



Optimering av referensstationskonfiguration

Ragne Emardson och Per Jarlemark

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Optimering av referensstationskonfiguration

Ragne Emardson och Per Jarlemark

Abstract

Optimisation of reference site configuration

Real Time Kinematic (RTK) is a system that uses the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) for accurate positioning in real time. The idea of RTK is to receive GNSS signals with a stationary reference at a known position and using these measurements to correct the positioning data for a rover on another site where you want to determine the coordinates.

The Swedish National Transport Administration operates the Project “Stomnät i Luften (SIL)”. The project aims to create a national strategy for the RTK-based core network to achieve a more efficient process for the Transport Administration's commitments to construction projects. Within the National SWEPOS network, the distance between reference stations is typically 70 km. For example, at construction work, additional reference stations are deployed around an actual working area. The purpose of this report is to answer three main questions on how performance is affected by the combination of dense and sparse reference networks, how an optimal densification of the reference network should be designed and how accuracy is affected by the construction project spatial scale

We show by simulations that the best locations of reference stations to minimize the measurement error is next to the road. A denser network means we can combine large and small triangles in the network. The best measurements are achieved when the inner triangle is given in principle all weight. In practice it may be reasonable to add some weight to even the outer triangle for robustness reasons. For small construction projects, around 5 km, the simulation shows that the vertical measurement error from the RTK system is 3 mm and an expected total vertical measurement error is around 8 mm when including the contribution from the local rover. For large construction projects, about 70 km, the corresponding values are 5 mm and 9 mm respectively. For these situations, there is much to gain in accuracy if the installation of the rover can be done in a way that the “local effects”, such as reflections and partial blockage is minimized. The contributions from the local effects will, however, vary greatly depending on the particular position and assembly. For regional construction projects the vertical measurement error from the RTK system is 10 mm and an expected total vertical measurement error is around 12 mm.

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2011:74
ISBN 978-91-87017-06-3
ISSN 0284-5172
Borås 2011

Innehållsförteckning

Abstract	3
Innehållsförteckning	4
Förord	5
Sammanfattning	6
1 Bakgrund	7
2 Upplägg	8
3 Terminologi	9
4 Modellering	10
5 Resultat	12
5.1 Kombination av stora och små trianglar	12
5.2 Optimal nätverkskonfiguration	16
5.3 Noggrannhetsstudie	17
5.3.1 Små anläggningsprojekt	17
5.3.2 Stora anläggningsprojekt	19
5.3.3 Regionala anläggningsprojekt	21
5.4 Lokala Effekter	23
6 Slutsatser	25
7 Referenser	26

Förord

Trafikverket driver FOI-projektet Stomnät i Luften (SiL). Projektet har som mål att skapa en nationell strategi för RTK-baserade stomnät för att nå en effektivare process för Trafikverkets åtaganden. Projektet är en fortsättning på tidigare utvecklingsprojekt inom samma område. Ett exempel på resultat inom ramen för verksamheten är det system som upprättats längs väg E45 mellan Göteborg och Trollhättan. För att nå en nationell lösning har Trafikverket valt att använda SWEPOS-nätet som grund för de RTK-system som upprättas i deras regi för att nå en nationell lösning. Denna rapport är ett resultat av ett delprojekt inom SiL med syfte att studera optimal referenskonfiguration vid användning av projekt-förtätad nätverks-RTK. Projektet är utfört av SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut på beställning av Trafikverket.

Sammanfattning

Real Time Kinematisk (RTK) är ett system som utnyttjar Globala satellitbaserade navigationssystem (GNSS) för att ge exakt positionering i realtid. Idén med RTK är att ta emot GNSS-signaler med en stationär referens på en känd position och att använda dessa mätningar för att korrigera positionsdata för en rover på en annan plats vars koordinater man vill bestämma.

Trafikverket driver FOI-projektet Stomnät i Luften (SiL). Projektet har som mål att skapa en nationell strategi för RTK-baserade stomnät för att nå en effektivare process för Trafikverkets åtaganden. I det nationella SWEPOS-nätet är avståndet idag cirka 70 km mellan referensstationerna. Vid projekt-förtätad nätverks-RTK kommer ytterligare referensstationer utplaceras runt en aktuell anläggningsyta. Syftet med denna rapport är att besvara de tre huvudfrågorna hur prestanda påverkas av kombinationen av tätare och glesare referensnätverk, hur en optimal förtätning av referensnätverk bör utformas samt hur noggrannheten påverkas av projektområdets storlek

Vi visar, genom simuleringar, att den bästa placeringen av referensstationer för att minimera mätfelet är intill vägbanan. Ett förtätat nät innebär att vi får kombinerat stora och små trianglar i nätet. De bästa mätningarna uppnås om den inre triangeln får i princip all vikt. I praktiken kan det dock vara rimligt att lägga viss vikt vid även den yttre triangeln bland annat av robusthetsskäl. För små anläggningsprojekt, runt 5 km, visar simuleringarna att det vertikala mätfelet orsakat av RTK-systemet är 3 mm, medan ett förväntat totalt vertikalt mätfel är runt 8 mm när även bidraget från den lokala rovern är inräknat. För stora anläggningsprojekt, runt 70 km, är motsvarande värden 5 mm respektive 9 mm. Vid små och stora förtätningar finns alltså mycket att vinna på i mätnoggrannhet om montering av rovern kan göras så att de lokala effekterna, tex från reflektioner och signalblockering, minimeras. Bidragen från de lokala effekterna kommer dock att variera stort beroende på framförallt placering och montering av roverns antenn. För regionala anläggningsprojekt visar simuleringarna att det vertikala mätfelet från RTK-systemet är 10 mm medan ett förväntat totalt vertikalt mätfel är runt 12 mm.

1 Bakgrund

Trafikverket driver FOI-projektet Stomnät i Luften (SiL). Projektet har som mål att skapa en nationell strategi för RTK-baserade stomnät för att nå en effektivare process för Trafikverkets åtaganden. Projektet är en fortsättning på tidigare utvecklingsprojekt inom samma område. Ett exempel på resultat inom ramen för verksamheten är det system som upprättats längs väg E45 mellan Göteborg och Trollhättan. För att nå en nationell lösning har Trafikverket valt att använda SWEPOS-nätet som grund för de RTK-system som upprättas i deras regi för att nå en nationell lösning.

I SWEPOS-nätet, drivet av Lantmäteriet, är avståndet idag cirka 70 km mellan referensstationerna. Baserat delvis på resultat från CLOSE-projektet [Emardson et al., 2009] har Lantmäteriet påbörjat en förtätning av nätet i de mest tätbefolkade områdena i Sverige till ett nät med 35 km mellan referensstationerna. Med framtida satellitsystem beräknas teoretiskt att man kommer uppnå ett resultat motsvarande det som man idag får med 10 km inbördes avstånd mellan referensstationerna. I storstäder som Göteborg, Malmö och Stockholm har SWEPOS förtätats till ett 10 – 15 km nät redan nu för att tillmötesgå bland annat Trafikverkets behov fram till dess att satellitsystemen är fullt utbyggda.

Innan satellitsystemen är fullt utbyggda och även efteråt kan man tänka sig att det kommer att bli aktuellt med lokala förtätningar av SWEPOS-nätet för att täcka Trafikverkets behov.

Nedan följer några frågeställningar vid förtätning av referensnätverk:

- Ett förtätat nät innebär att användare får kombinerat stora och små trianglar i nätet. Hur kommer det att påverka prestandan dvs noggrannheten i de uppmätta koordinaterna?
- Hur ser en optimal nätverkskonfiguration ut med avseende på utplacering? Och hur stora avsteg kan man göra för att nå ett acceptabelt resultat?
- Hur bör näten konfigureras för små, stora och regionala projekt. (litet ca 5 km långt, långt 70 km långt, regionalt innebär över en stor yta motsvarande 200 km).

Denna rapport avser att svara på dessa frågor genom modellering av de olika felkällorna som påverkar mätningar med nätverks-RTK.

2 Upplägg

För att besvara de tre huvudfrågorna hur prestanda påverkas av kombinationen av tåtare och glesare referensnätverk, hur en optimal förtätning av referensnätverk bör utformas samt hur noggrannheten påverkas av projektytans omfattning är projektet uppdelat i tre arbetspaket. Alla arbetspaketen är baserade på simuleringar som genomförts med en simuleringsmjukvara framtagen på SP avsedd för nätverks-RTK.

