



Realtidsuppdaterad fristation

Korrelationsanalys

Juni 2011

Milan Horemuz

Kungliga Tekniska högskolan,
Institution för Samhällsplanering och miljö
Avdelningen för Geodesi och geoinformatik
Teknikringen 72, SE-100 44 Stockholm

e-post: horemuz@kth.se
tel. 08-790 7335

Introduktion

Syftet med denna analys är att hitta svar på frågor: finns det någon systematisk effekt vid RUFRIIS¹ stationsetablering om man utför observationerna under en kortare tid? Finns det tidskorrelerade fel vid stationsetablering? Ska man sprida observationer för stationsetablering i tiden för att eliminera eventuella tidskorrelerade felen?

Positions- och orienteringsosäkerhet vid fristationsetablering med RUFRIIS-metoden beror på osäkerheten i totalstation- (TS) och GPS-mätningar, samt på synkronisering av GPS och TS-mätningar (mätstången kan röra sig mellan GPS och TS mättillfällen). Den sistnämnda felkällan kan elimineras m.h.a. stativ. Man kan identifiera följande felkällor vid RUFRIIS stationsetablering:

TS-relaterade felkällor:

- *Vinkelmätning och inriktning.* Leica totalstation använder s.k. ATR funktion (Automatic Target Recognition) för automatisk inriktning mot prisma. Enligt specifikationer osäkerheten vid inriktning mot 360° prisma är 5 mm, vilket motsvarar ca 32 mgon osäkerhet i vinkelmätning på 10 m avstånd. Osäkerheten vid själva vinkelmätning är 0.3 mgon. Standard avvikelse beräknad från våra tesmätningar: 4 mgon för horisontala och 9 mgon för vertikala vinklar.
- *Avståndsmätning.* Osäkerheten är 1 mm enligt instrumentspecifikationer. Standardavvikelse beräknad från våra testmätningar är 0.5 mm. Denna standardavvikelse är beräknad från upprepade mätningar mot gemensamma punkter².

GPS-relaterade felkällor:

oeliminera ionosfäriska och troposfäriska felen,

- kombinerad flervägsfel på referens och rörliga mottagare,
- andra felkällor som är försumbara vid RTK-mätning (klockfelen, fel i satellitkoordinater)

Andra felkällor:

- synkronisering av GPS/TS mätningar (mätstången rör sig mellan GPS och TS mättillfällen); denna felkälla kan elimineras genom att placera prisma och GPS-antenn på ett stativ.

¹ Realtidsuppdaterad fristation

² Gemensam punkt = en punkt inmätt både med GPS-RTK och med TS

TS-relaterade felen uppvisar ingen tidskorrelation. Däremot GPS-relaterade felen är tidskorrelerade och flervägsfelet innehåller dessutom periodiska komponenter. Det finns flera rapporter (t.ex. Odolinski R, 2010) som bevisar att fel i GPS-mätningar är tidskorrelerade. Om man inte tar hänsyn till tidskorrelationerna, då får man för optimistiska skattningar av mätosäkerheten. (I tiden närliggande mätningar varierar lite, men de innehåller ett systematiskt fel). Alla dessa rapporter är baserade bara på statiska GPS-observationer, dvs. en RTK-mottagare placerat på ett stativ sparar koordinater med viss tidsintervall. Sedan man använder tidsserier av koordinater för autokorrelationsanalys. Men vid RUFRIIS metoden man använder gemensamma punkter som är spridda runt TS, dvs. RTK-mätningar sker på olika platser. Vår hypotes är att tidskorrelationerna i RTK-bestämda koordinater bryts ner genom att man förflyttar GPS-antenn, eftersom flervägsfel blir mer slumpmässigt och dessutom man kan få olika satellitkonfigurationer på olika punkter. Vi vill testa denna hypotes m.h.a. testmätningar beskrivna i följande avsnitt.

Testmätningar

Vi utförde fyra testmätningar i två olika miljöer. Vid mätningarna användes Leica System 1200+, dvs. Leica totalstation TPS1201 och GPS1200+. Två mätningar ägde rum på Gärdet i Stockholm, den 7 juli 2010 och den 7 juli 2011. Här finns det helt öppen terräng utan några hinder, så vi kunde mäta mot alla tillgängliga satelliter – se Figur 1. Som gemensamma punkter användes 15 stativ uppställda på en cirkel med diameter ca 20 m (2010) resp. ca 50 m (2011). Varje stativ var utrustat med en trefot och prismahållare, så man kunde enkelt och snabbt placera och ta bort prisma med GPS-antenn. I mitten av cirkel ställdes upp totalstationen, vilken mätte mot prisma som flyttades runt på de 15 stativen.



Figur 1. Testmätning 100707 på Gärdet.

Det tog ca 5 – 7 minuter att utföra 15 mätningar, dvs. 1 varv. Vi mätte 10 varv under 1 timme, sedan tog vi en timme paus och sedan mätte vi 10 varv till.

Vid beräkningen av stationens koordinater m.h.a. alla 300, (195⁺) mätningar (Figur 3, resp. Figur 4), 4 (1) RTK-mätningar identifierades som grova fel och togs bort från vidare analys.

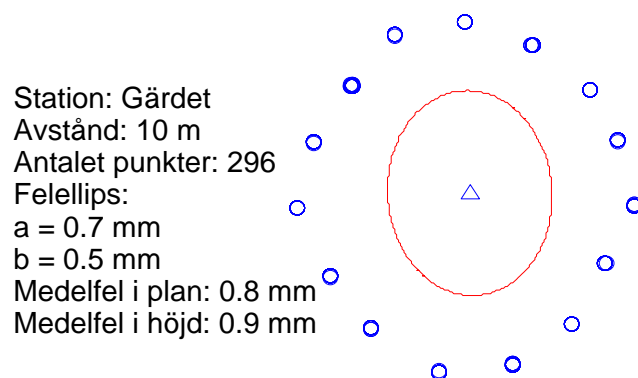
Två testmätningar genomfördes på KTH, nära V-huset, i ett område med många träd och byggnader i närheten – se Figur 2. Mätningarna ägde rum den 8 juli 2010 och den 6 juli 2011. Här användes 13 (14) stativ med mer realistisk (oregelbunden) spridning runt totalstationen. Figur 5 visar punktkonfiguration och medelfelen beräknade ur 255 mätningar år 2010. 5 RTK-mätningar togs bort – de identifierades som grova fel vid MK-utjämnningen. Vi utförde likadan sekvens av mätningar som på Gärdet: vi mätte 10 varv under 1 timme, sedan tog vi en timme paus och sedan mätte vi 10 varv till.

