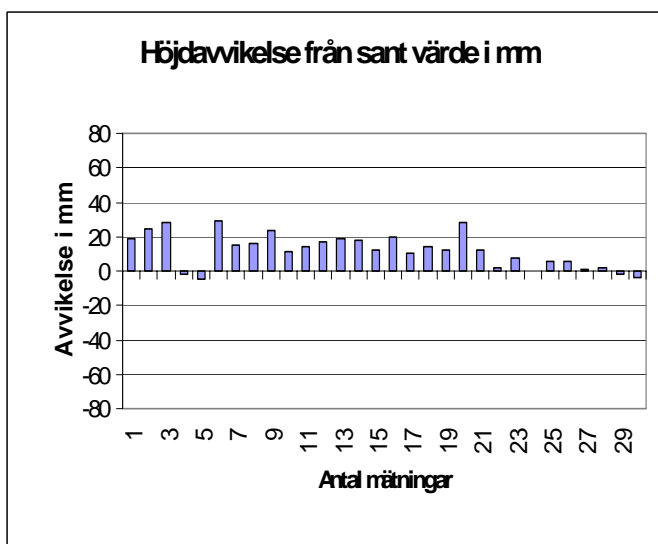
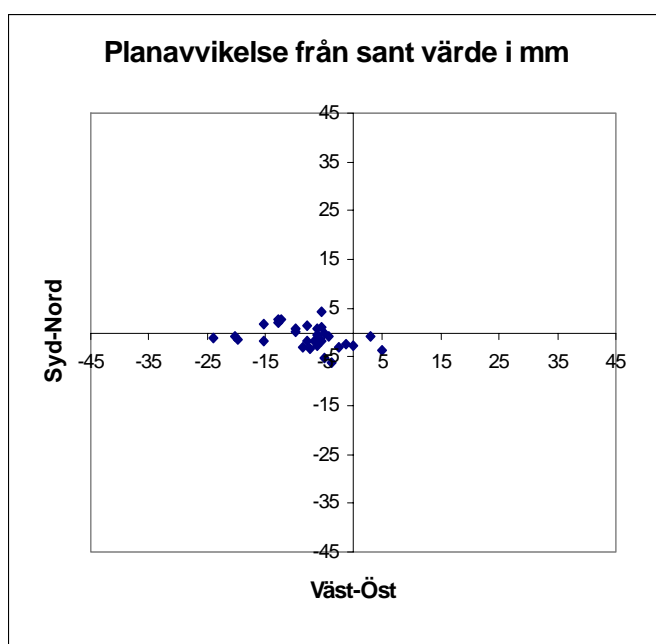
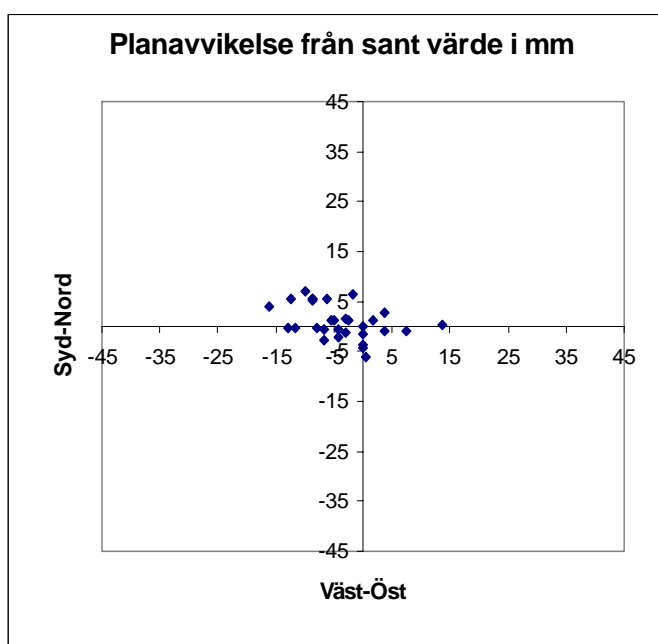
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 1