- **Arbetspaket I Kombination av stora och små trianglar:** Ett förtätat nät innebär att vi får kombinerat stora och små trianglar i nätet. En simuleringsstudie kommer att genomföras baserat på olika storelekar på trianglar samt en kombination av en stor och en lite triangel. Vi undersöker hur det kommer att påverka noggrannheten i koordinatmätningarna. Resultaten redovisas för olika yttre förutsättningar med avseende på atmosfär.
- **Arbetspaket II Optimal nätverkskonfiguration:** Vi genomför simuleringar för att finna en optimal nätverkskonfiguration med avseende på utplacering av referensstationer. Detta genomförs för ett typfall baserat på en vägsträckning av 70 km, befintligt SWEPOS-nätverk och en förtätning med 10 ytterligare referensstationer.
- **Arbetspaket III Noggrannhetsstudie:** Vi simulerar hur förtätningar påverkar noggrannheten i koordinatmätningarna för små, stora och regionala anläggningsprojekt, givet resultatet från arbetspaket II. Arbetet baseras på nätverk av olika storlek och med varierande täthet av referensstationer. Storlekarna på anläggningsprojekten är 5 km (små), 70 km (stora) samt 200 km (regionala). Resultaten redovisas för olika yttre förutsättningar med avseende på atmosfär och lokala effekter.

Resultatet från projektet kommer att kunna användas för att ta fram en nationell för hur NRTK näten bör förtätas.

3 Terminologi

När man gör mätningar är dessa aldrig helt korrekta. De är med andra ord behäftade med fel. Normalt vid mätningar har man inte tillgång till det korrekta värdet och därför inte heller kunskap om storleken på felet. Vid mätningar används med fördel därför uttrycket mätosäkerhet som anger hur mycket det går att lita på det erhållna mätvärdet. Resultaten i denna rapport bygger på simuleringar av mätningar i olika situationer. När vi simulerar har vi, i motsats till vid mätningar, tillgång till det "sanna värdet" eftersom vi kan välja det själva. Vi kan alltså i dessa sammanhang räkna ut storleken på felet.

I denna rapport, specificerar vi alla mätfel för olika scenarior som kvadratrotten av variansen av felet. Vi föreslår att storleken på de mätfelen som presenteras i rapporterats används för att utvärdera mätosäkerheten för motsvarande utförda Nätverks-RTK mätningar. Mätosäkerheten definieras som en icke-negativ parameter som kännetecknar spridningen av den mängd värden som tillskrivs en mätstorhet, baserat på den information som används [VIM, 2008]. De presenterade mätfelen i denna rapport motsvarar standardosäkerheten i motsvarande mätningar. Dessa standardosäkerheter kan sedan multipliceras med en täckningsfaktor, k , för att få en utvidgad mätosäkerhet, U . Resultatet av mätningen kan sedan uttryckas som $Y=y \pm U$, där y kan vara till exempel höjdkomponenten i en position. Detta bör tolkas som att det uppskattade värdet på mätstorheten Y är y och att $y-U$ till $y + U$ är ett intervall som kan förväntas omfatta en stor del av fördelningen av värden som rimligen kan tillskrivas Y [GUM, 2008]. Genom att tex välja $k = 2$ får vi ett intervall med en konfidensnivå på ungefär 95%.

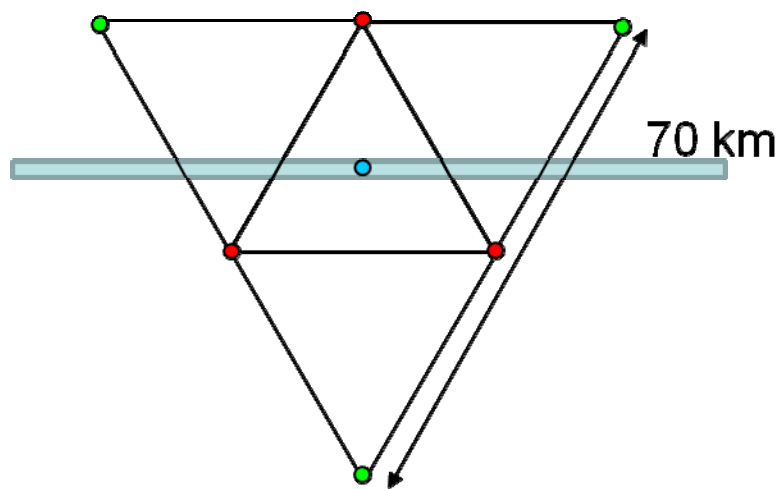
I rapporten redovisar vi ibland mätfelet längs en vägsträcka. I vissa fall anges istället ett värde för mätfelet för hela vägsträckan. Detta värde är då representativt för hela vägsträckan och uträknat som kvadratrotten ur medelvariansen hos mätfelen längs vägsträckan.

Vi hänvisar i rapporten till mätfel längs vägbanan samt placering av referensstationer utmed en väg. Resultaten i rapporten är generella i det avseendet att väg i detta fall inkluderar alla typer av vägar för fordon, inklusive järnväg.

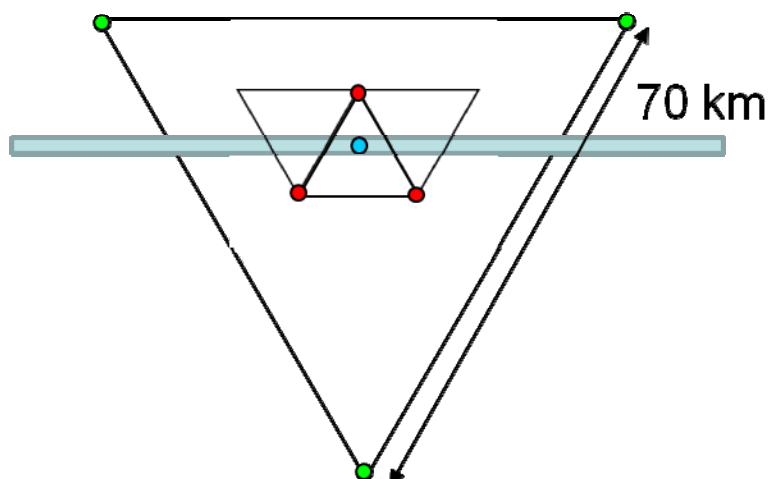
4 Modellering

Real Time Kinematic (RTK) är ett system som utnyttjar Globala satellitbaserade navigationssystem (GNSS) för att ge noggrann positionering i realtid. Den allmänna idén med RTK är att ta emot GNSS-signaler med en stationär referens på en känd position och att använda dessa mätningar för att korrigera positionsdata för en rover på en annan plats vars koordinater man vill bestämma. Den ideala signalvägen störs av jonosfären, troposfären och brister relaterade till satellitens efemerider, klockor samt lokala effekterna, som tex reflektioner (multipath) och signalblockering. Vid referensstationen jämförs den störda uppmätta signalen med en ideal signal beräknad baserat på den kända positionen. Denna skillnad används för att korrigera rovers mätningar. Eftersom referens och rover är på olika platser, har signalerna påverkats något olika och korrektionsdata för rovern innehåller därför smärre fel

I våra simuleringar, antar vi nätverkskonfigurationer som de i Figur 1 och Figur 2. Avståndet, mellan referensstationerna i det vi kallar den yttre triangeln är 70 km. Inne i denna triangeln finns de stationer som är en del av projektförtätningen. En rover placeras på en godtyckligt vald punkt längs en vägsträcka. I figuren är rovern markerad som en blå cirkel. Figur 1 visar ett fall med en större inre triangel och Figur 2 ett fall med flera mindre. I simuleringarna använder vi mätningar från sex omgivande referensstationer för att bestämma positionen för rovern. Tre av dessa bildar den inre triangeln och resten bildar en yttre triangel. Övriga antagen och detaljer ges i [Emardson et al., 2009]



Figur 1 Nätverkskonfiguration med referensstationer som formar en yttre triangel (grön) och en inre triangel (röd). Rovern är markerad inne i trianglarna längs en vägsträcka (blå).



Figur 2 Nätverkskonfiguration med referenstationer som formar en yttre triangel (grön) och en inre triangel (röd). Rovern är markerad inne i triangelarna längs en vägsträcka (blå).

De huvudsakliga felkällorna vid GPS-mätningar är osäkerhet i satelliternas banor och kunskap om deras klockor, jonosfär, troposfär, samt lokala effekter så som .I *Emardson et al.*, [2009] visar vi att felen från satelliternas banor och klockor är obetydliga vid mätningar med nätverks-RTK. Vi koncentrerar oss därför i denna rapport endast på de tre senare.