Vid 2011 mätningen identifierades 6 grova fel, punktkonfiguration och medelfelen visas i Figur 5.

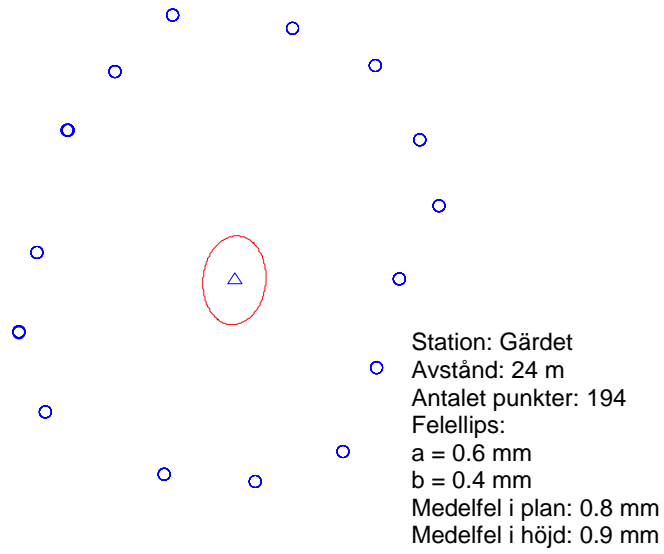
⁺ Mätning 20110707



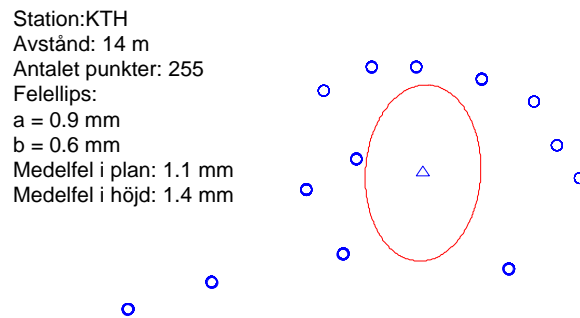
Figur 2. Testmätning 0708 på KTH. Station 122, gemensamma punkter 21 – 33.



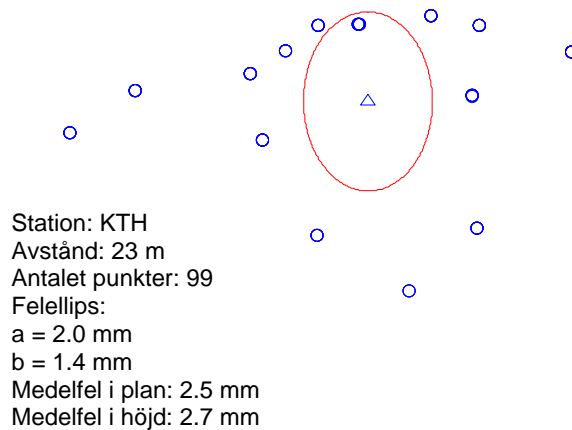
Figur 3. Testmätning 20100707 på Gärdet. Medelfelen är beräknade m.h.a. alla (296) mätningar.



Figur 4. Testmätning 20110707 på Gärdet. Medelfelen är beräknade m.h.a. alla (194) mätningar



Figur 5. Testmätning 20100708 på KTH. Medelfelen är beräknade m.h.a. alla (255) mätningar.

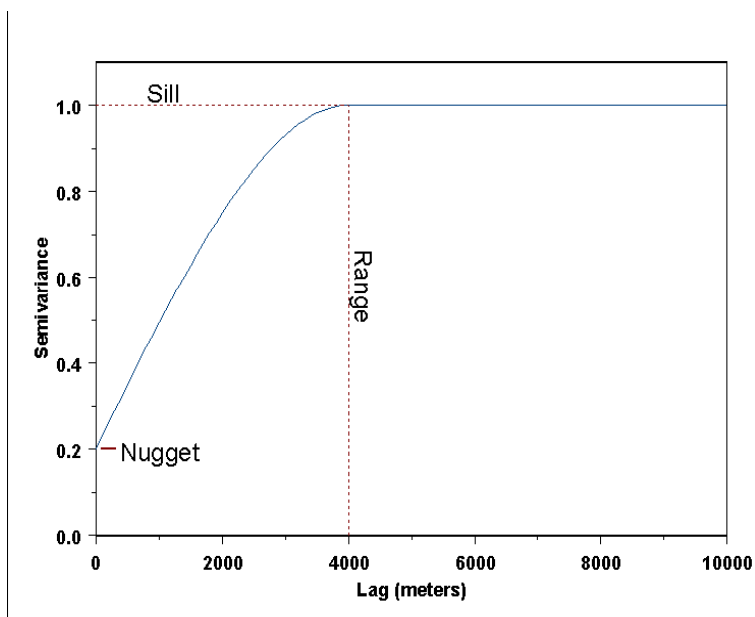


Figur 6. Testmätning 20110706 på KTH. Medelfelen är beräknade m.h.a. alla (99) mätningar.

Semivariogram analys

Vi använde ett halvt varv (7 gemensamma punkter den 100707 och den 110706, 6 gemensamma punkter den 100708 och den 110707) för beräkning av stationens koordinater, d.v.s. vi beräknade fristationer KTH 40 gånger år 2010, 13 gånger år 2011 och station Gärdet 40 gånger år 2010, 26 gånger år 2011. Varje resultat tilldelades en tidstämpel: medelvärde av alla tider för involverade RTK-mätningar. På sådant sätt skapade vi tidsserier av stationernas koordinater. Vi använde *semivariogram analys* för att studera tidskorrelationer i dessa tidsserier. Semivariogram analys är ett statistiskt verktyg för att studera tids eller rumsligberoende i olika dataserier. Utförlig beskrivning av teori finns t.ex. i Bohling G, (2005). Figur 7 visar grundläggande egenskaper hos en semivariogram, vilket är en graf som visar beroende av semivarians (y-axel) på "lag" (x-axel). "Lag" är avstånd mellan data i serier, i vårt fall är detta avstånd uttryckt i sekunder. Semivarians är ett mått på variation av datadifferenser. Man kan beräkna datadifferenser med alla möjliga "lag" och beräkna semivarians för varje "lag". Om det inte finns några korrelationer i en dataserie, semivarianser för alla "lag" är likadana. Men om det finns någon korrelation, data som ligger närmare varandra är mer lika och då semivarianser för mindre "lag" är mindre. Semivarians ökar till en viss punkt där semivariansen planar ut och blir konstant. Detta konstanta värde heter "sill" och motsvarande "lag" kallas "range". Data som har större avstånd än range kan betraktas som okorrelerade. Teoretiskt, semivariansen för "lag" = 0 bör vara lika med noll, men om man beräknar semivarianserna ur experimentella data, detta värde ("nugget") är inte lika med noll p.g.a. mätosäkerheten i data.