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	8	15
Precision	7	10
Medeldifferens	4	12
Största avvikelse	17	29
95%	14	28
68%	8	16

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	11	10
Precision	7	10
Medeldifferens	8	4
Största avvikelse	24	21
95%	22	19
68%	9	8



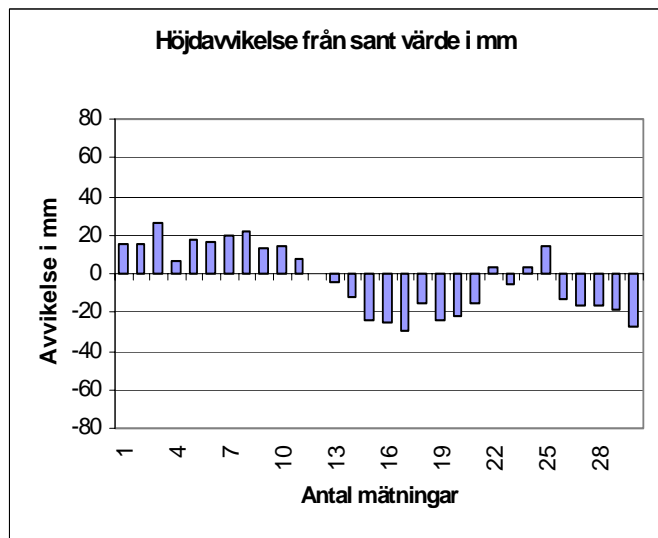
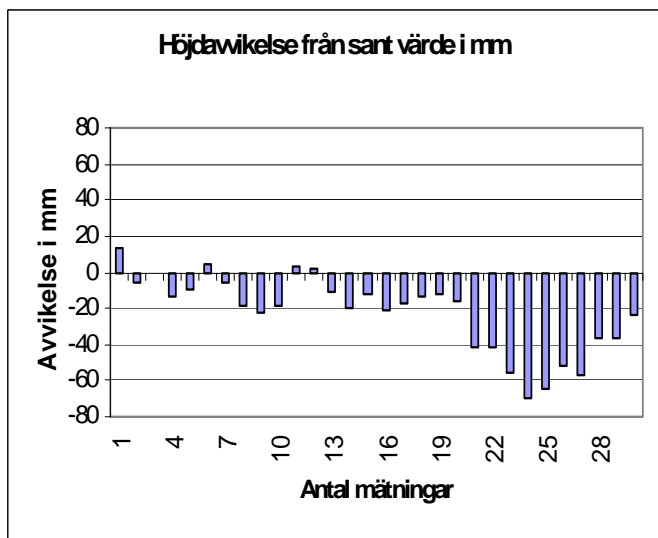
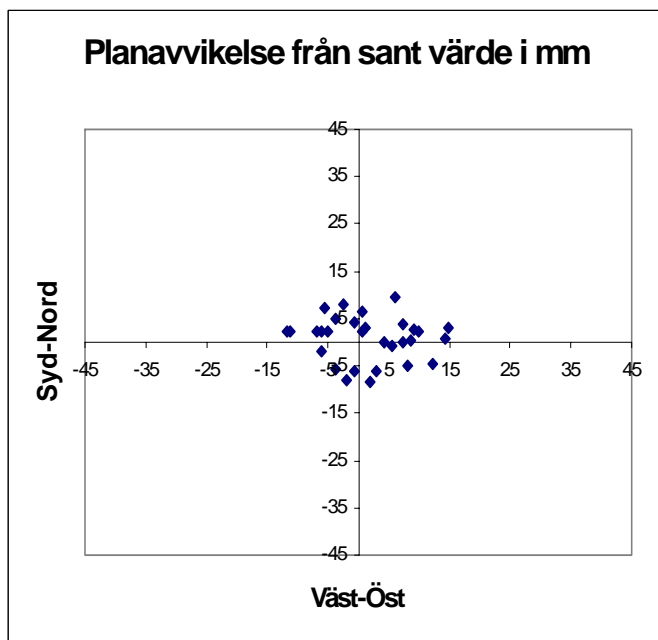
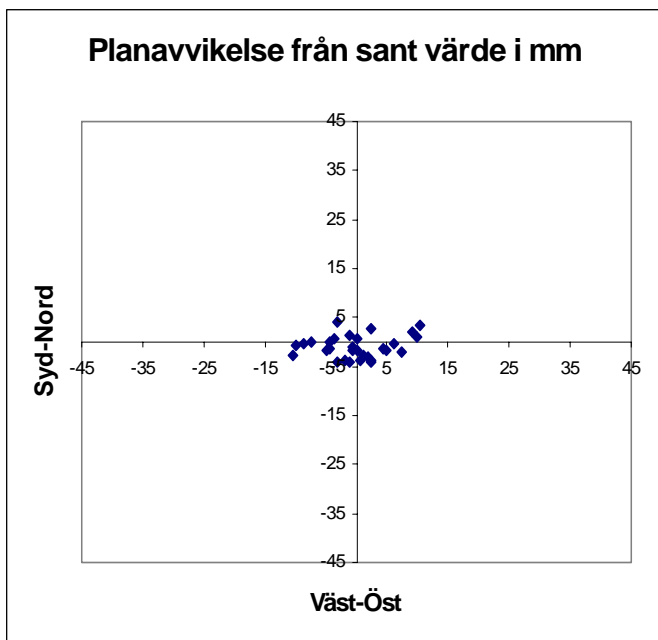
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 2