Jonosfären är den övre del av atmosfären (ca 100-1000 km) som joniseras av solstrålningen. Den är ett dispersivt medium vid GNSS-frekvenser. Detta innebär att brytningsindex varierar beroende på signalens frekvens. En konsekvens av denna egenskap är att GPS-signalen påverkas olika mycket på L1 och L2. Därav ges en teknik för att ta bort en stor del av bidraget från jonosfären genom att bilda en linjärkombination av observationerna på L1 och L2. Denna kallas normalt för L3-kombinationen [t.ex. *Hoffman-Wellenhof et al*, 1994]. En annan vanlig metod är att bara använda L1-mätningar vilket ofta är fördelaktigt för korta avstånd mellan rover och referensstationer eftersom denna metod då ger mindre totala fel än vid användning av L3.

Troposfären är den nedre delen av atmosfären. Till skillnad från Jonosfären har den inte en dispersiv effekt på signalerna vid GNSS-frekvenser. Detta innebär att signalerna på L1 och L2 påverkas på samma sätt av utbredningen genom troposfären. Det är därför inte möjligt att bilda en linjärkombination av observationerna för att reducera dess effekt.

Lokala effekter är ett samlingsnamn för reflektioner i antennens omgivning och eventuella radomer som används för skydd av antennen. I denna rapport delar vi upp de lokala effekterna i de som härstammar från referensstationerna och därför kan ses som en del av nätverks-RTK-systemet och de som kommer från den lokala rovern. Bidraget från den lokala rovern kan variera mycket mellan olika mätsituationer då den påverkas av dess antennmiljö. *Emardson et al.*, [2009] visar att felbidraget från de lokala effekterna ofta är mycket stor vid L3-mätningar.

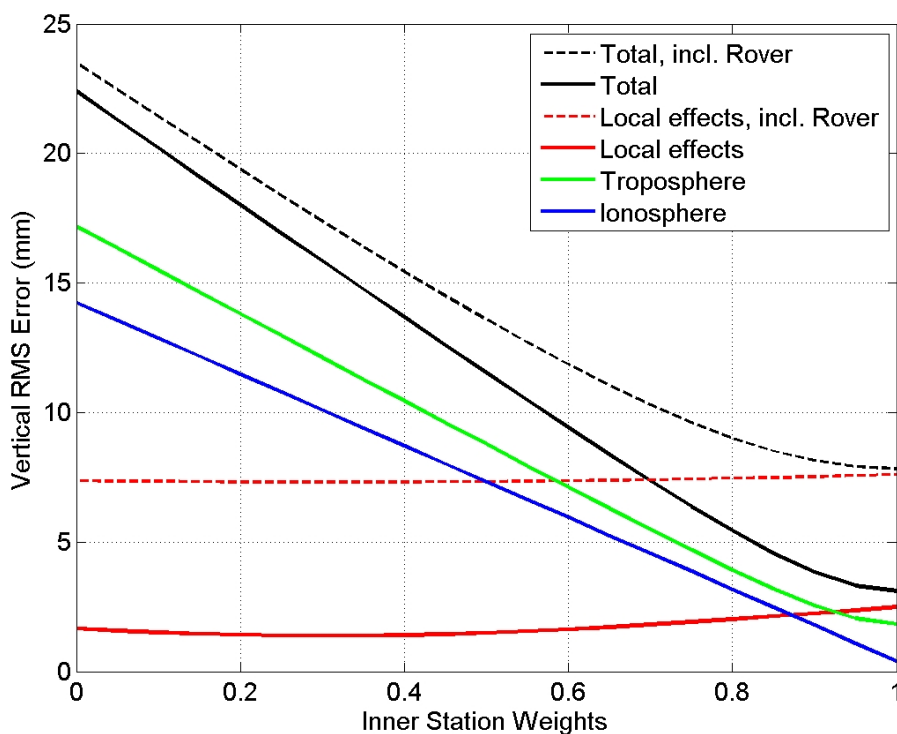
5 Resultat

5.1 Kombination av stora och små trianglar

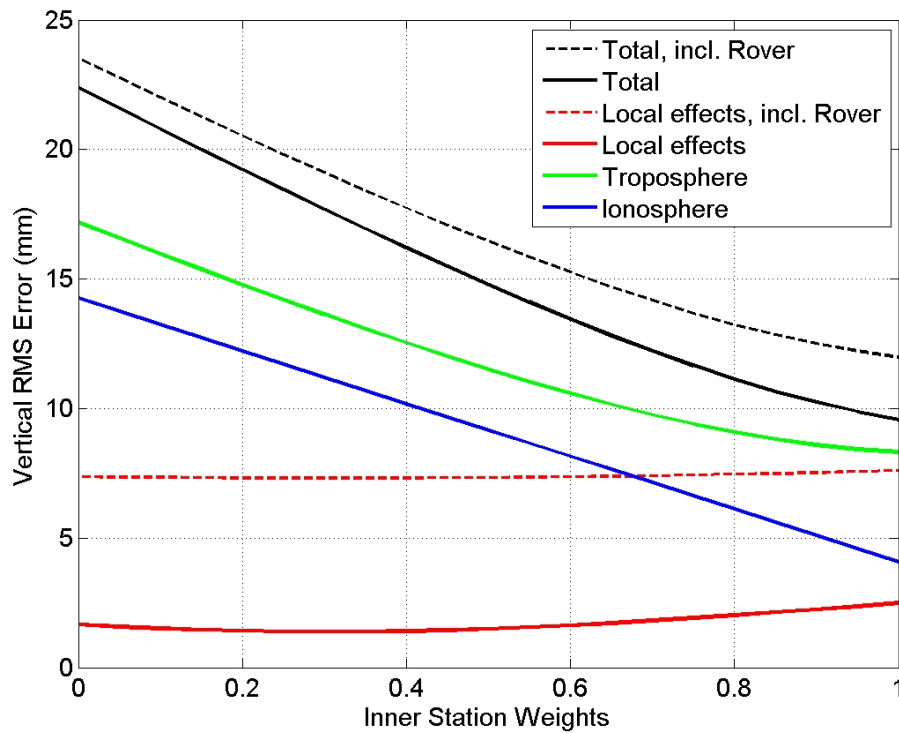
Ett förtätat nät innebär att vi får kombinerat stora och små trianglar i nätet. Vi har genomfört en simuleringsstudie med på olika kombinationer av storlekar på trianglar. Vi har undersökt hur det påverkar noggrannheten i koordinatmätningarna

Figur 3 visar storleken på mätfelet som funktion av hur viktningen läggs på den yttre respektive inre triangeln. Felen är här uppdelade i bidragen från de stora felkällorna samt summerade i ett totalt felbidrag. Avståndet mellan stationerna som formar den inre triangeln är här 2 km. Figur 4 visar på samma sätt storleken på mätfelet som funktion av hur viktningen läggs på den yttre respektive inre triangeln. Här är avståndet mellan stationerna som formar den inre triangeln är här 20 km.

Båda figurerna visar att de bästa mätningarna uppnås om den inre triangeln får i princip all vikt. I praktiken kan det dock vara rimligt att lägga viss vikt vid även den yttre triangeln bland annat av robusthetsskäl. Vi har i fortsättningen använt en viktning med 95% vikt vid den inre triangeln och 5% vikt av den yttre.

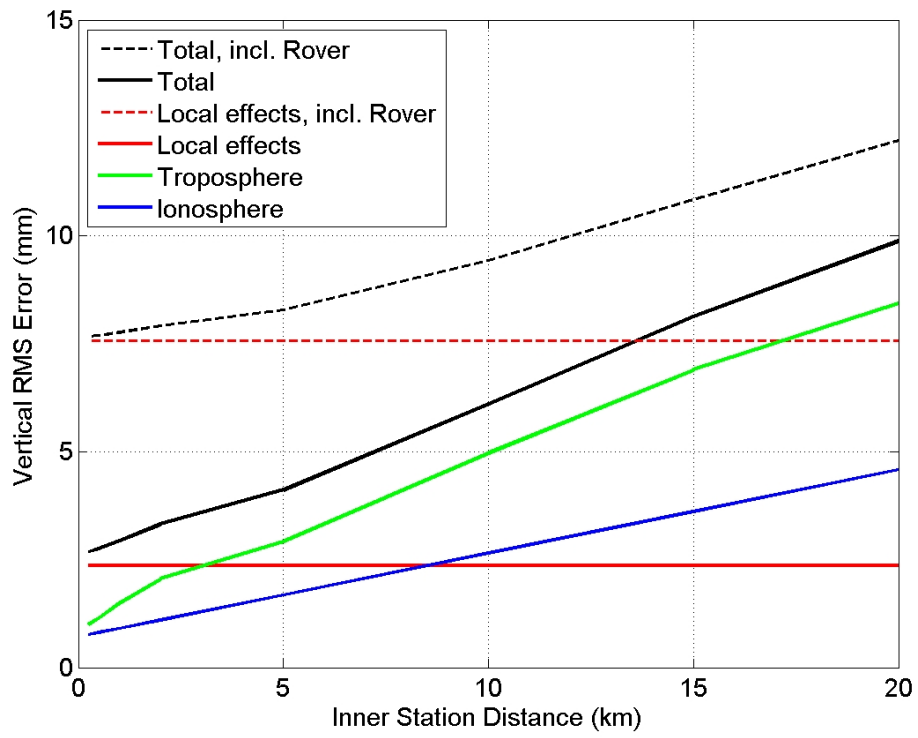


Figur 3 Vertikalt mätfel som funktion av viktningen på den inre triangeln. Avståndet mellan stationerna i den inre triangeln är 2 km medan stationsavståndet i den yttre triangeln är 70 km.