Utseende av semivariogram för statistiska RTK-koordinater liknar den i Figur 7.

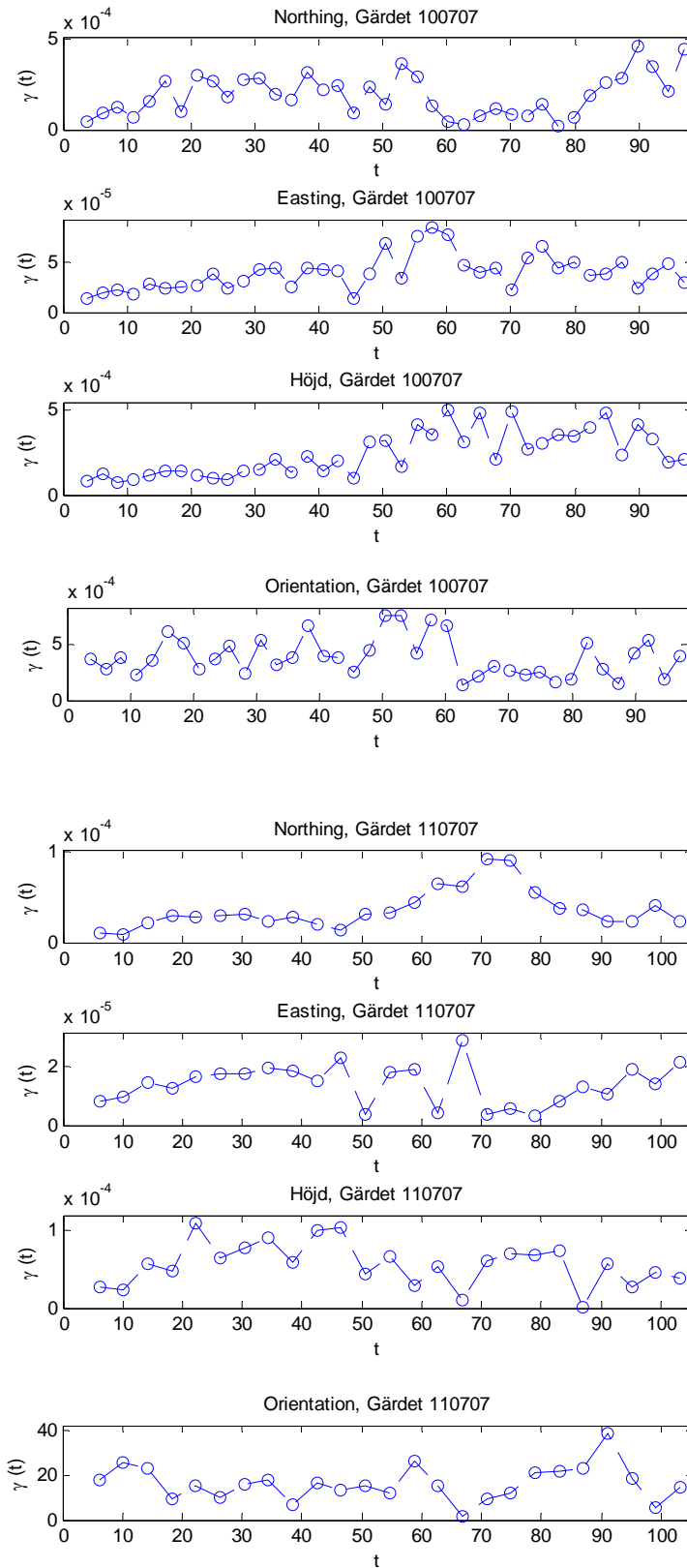


Figur 7. Egenskaper av semivariogram.

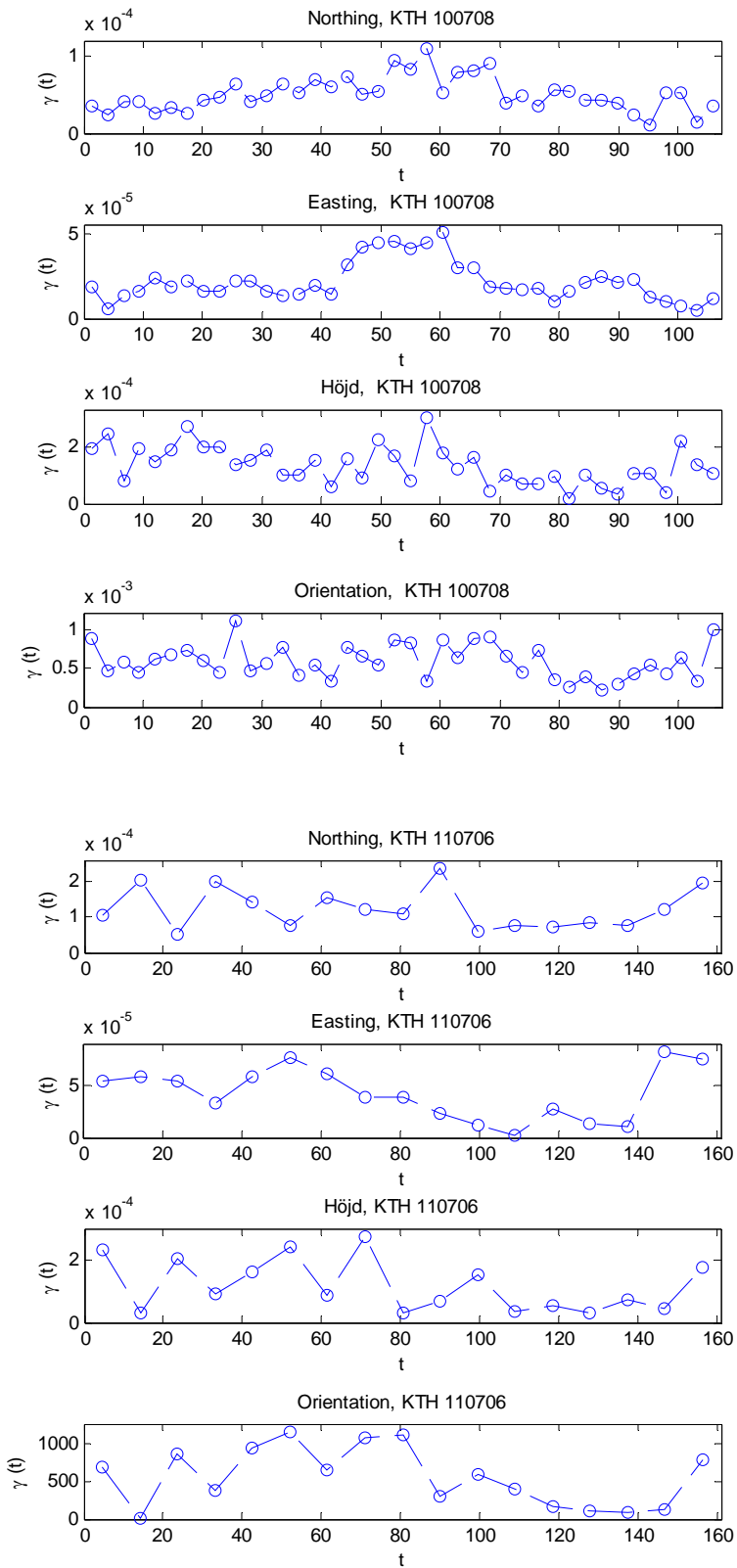
Figur 8 och Figur 9 visar semivariogram för mätningar på Gärdet 100707 och 110707. Man kan se en viss "up"-trend i semivariogram för Easting och Höjd, fast trenden är inte så tydlig som i Figur 7. Trenden för Northing är ännu svagare och det finns ingen trend i semivariogram för orientering.