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	6	31
Precision	6	22
Medeldifferens	1	-22
Största avvikelse	11	70
95%	10	61
68%	5	22

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	9	17
Precision	9	17
Medeldifferens	2	-2
Största avvikelse	15	29
95%	14	27
68%	9	17



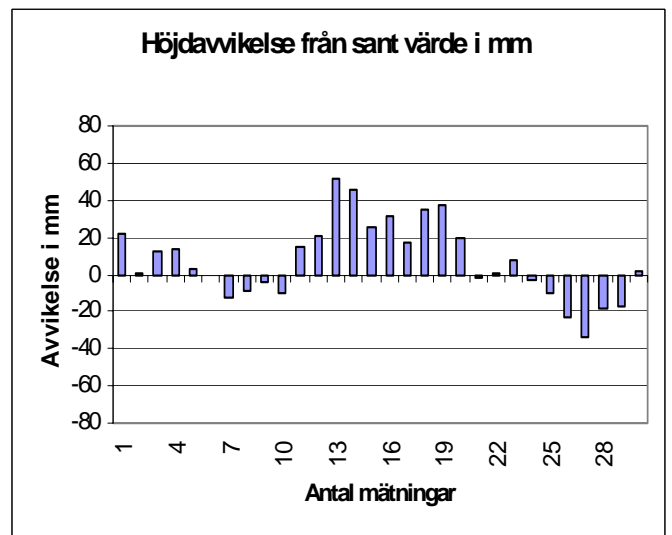
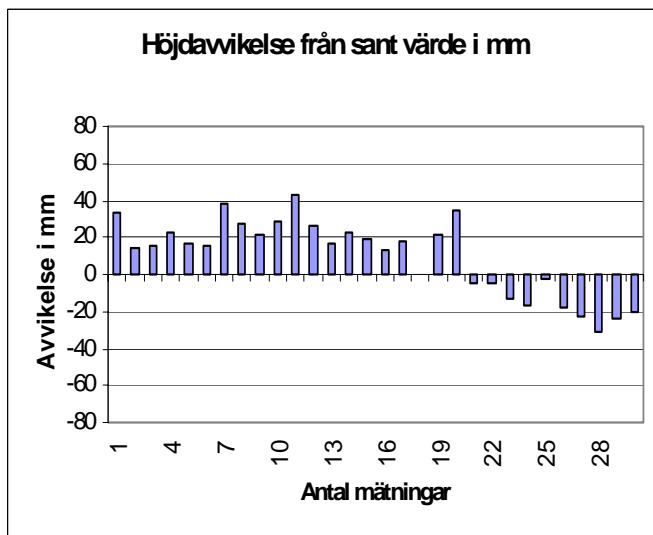
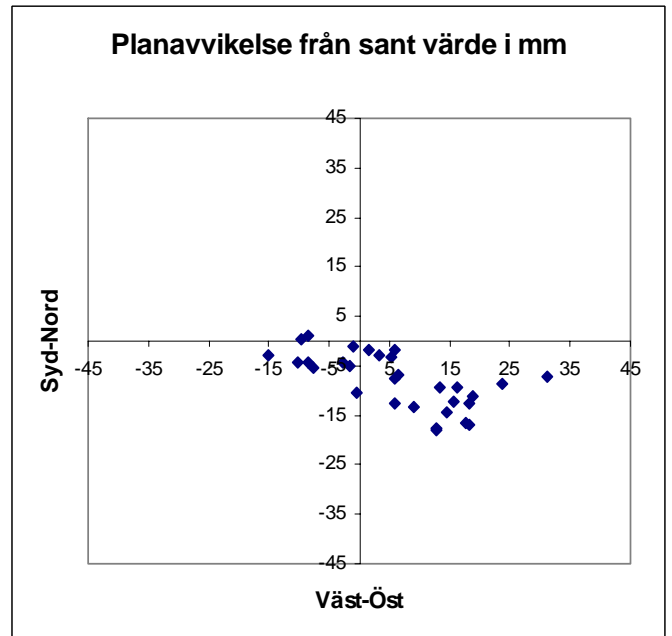