Figur 4 Vertikalt mätfel som funktion av viktningen på den inre triangeln. Avståndet mellan stationerna i den inre triangeln är 20 km medan stationsavståndet i den yttre triangeln är 70 km.

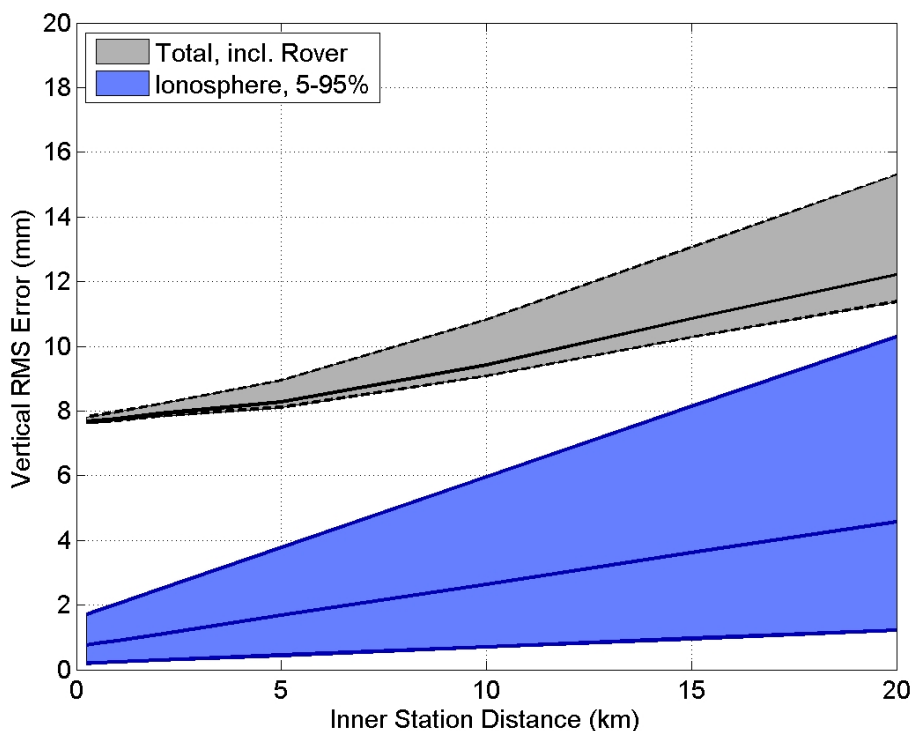
Mot bakgrund av valet av 95% viktning på den inre triangeln, vill vi nu studera hur de olika felkällornas bidrag förändras med storleken på den inre triangeln. Resultatet visas i Figur 5. Både troposfärs- och jonosfärsbidraget varierar med stationsavståndet, medan naturligt nog de lokala effekternas bidrag inte förändras.



Figur 5 Vertikalt mätfel som funktion av storleken på den inre triangeln.

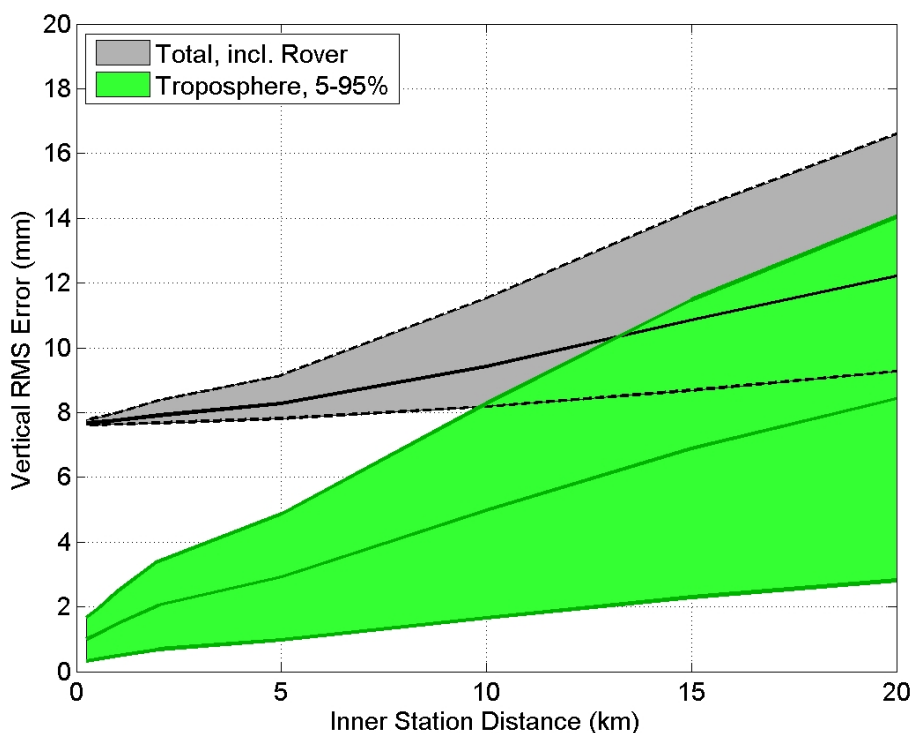
Både troposfärs- och jonosfärsbidraget varierar med tiden, tex årstids- och dygns växlingar. Från *Emardson et al [2009]* har vi hämtat 5% och 95% värdena i de statistiska fördelningsfunktionerna över de båda felkällornas variationer. I Figur 6 och Figur 7 visas genomslaget av felkällornas variationer i det totala vertikala felet.

Figur 6 visar vertikalt mätfel som funktion av storleken på den inre triangeln. Den blå ytan motsvarar bidraget från jonosfären och den grå ytan ger hela felet. Den undre delen av respektive yta motsvarar låg variabilitet (5%) i jonosfären och den övre delen motsvarar hög variabilitet (95%).



Figur 6 Vertikalt mätfel som funktion av storleken på den inre triangeln. Den blå ytan motsvarar bidraget från jonosfären och den grå ytan ger hela felet. Den undre delen av respektive yta motsvarar låg variabilitet i jonosfären och den övre delen motsvarar hög variabilitet.

Figur 7 visar vertikalt mätfel som funktion av storleken på den inre triangeln. Den gröna ytan motsvarar bidraget från troposfären och den grå ytan ger hela felet. Den undre delen av respektive yta motsvarar låg variabilitet (5%) i troposfären och den övre delen motsvarar hög variabilitet (95%).