Trender i semivariogram figurer för mätningar på KTH är ännu mindre synliga - Figur 9; det finns ingen likhet med typisk semivariogram för korrelerade mätningar (Figur 7).

Detta resultat bekräftar vår hypotes om att tidskorrelationerna bryts ner om man förflyttar GPS-antenn mellan punkter med olika satellitförhållande: punkterna på KTH låg nära byggnader och träd, så flervägsfelet och satellitkonfiguration ändras signifikant om man rör antennen. Å andra sida, testmätningar på Gärdet utfördes i helt öppen terräng, så alla punkter hade lika satellitförhållande: likadan flervägsfel och samma satellitkonfiguration på alla punkter och därmed tydligare tidskorrelationer i uppmätta koordinater. Detta kan bekräftas m.h.a. krosskorrelationsanalys som visas i nästa avsnitt.



Figur 8. Semivariogram för station Gärdet, mätning 100707 och 110707.



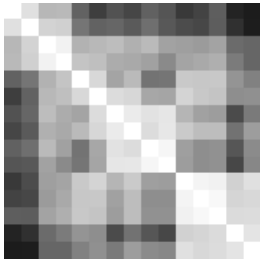
Figur 9. Semivariogram för station KTH, mätning 100708 och 110706. t är i minuter.

Krosskorrelationsanalys av RTK-koordinater

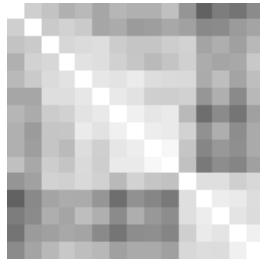
Varje gemensam punkt mättes flera gånger m.h.a. RTK. Vi använde mätserier av RTK-koordinater på varje punkt för att beräkna krosskorrelationer mellan punkternas koordinater. Krosskorrelation (kk) är ett mått på likheten mellan två mätserier. $kk = 1$ betyder att bägge serier varierar på exakt samma sätt, $kk = 0$ betyder att det inte finns någon likhet mellan serierna. Krosskorrelationerna kan visualiseras m.h.a. gråskaliga matrisfigurer. Varje liten kvadrat i figurerna motsvarar krosskorrelation mellan 2 punkter. Det finns 15 punkter i mätningar på Gärdet och 13 punkter på KTH, därför 15x15, respektive 13x13 storlek på de stora kvadraterna. Vit färg representerar $kk = 1$, svart $kk = 0$. Alla diagonala kvadraterna är vita, eftersom de representerar krosskorrelation med sig själv. Varje rad och kolumn motsvarar en punkt. Punkterna är sorterade efter deras position i fältet, alltså punkter som är grannar i fältet är grannar också i figuren. Rutor närmare diagonalen visar kk för punkterna nära varandra, och rutorna i kanten visar kk för punkter med längre inbördes avstånd. Två kolumner i figuren för KTH 100708 mätningen är svarta, eftersom mätserierna på dessa punkter inte var kompletta, så kk kunde inte beräknas. Man skulle förvänta ljusare färger runt diagonalen och mörkare vid kanterna, eftersom motsvarande mätningarna är tagna en kort tid efter varandra, så de bör vara mer korrelerade. Sådan trend syns i Gärdet mätningar (öppet fält, inga hinder, eller reflekterande ytor i närheten, liknande förhållanden på samtliga punkter), men korrelationerna är betydligt lägre i KTH-mätningar (många hinder och reflekterande ytor i närheten, olika förhållanden på varje punkt).

Denna analys förutsätter att stativen inte rörde sig under hela mätperioden. Detta kan bevisas m.h.a. Figur 11 - Figur 14 i Bilaga A. Figurerna visar variationer i mätt avstånd. Nästan alla avståndsmätningar varierar inom ± 1 mm, utan någon trend. Om något av stativen hade rört sig, det skulle resultera i ett hopp eller trend i avståndsvariationer. Sådant hopp om ca 3 mm syns på punkt 8, mätning Gärdet 110707 (Figur 12).