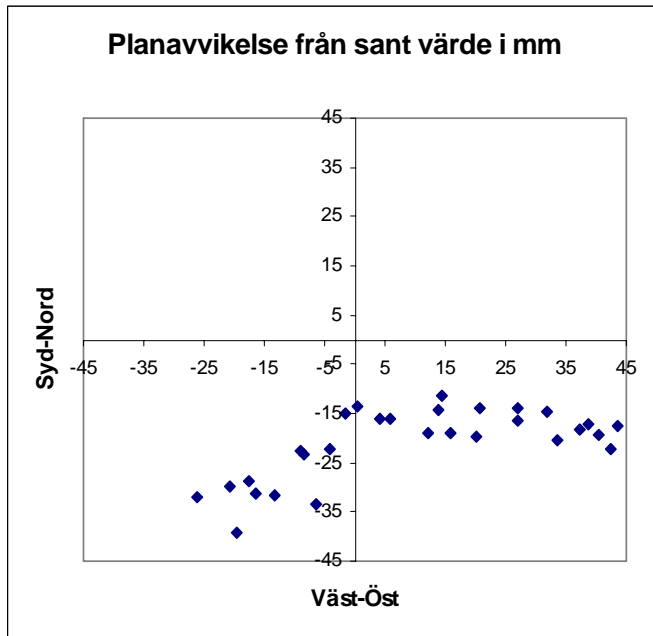
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 3

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	33	22
Precision	23	21
Medeldifferens	24	10
Största avvikelse	52	43
95%	48	36
68%	35	22

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	16	22
Precision	13	21
Medeldifferens	10	7
Största avvikelse	32	51
95%	25	42
68%	19	19