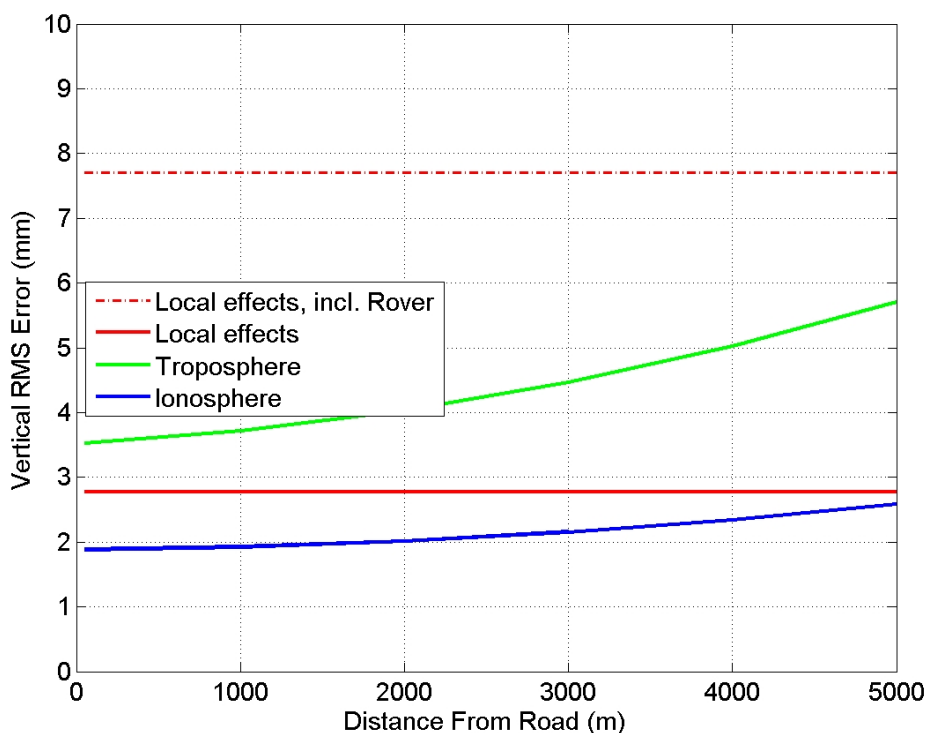


Figur 7 Vertikalt mätfel som funktion av storleken på den inre triangeln. Den gröna ytan motsvarar bidraget från troposfären och den grå ytan ger hela felet. Den undre delen av respektive yta motsvarar låg variabilitet i troposfären och den övre delen motsvarar hög variabilitet.

5.2 Optimal nätverkskonfiguration

Vi har genomfört simuleringar för att finna en optimal nätverkskonfiguration med avseende på utplacering av referensstationer. Detta gjordes för ett typfall baserat på en vägsträckning av 70 km, befintligt SWEPOS-nätverk och en förtätning med 10 ytterligare referensstationer längs vägsträckan. Alla de 10 extra referensstationerna placerades med samma avstånd till vägbanan, 5 stationer på vardera sidan av vägen. Vi har sedan varierat detta avstånd för att finna hur långt från vägen referensstationerna bör placeras.

Figur 8 visar mätfelet som funktion av referensstationernas avstånd till vägbanan, från 50m till 5km. Den optimala utplaceringen av referensstationerna är alltså så nära vägbanan som möjligt. Det kan finnas andra fördelar ur samhällssynpunkt att placera referensstationerna en bit ifrån vägen. Samtidigt framgår det att ökningen i felet är relativt litet upp till 1 km. Diskussionen om andra eventuella vinster ur samhällssynpunkt ligger utanför fokus för denna rapport.



Figur 8 Mätfel som funktion av referensstationernas avstånd till vägen

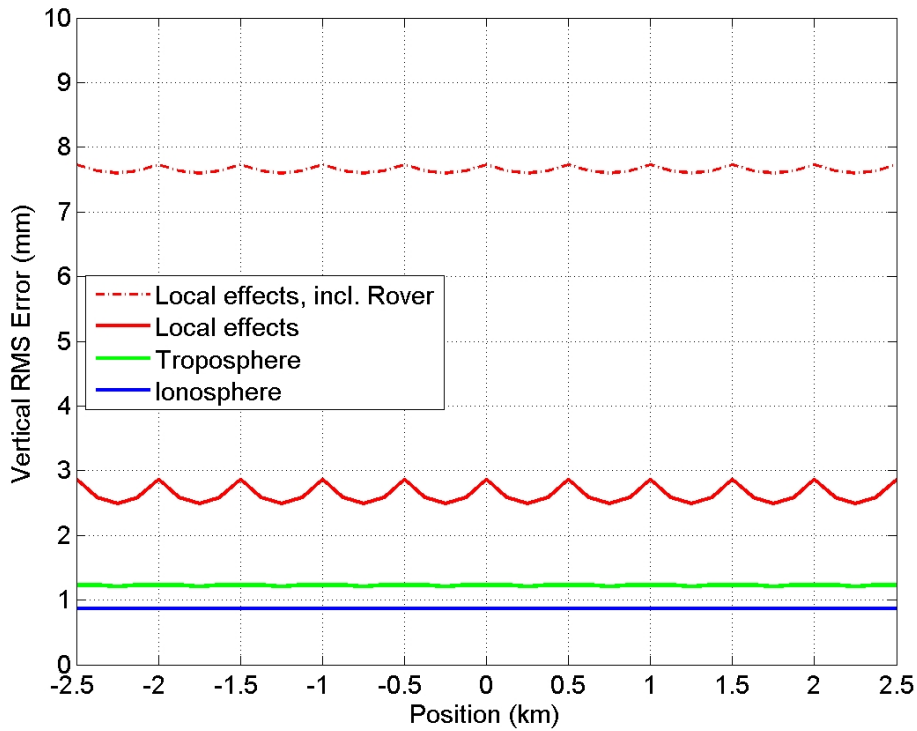
5.3 Noggrannhetsstudie

Vi har simulerat hur förtätningar påverkar noggrannheten i positionsmätningarna för små, stora och regionala anläggningsprojekt. Storlekarna på anläggningsprojekten är 5 km (små), 70 km (stora) samt 200 km (regionala). I samtliga fall ha vi simulerat att tio extra referensstationer har placerats ut längs vägsträckan. Alla de extra referensstationerna är placerade 50 m från vägbanan varav 5 på ena sida av vägen och 5 på andra sidan av vägen.

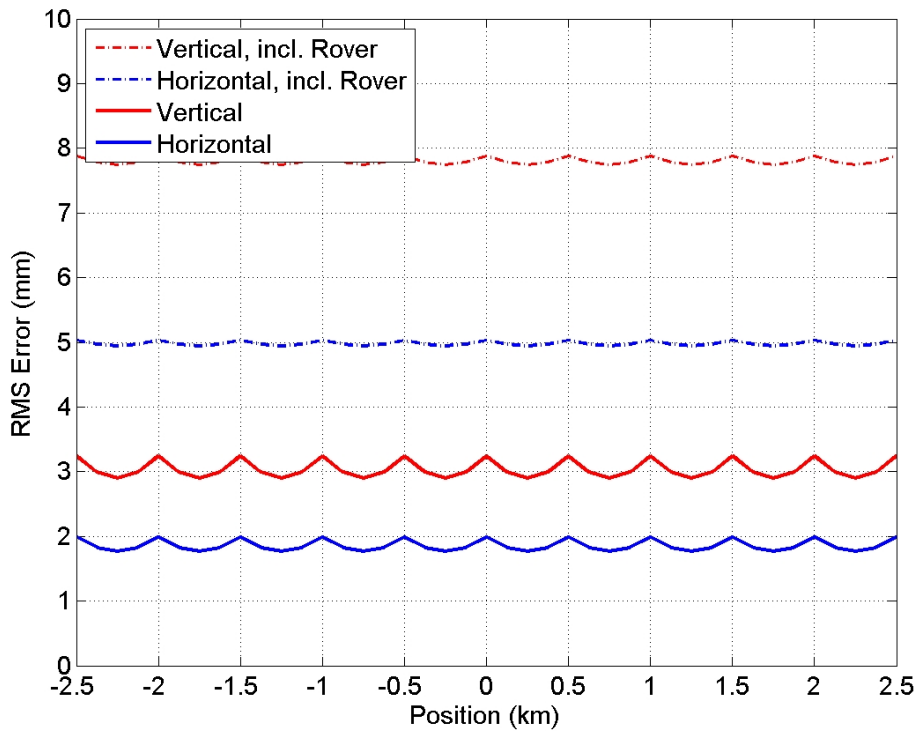
5.3.1 Små anläggningsprojekt

Figur 9 visar bidragen till det vertikala mätfelet längs en 5 km lång vägsträcka från de olika felkällorna. Störst är bidraget från den lokala rovern, därefter följer de lokala effekterna hos referensstationerna. Figur 10 visar den sammanlagda effekten av dessa felkällor, dvs storleken på mätfelet längs vägsträckningen. De heldragna kurvorna visar mätfelet för vertikala respektive horisontella mätningar. De streckade kurvorna visar det totala felet vid dessa mätningar då även bidraget från den lokala rovern är inräknad. Tabell 1 visar dessa resultat i siffror. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna härrörande från Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern. Tabell 2 visar motsvarande resultat för det horisontella mätfelet. Ser man på mätfelet från endast RTK-systemet, så är de lokala effekterna från referensstationerna den dominerande felkällan. Det är dock viktigt att notera att vid en stor förtätning kommer bidraget från den lokala rovern med all säkerhet vara det största problemet vid mätningarna. Figur 10 visar till exempel hur det vertikala mätfelet från RTK-systemet endast är 3 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 8 mm. Bidragen från de lokala effekterna kommer att variera stort beroende på framförallt placering och montering. Vid stora förtätningar finns alltså mycket att vinna på i mättnoggrannhet om montering av rovern kan göras så att de lokala effekterna minimeras. Det kan också sägas att vinsten med att ha ett så tätt extra nät är mycket

begränsad. Detta inses genom att felbidraget från referensstationerna dominerar över atmosfärsbidragen vilka är de som minskas genom att nätet förtätas.