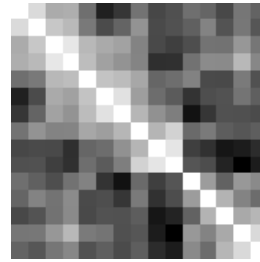
Gärdet 0707, northing



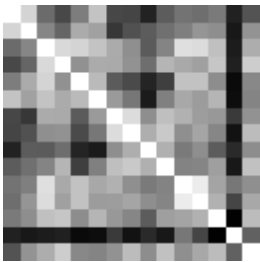
Gärdet 0707, easting



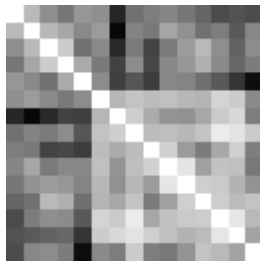
Gärdet 0707, höjd



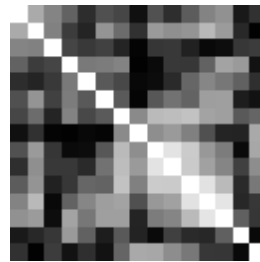
Gärdet 110707, northing



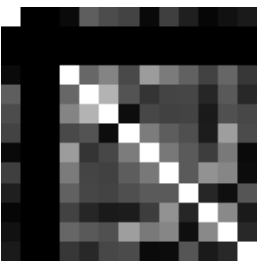
Gärdet 110707, easting



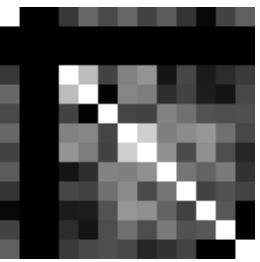
Gärdet 110707, höjd



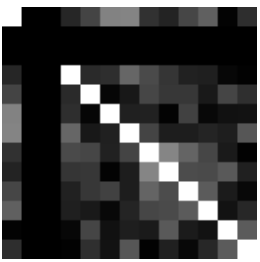
KTH 0708, northing



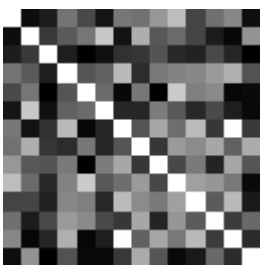
KTH 0708, easting



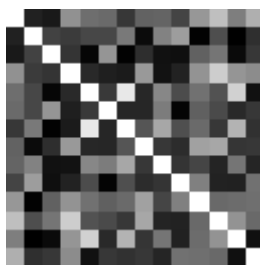
KTH 0708, höjd



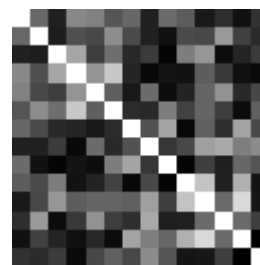
KTH 110706, northing



KTH 110706, easting



KTH 110706, höjd



Figur 10. Visualisering av krosskorrelationer mellan RTK-koordinaterna.

Slutsatser

Tidskorrelationer i RTK-koordinater är väldigt tydliga i statistiska observationer, eftersom satellitkonfigurationen, atmosfäriska felen och flervägsfel ändras långsamt. Våra experiment visar att vissa korrelationer bryts ner om man förflyttar GPS-antenn. Nedbrytningen är tydligare om mätningen sker i ohomogen miljö, d.v.s. satellitkonfigurationen och flervägsfelet är olika på olika punkter. Detta syns i Figur 10 där rutor för mätningar på KTH (ohomogen miljö) är mörkare (mindre korrelation) än rutorna för Gärdet mätningar (homogen miljö). Vad är svaret till frågan som vi ställde i början? Ska man sprida observationer för stationsetablering? Resultatet från våra tester visar ingen tydligt påverkan av tidskorrelerade fel. Detta påstående baseras på variogrammen (Figur 8 och Figur 9), vilka inte uppvisar det mönstret som är typiskt för tidskorrelerade processer (Figur 7). Krosskorrelationsanalys av RTK mätningar i öppen miljö påvisar större krosskorrelation mellan olika punkter jämfört med mätningar i miljö med många hinder för satellitsignal. Denna krosskorrelation har dock inte större påverkan på beräknade stationskoordinater. Figur 15 och Figur 16 i Bilaga A visar variationer i beräknade stationskoordinater samt deras medelfel. Det syns tydligt att större medelfel medför koordinatvariationer med större amplitud. Samma mönster syns i 2011 mätningar. Medelfelens storlek är realistisk i förhållande till variationernas amplitud, dvs amplituden ligger i ± 3 x medelfel intervallet, vilket motsvarar till normalfördelning.

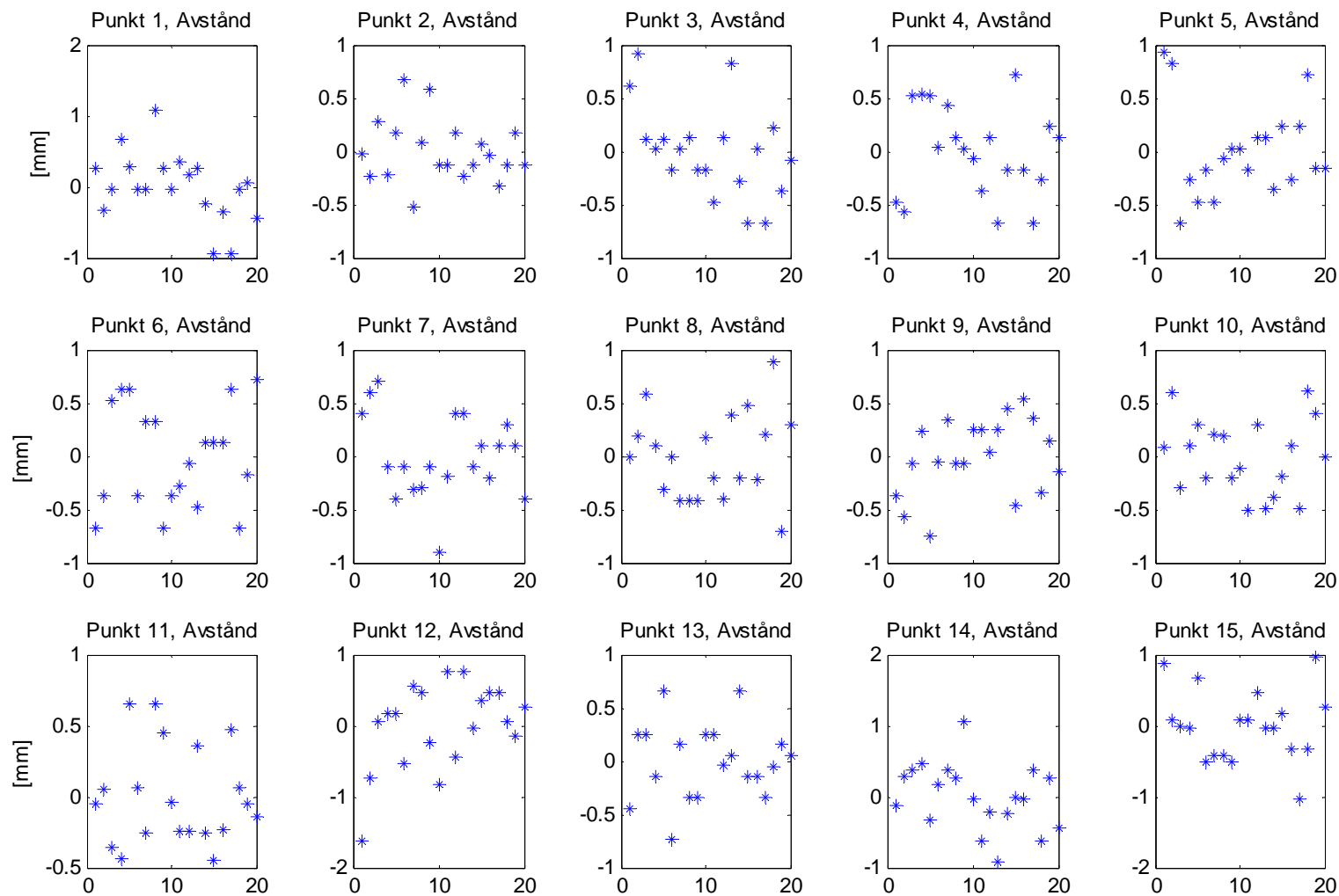
M.h.a. dessa argument kan man dra slutsats att man inte behöver sprida mätningar för stationsetablering vid RUFRIIS i tid. För att få noggrannare stationsetablering, det är viktigt att ha en bra kvalitet på RTK-mätningar.