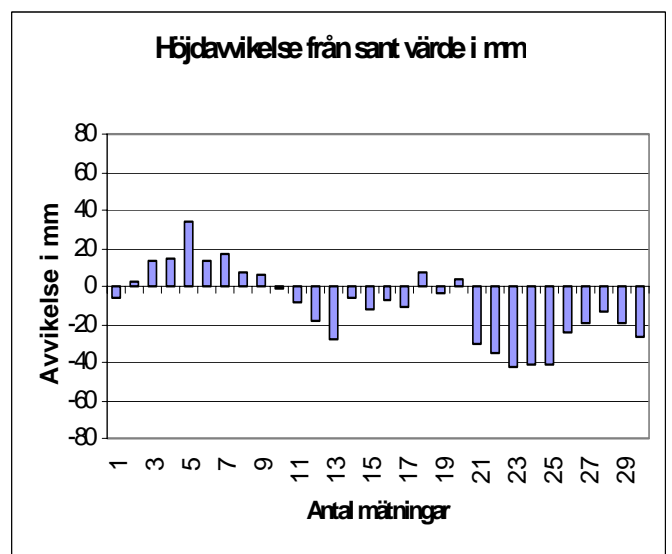
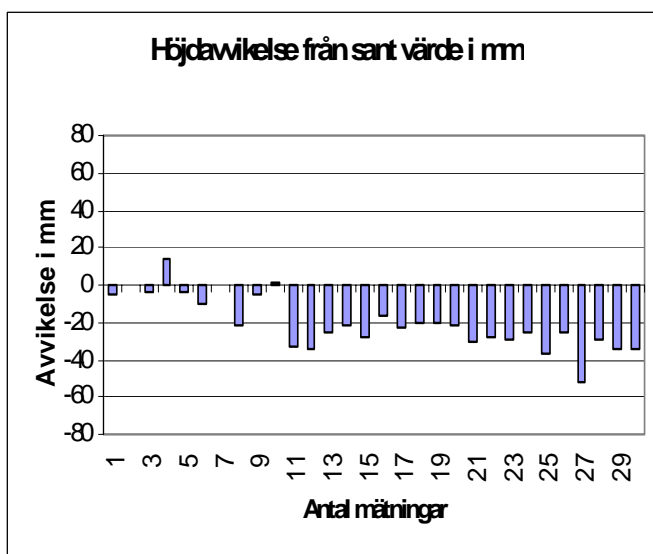
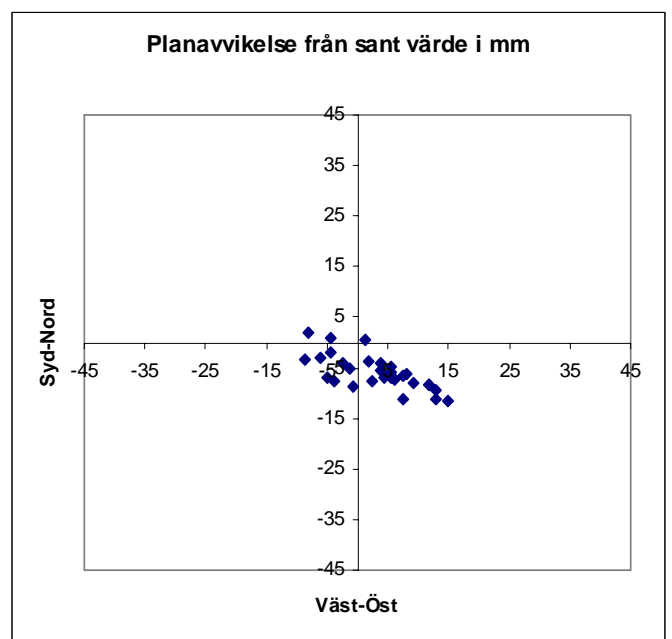
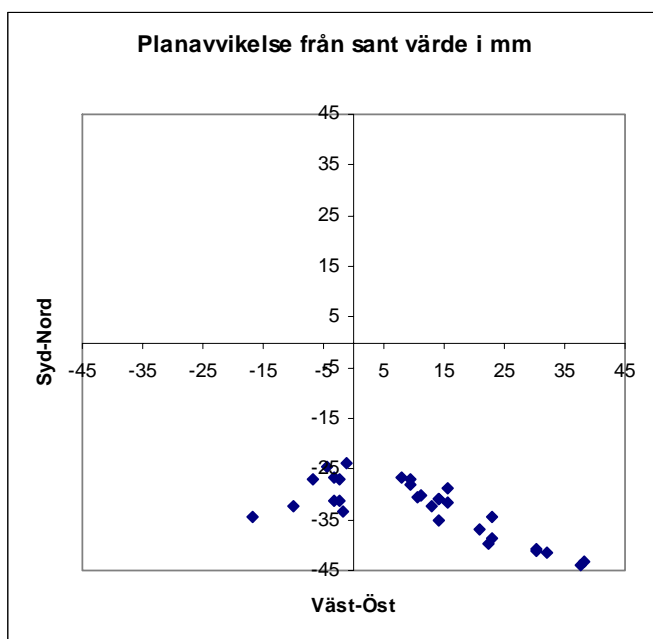
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 4