Figur 9 Vertikalt mätfel längs en 5 km lång vägsträcka baserat på en stor förtätning. En uppdelning är gjord på de olika felkällorna.



Figur 10 Vertikalt och horisontellt mätfel längs en 5 km lång vägsträcka baserat på en stor förtätning

Tabell 1 Sammanfattning av de vertikala mätfele vid en stor förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

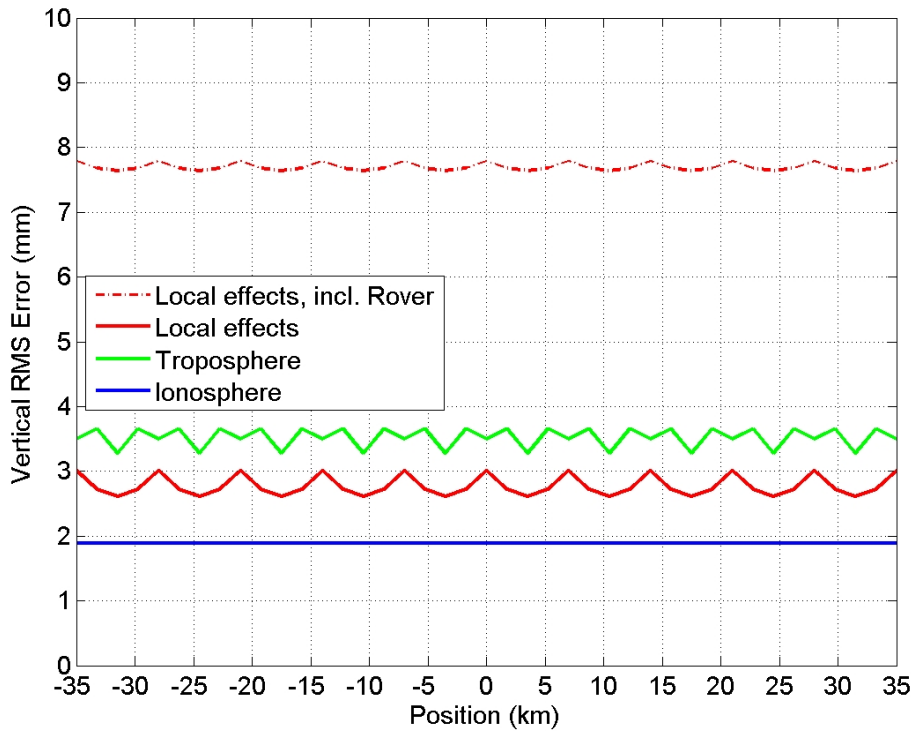
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	2.6	7.7
Troposfär	1.2	1.2
Jonosfär	0.9	0.9
Totalt	3.0	7.8

Tabell 2 Sammanfattning av de horisontella mätfele vid en stor förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

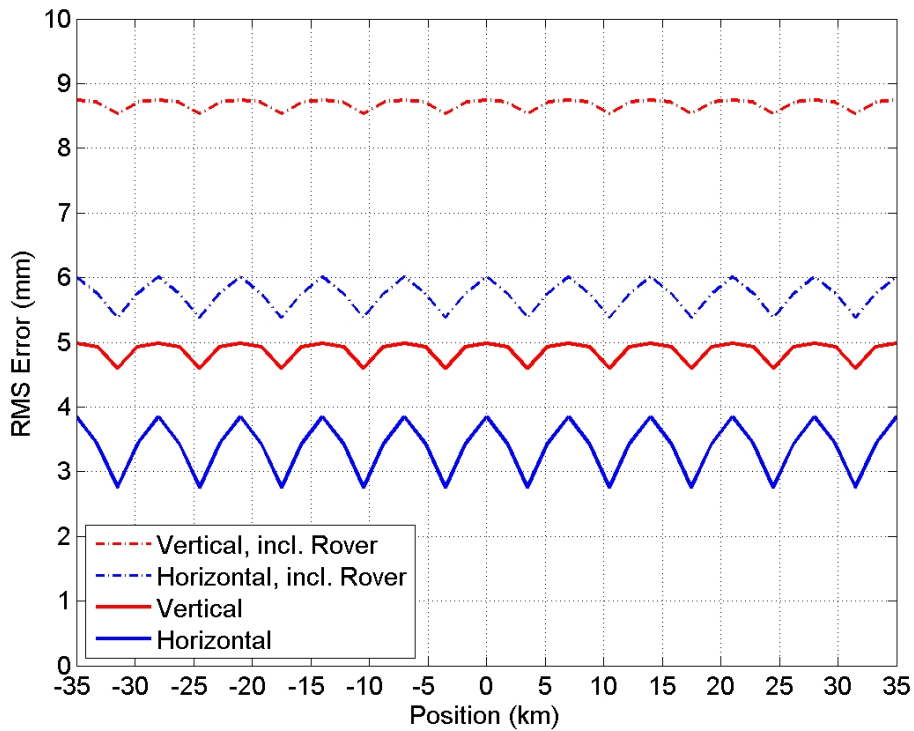
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	1.7	4.9
Troposfär	0.5	0.5
Jonosfär	0.6	0.6
Totalt	1.9	5.0

5.3.2 Stora anläggningsprojekt

Figur 11 visar bidragen till det vertikala mätfelet längs en 70 km lång vägsträcka från de olika felkällorna. Störst är bidraget från den lokala rovern, därefter följer troposfärspåverkan. Figur 12 visar den sammanlagda effekten av dessa felkällor, dvs storleken på mätfelet längs vägsträckningen. De heldragna kurvorna visar mätfelet för vertikala respektive horisontella mätningar. De streckade kurvorna visar det totala felet vid dessa mätningar då även bidraget från den lokala rovern är inräknad. Tabell 3 visar dessa resultat i siffror. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna härrörande från Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern. Tabell 4 visar motsvarande resultat för det horisontella mätfelet. Ser man på mätfelet från endast RTK-systemet, så är troposfären den dominerande felkällan. Bidraget från de lokala effekterna vid referensstationerna, som dominerade vid den stora förtätningen, är av ungefär samma storlek. Även vid en mellanstor förtätning kommer bidraget från den lokala rovern med all säkerhet vara det största problemet vid mätningarna. Figur 12 visar till exempel hur det vertikala mätfelet från RTK-systemet endast är 5 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 9 mm. Här gäller alltså samma slutsats som vid en stor förtätning att det finns alltså mycket att vinna på i mätnoggrannhet om montering av rovern kan göras så att de lokala effekterna minimeras.



Figur 11 Vertikalt mätfel längs en 70 km lång vägsträcka baserat på en mellan förtätning. En uppdelning är gjord på de olika felkällorna.