Referenser

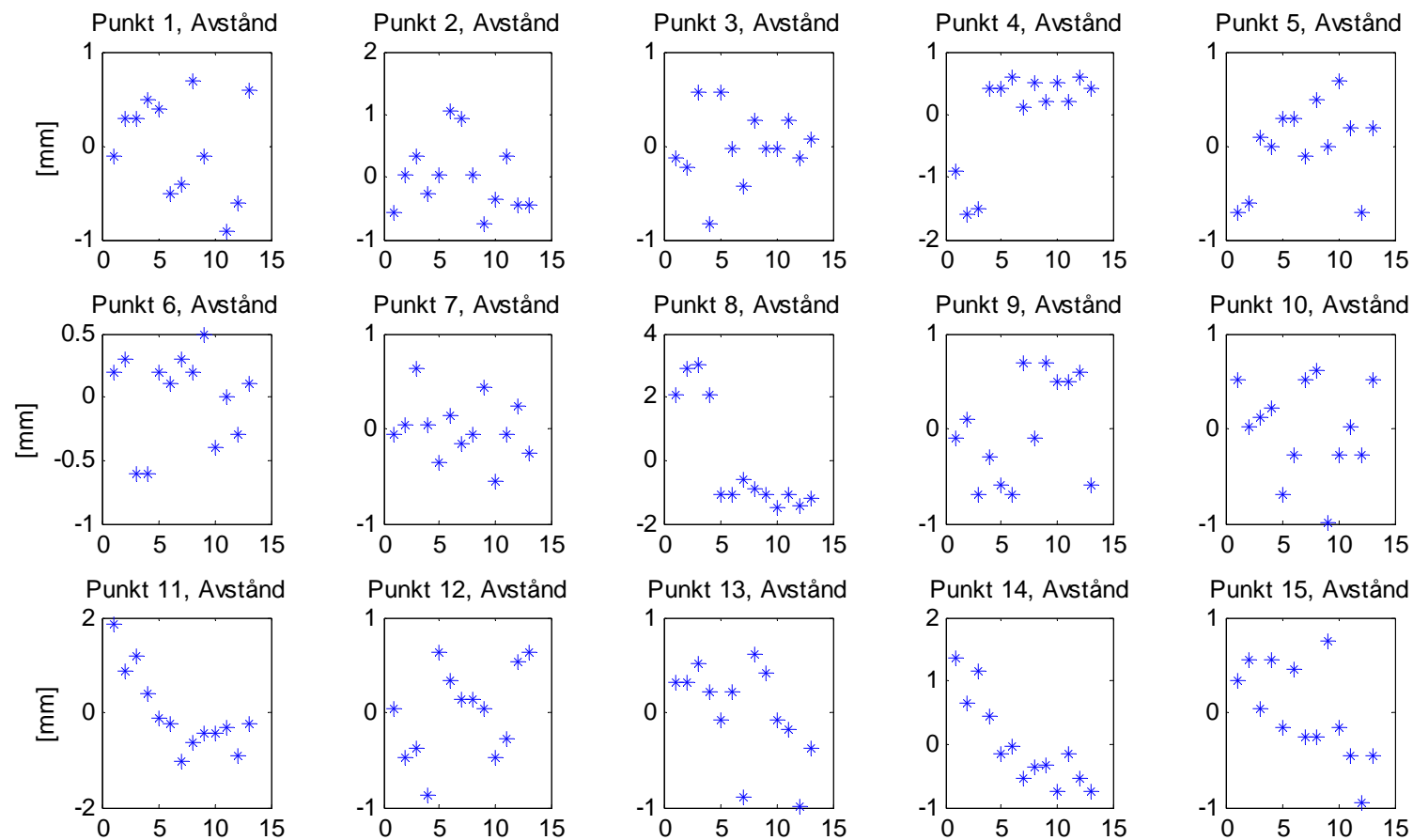
Odolinski R, (2010): Study of accuracy and correlations in time for Network RTK. Rapportserie: Geodesi och Geografiska informationssystem, 2010:2, Lantmäteriet, Gävle. http://www.lantmateriet.se/upload/filer/kartor/geodesi_gps_och_detaljmatning/Rapporter-Publikationer/LMV-rapporter/LMV-Rapport_2010_2.pdf

Bohling G, (2005): Introduction to geostatistics and variogram analysis. <http://people.ku.edu/~gbohling/cpe940/>