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	38	25
Precision	16	14
Medeldifferens	35	-20
Största avvikelse	58	52
95%	55	36
68%	38	28

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	10	21
Precision	7	19
Medeldifferens	7	-9
Största avvikelse	19	43
95%	17	42
68%	9	20



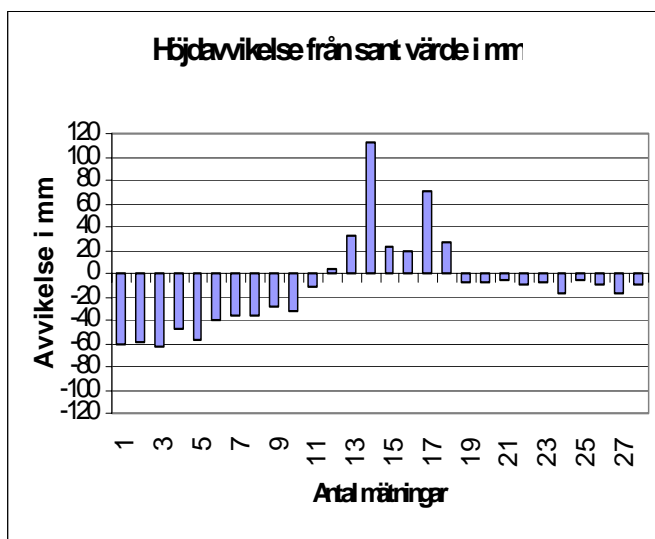
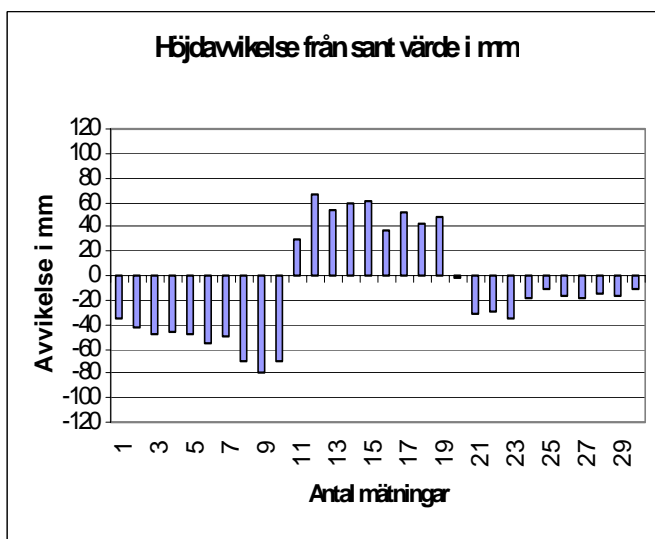
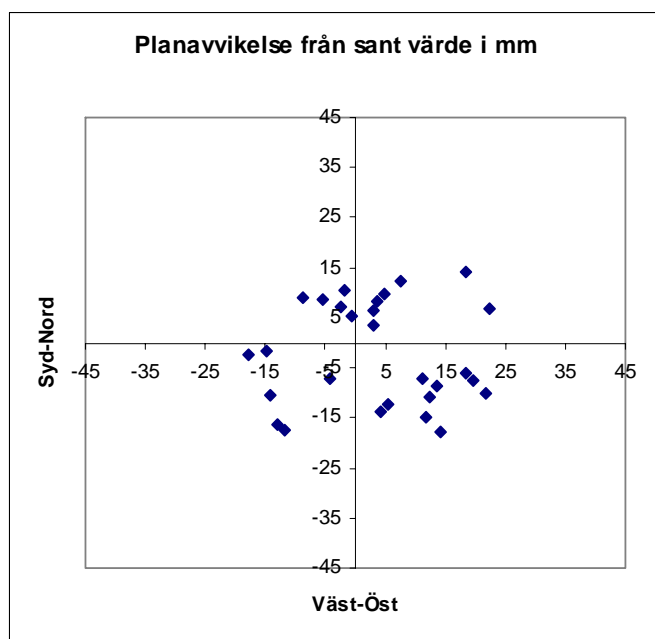
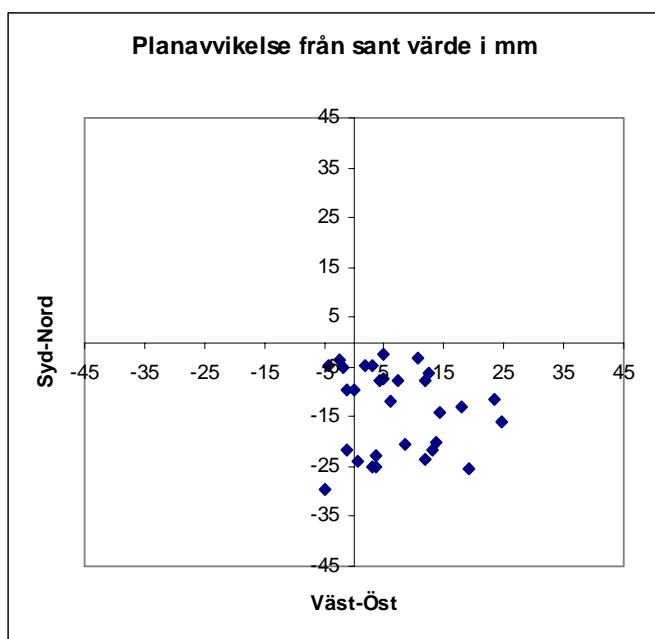
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 5