Figur 12 Horisontellt och vertikalt mätfel längs en 70 km lång vägsträcka baserat på en mellan förtätning

Tabell 3 Sammanfattning av de vertikala mätfele vid en mellan förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

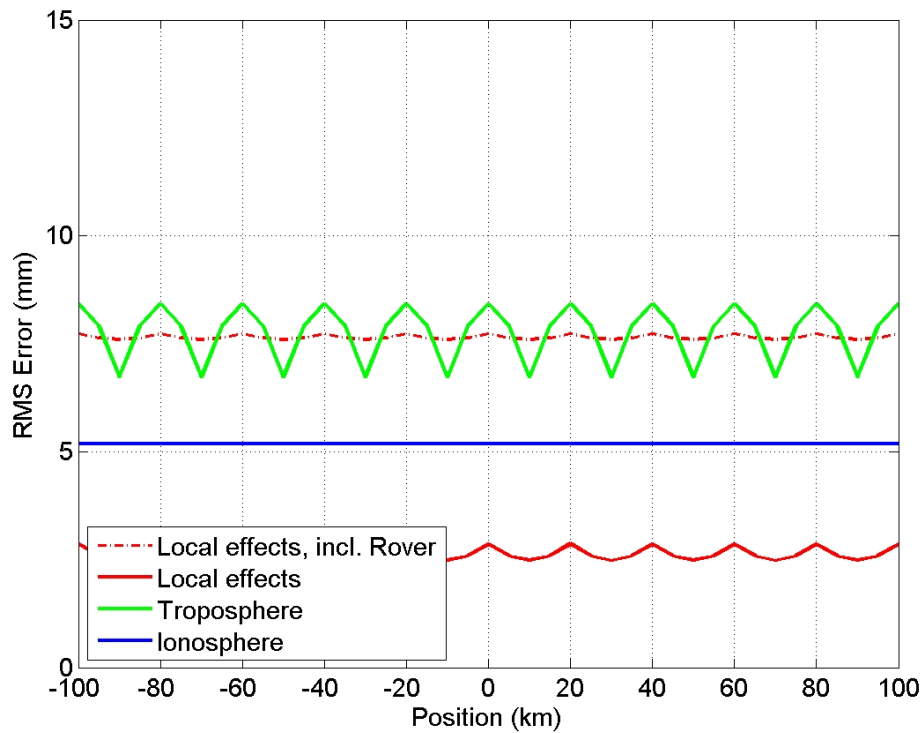
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	2.6	7.7
Troposfär	3.5	3.5
Jonosfär	1.9	1.9
Totalt	4.8	8.7

Tabell 4 Sammanfattning av de horisontella mätfele vid en mellan förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

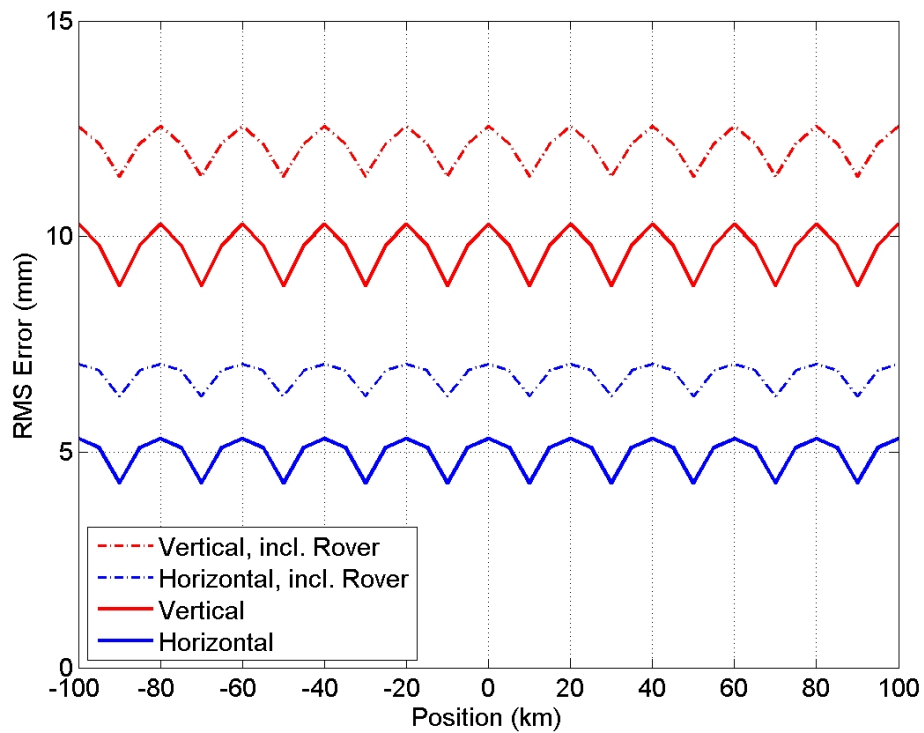
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	1.7	4.9
Troposfär	2.6	2.6
Jonosfär	1.2	1.2
Totalt	3.3	5.7

5.3.3 Regionala anläggningsprojekt

Figur 13 visar bidragen till det vertikala mätfelet längs en 200 km lång vägsträcka från de olika felkällorna. Störst är bidraget från troposfären tillsammans med de totala lokala effekterna. Figur 14 visar den sammanlagda effekten av dessa felkällor, dvs storleken på mätfelet längs vägsträckningen. De heldragna kurvorna visar mätfelet för vertikala respektive horisontella mätningar. De streckade kurvorna visar det totala felet vid dessa mätningar då även bidraget från den lokala rovern är inräknad. Tabell 5 visar dessa resultat i siffror. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna härrörande från Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern. Tabell 6 visar motsvarande resultat för det horisontella mätfelet. Ser man på mätfelet från endast RTK-systemet, så är troposfären den dominerande felkällan. Totalt sett vad det gäller mätningarna så är det förväntade bidraget från troposfären och de lokala effekterna hos rovern av samma storlek. Det vertikala mätfelet från RTK-systemet är 10 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 12 mm. Även vid regionala anläggningar är alltså monteringen av rover-antennen viktig, dock inte av samma betydelse för de större förtätningarna.



Figur 13 Vertikalt mätfel längs en 200 km lång vägsträcka baserat på en gles förtätning. En uppdelning är gjord på de olika felkällorna.



Figur 14 Vertikalt mätfel längs en 200 km lång vägsträcka baserat på en gles förtätning.

Tabell 5 Sammanfattning av de vertikala mätfelen vid en gles förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

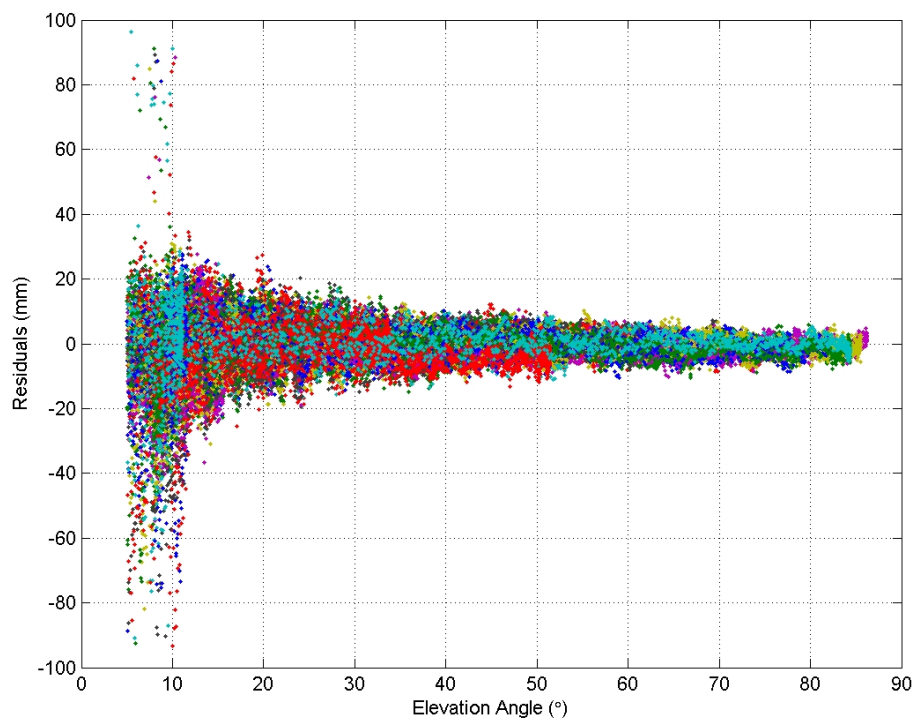
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	2.6	7.7
Troposfär	7.8	7.8
Jonosfär	5.2	5.2
Totalt	9.7	12.1

Tabell 6 Sammanfattning av de horisontella mätfelen vid en gles förtätning. Tabellen är uppdelad i två kolumner: den vänstra visar bidragen från de olika felkällorna tillhörande Nätverks-RTK-systemet samt ett totalt mått på mätfelet baserat på dessa fel. Den högra kolumnen visar de totala felbidragen vid mätningarna inklusive bidraget från rovern.