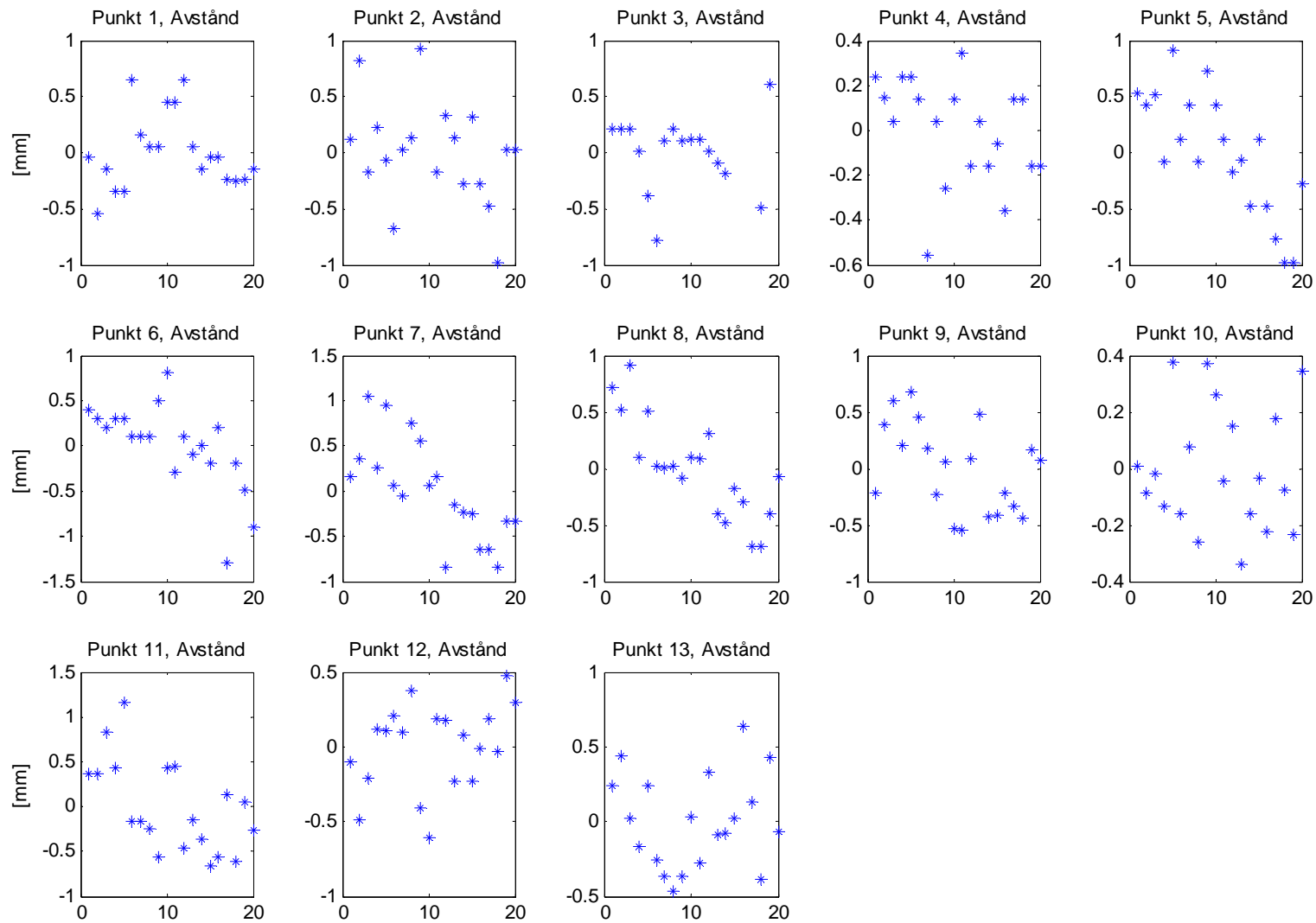
Bilaga A



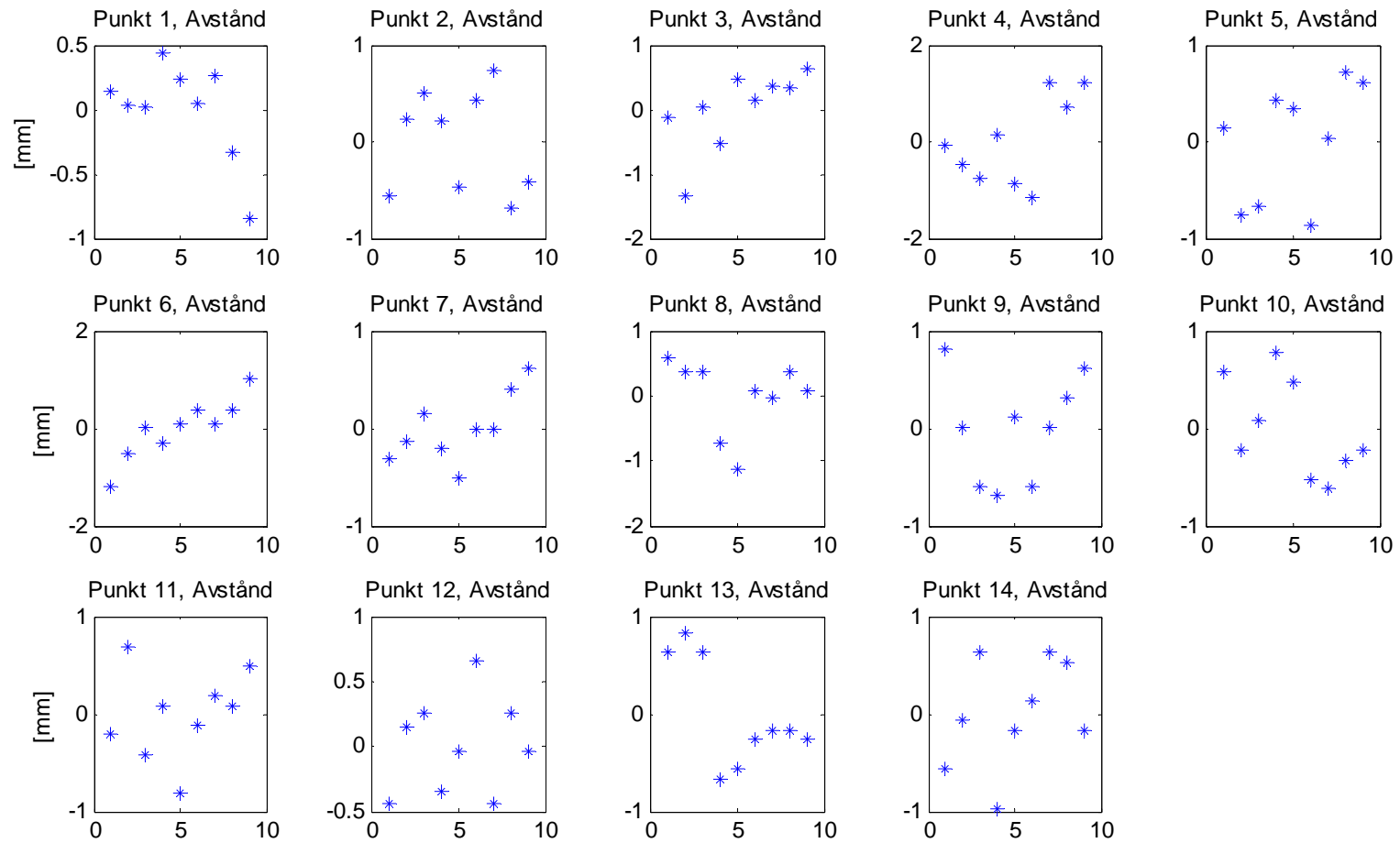
Figur 11. Variation i avståndsmätningar, station Gärdet, mätning 100707, x-axel visar tid i minuter, y-axel: avståndsvariationer i meter.