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	19	45
Precision	12	44
Medeldifferens	15	-10
Största avvikelse	32	-80
95%	29	71
68%	20	49

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	16	40
Precision	16	39
Medeldifferens	4	-10
Största avvikelse	23	113
95%	23	67
68%	17	36



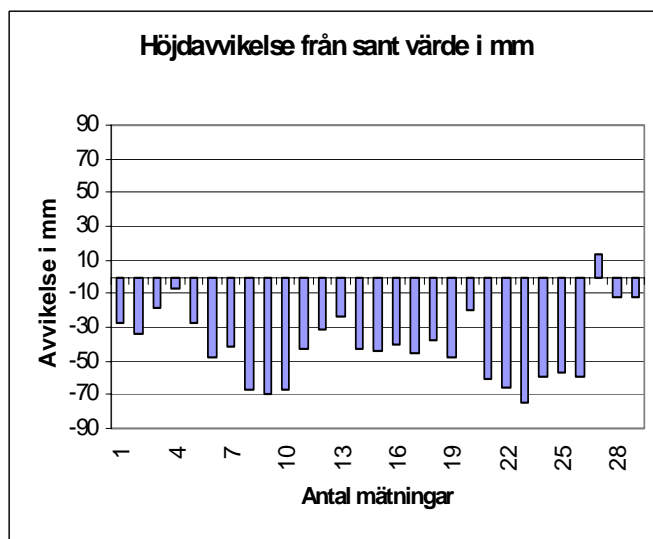
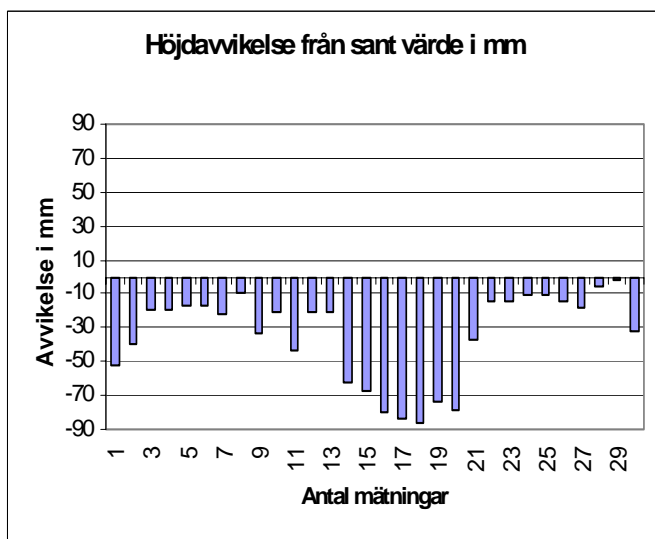
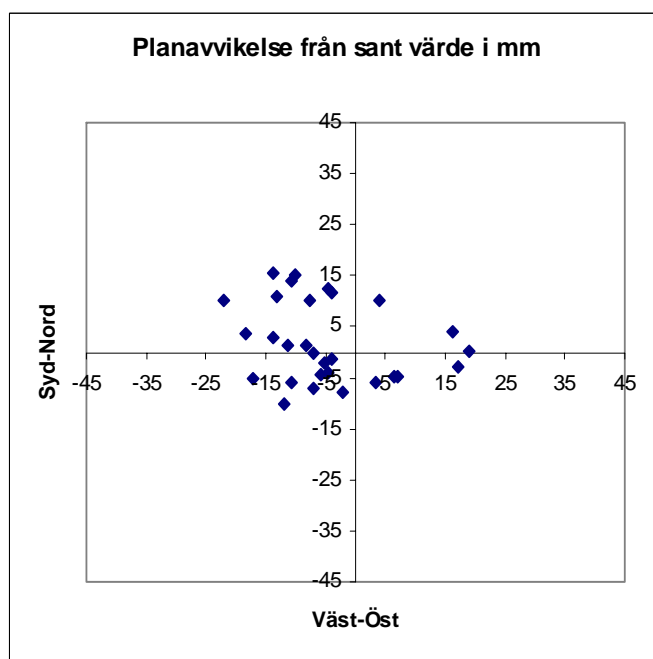
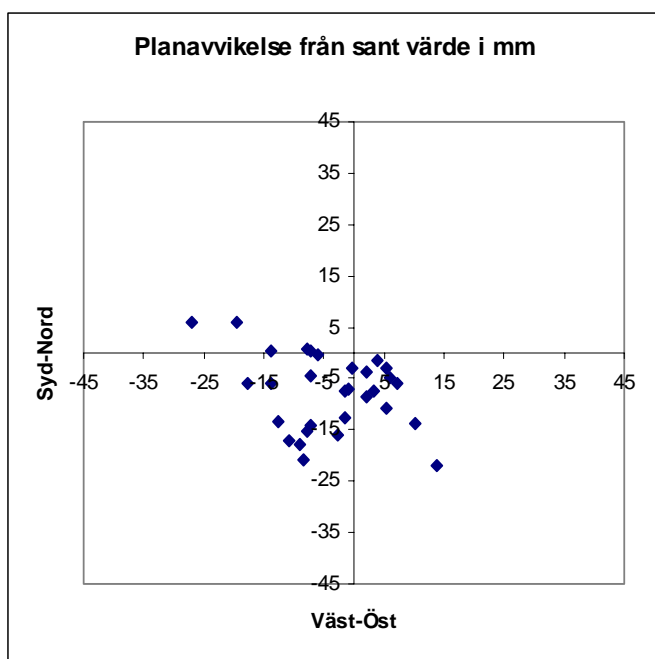
Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 6

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	15	43
Precision	12	26
Medeldifferens	9	-34
Största avvikelse	28	86
95%	25	82
68%	16	37

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	14	46
Precision	13	21
Medeldifferens	5	-40
Största avvikelse	24	74
95%	21	69
68%	17	48



Enkelstations-RTK

Nätverks-RTK

Punkt 7

(mm)	Plan	Höjd
Noggrannhet	16	12
Precision	15	9
Medeldifferens	7	-8
Största avvikelse	25	20
95%	24	19
68%	19	15