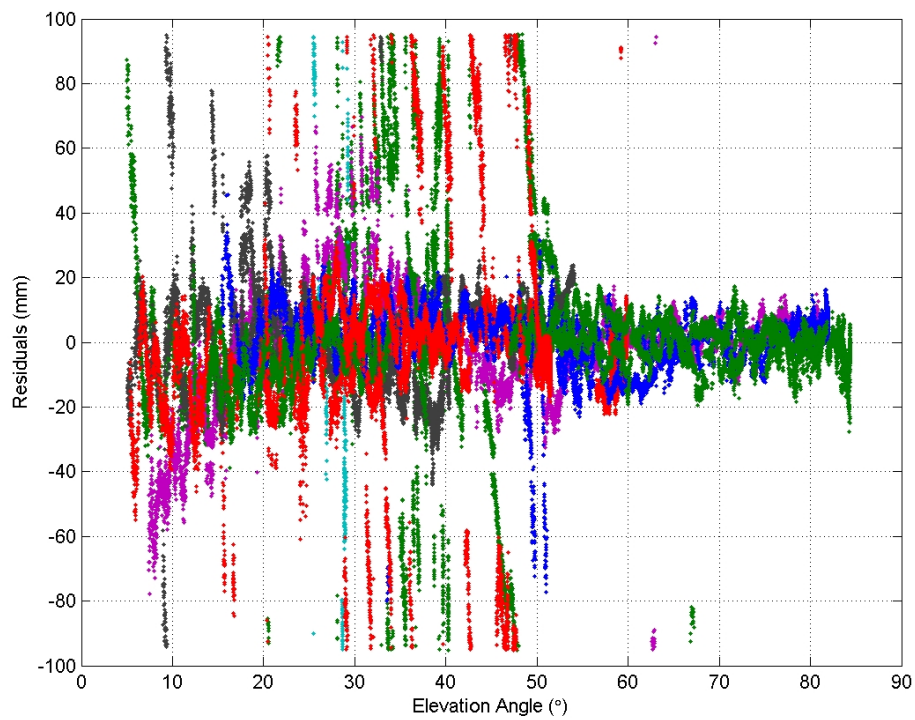
Felkälla	Nätverks-RTK Storlek (mm)	Rover + Nätverks-RTK Storlek (mm)
Lokala effekter	1.7	4.9
Troposfär	3.2	3.2
Jonosfär	3.4	3.4
Totalt	5.0	6.8

5.4 Lokala Effekter

Vi har sett att vid förtätningar som förekommer vid projektanpassad nätverks-RTK så kommer bidraget från den lokala rovern i många fall att vara det största problemet vid mätningarna. Slutsatsen är alltså att vid förtätning finns det mycket att vinna på i mätnoggrannhet om montering av roverna antenner kan göras så att de lokala effekterna minimeras. De lokala effekterna kommer att variera stort beroende på montering av antenner samt antennens omgivning. Dessa effekter kan därför vara svåra att förutsäga och statistiskt beskriva. Figur 15 och Figur 16 visar exempel på hur de lokala effekterna kan se ut vid två olika fall av antenn-placering. Figuren visar i huvudsak bruset på signalerna som skall användas för positionsbestämning. Möjligheterna till goda resultat varierar stort mellan de två illustrerade fallen.



Figur 15 Residualer från L1-fas-observationer från en relativt ostörd miljö[*Emardson et al., 2009*].



Figur 16 Residualer från L1-fas-observationer från en störd miljö[*Emardson et al., 2009*].

6 Slutsatser

Vi har genomfört simuleringar för att finna en optimal nätverkskonfiguration med avseende på utplacering av referensstationer. Detta har baserats på ett typfall med en vägsträckning av 70 km, ett befintligt SWEPOS-nätverk och en förtätning med 10 ytterligare referensstationer. Simuleringarna visar att den bästa placeringen av referensstationer för att minimera mätfelet är intill vägbanan.

Ett förtätat nät innebär att vi får kombinerat stora och små trianglar i nätet. En simuleringsstudie har genomförts baserat på olika storelekar på trianglar samt en kombination av en stor och en lite triangel. Vi har undersökt hur det påverkar noggrannheten i positionsmätningarna. De bästa mätningarna uppnås om den inre triangeln får i princip all vikt. I praktiken kan det dock vara rimligt att lägga viss vikt vid även den yttre triangeln bland annat av robusthetsskäl.

Vi har simulerat hur förtätningar påverkar noggrannheten i positionsmätningarna för små, stora och regionala anläggningsprojekt. Storlekarna på anläggningsprojekten är 5 km (små), 70 km (stora) samt 200 km (regionala). I simuleringarna har 10 extra referensstationer placerats ut längs en vägsträcka av respektive längd. För små anläggningsprojekt visar simuleringarna att det vertikala mätfelet från RTK-systemet är 3 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 8 mm när även bidraget från den lokala rovern är inräknat. Bidragen från de lokala effekterna kommer att variera stort beroende på framförallt placering och montering av antennerna. Vid stora förtätningar finns alltså mycket att vinna på i mätnoggrannhet om montering av rovers antenn kan göras så att de lokala effekterna minimeras.

För stora anläggningsprojekt visar simuleringarna att det vertikala mätfelet från RTK-systemet är 5 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 9 mm. Här gäller alltså samma slutsats som vid en stor förtätning att det finns alltså mycket att vinna på i mätnoggrannhet om montering av rovern kan göras så att de lokala effekterna minimeras.

För regionala anläggningsprojekt visar simuleringarna att det vertikala mätfelet från RTK-systemet är 10 mm medan ett förväntat totalt mätfel är runt 12 mm.

7 Referenser

Emardson, R., Jarlemark, P.O.J, Bergstrand S., Nilsson T., and Johansson J., Measurement Accuracy in Network-RTK, SP report 2009:23, ISBN 978-91-86319-10-6, 2009.

GUM, JCGM WG1 GUM – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, JCGM 100:2008.

<http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html>.

Hoffman-Wellenhof B., H. Lichtenegger, and J. Collins, GPS: Theory and practice, *Springer Verlag, New York*, 1994.

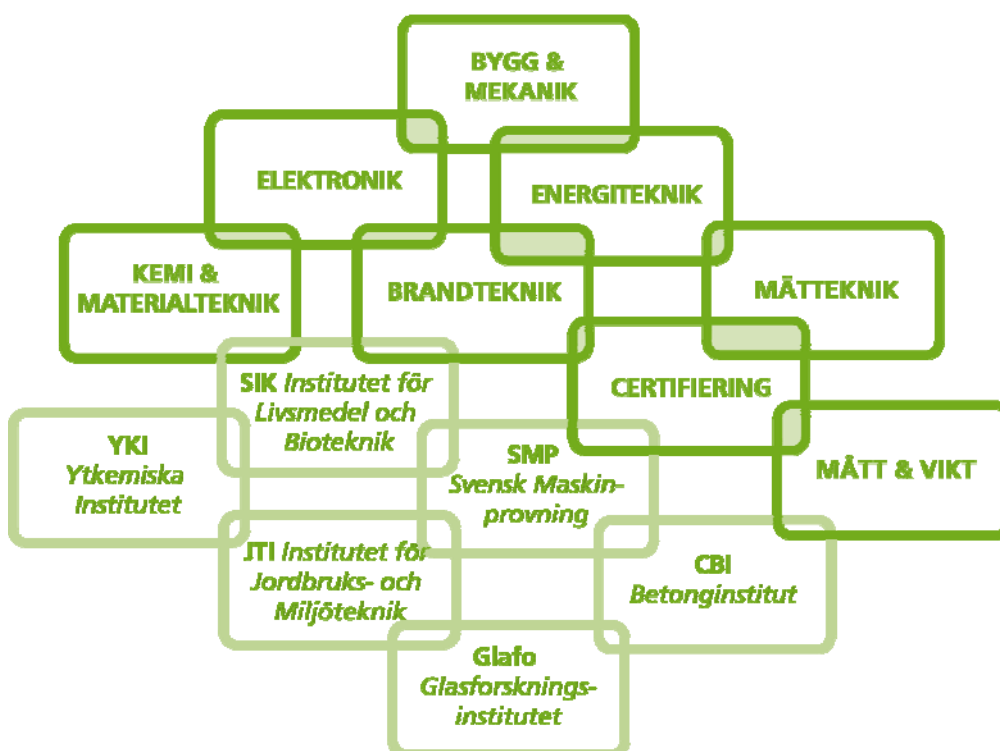
VIM 2008 International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM), *Joint Committee on Guides in Metrology (JCGM)*, 2008.

<http://www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html>,

http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_200_2008.pdf

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Vi arbetar med innovation och värdeskapande teknikutveckling. Genom att vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling har vi stor betydelse för näringslivets konkurrenskraft och hållbara utveckling. Vår forskning sker i nära samarbete med universitet och högskolor och bland våra cirka 9000 kunder finns allt från nytänkande småföretag till internationella koncerner.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Mer information om SP:s publikationer: www.sp.se/publ

Mätteknik

SP Rapport 2011:74

ISBN 978-91-87017-06-3

ISSN 0284-5172