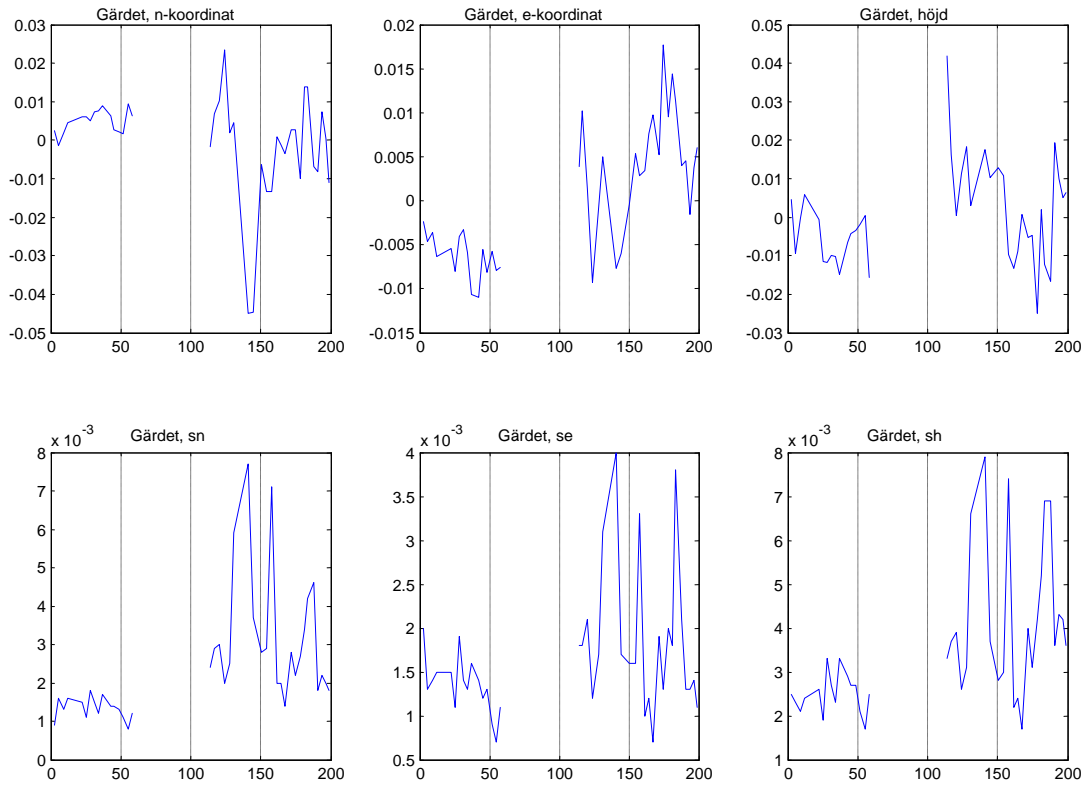
Figur 12. Variation i avståndsmätningar, station Gärdet, mätning 110707, x-axel: mätningens löpnummer, y-axel: avståndsvariationer i meter.



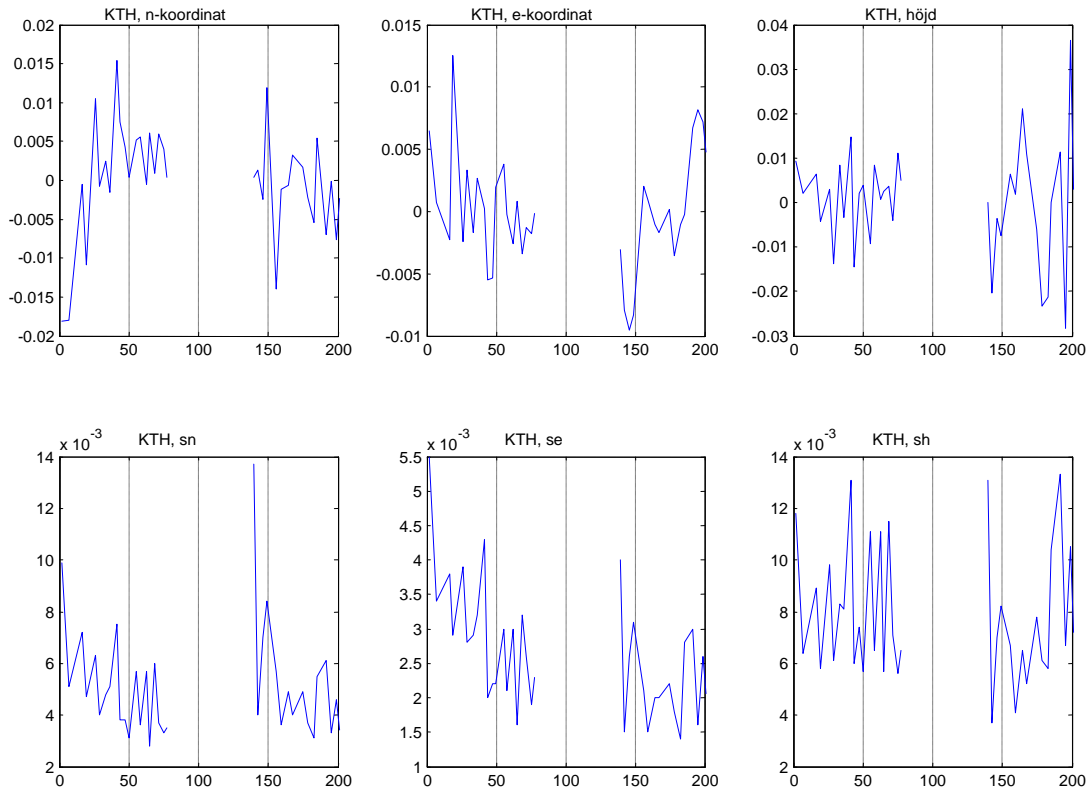
Figur 13. Variation i avståndsmätningar, station KTH, mätning 100708, x-axel: mätningens löpnummer, y-axel: avståndsvariationer i meter.



Figur 14. Variation i avståndsmätningar, station KTH, mätning 110706, x-axel: mätningens löpnummer, y-axel: avståndsvariationer i meter.



Figur 15. Variation av RTK-koordinater och deras medelfel enhet: [m]. Gärdet 100707.



Figur 16. Variation av RTK-koordinater och deras medelfel enhet: [m]. KTH 100708.