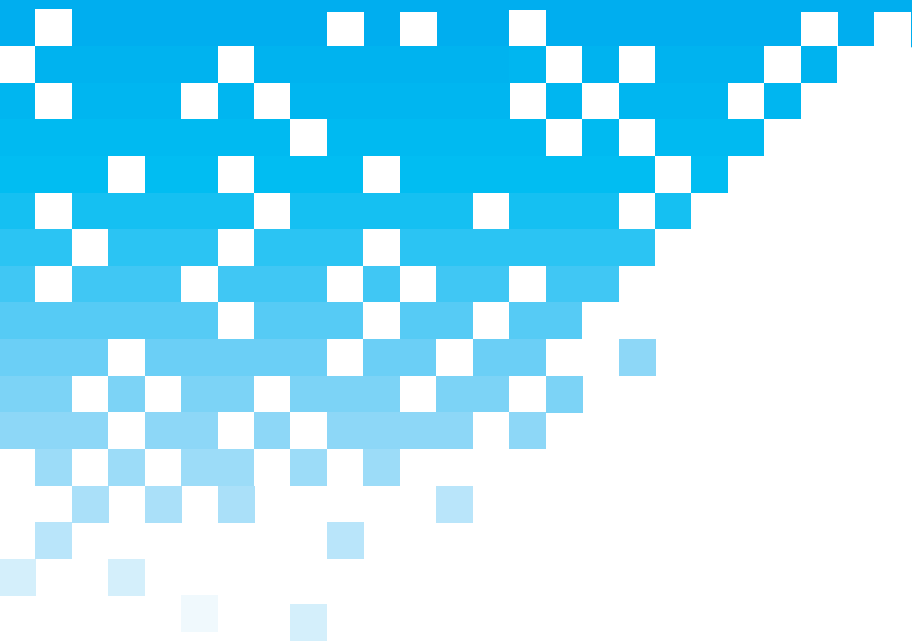


HMK
- handbok i mät- och kartfrågor

Geodesi: Stommätning

2015



Innehållsförteckning

1	Inledning	4
1.1	Hänvisningar till andra dokument	5
2	Stommätning	7
2.1	Stompunkter – stomnät	7
2.2	Terrester stommätning	8
2.3	Stommätning med GNSS	8
2.3.1	Statisk mätning	9
3	Stomnätsprojekt	10
3.1	Nätutformning	10
3.2	Nätanalys	10
3.3	Genomförande	11
4	Terrester stommätning	12
4.1	Förberedelser och mätning	12
4.2	Beräkning av terrestra stommätningar	14
4.2.1	Korrekationer innan utjämning	14
4.2.2	Nätutjämning	15
4.2.3	Resultatutvärdering och kontroller	17
5	Stommätning med GNSS	22
5.1	Förberedelser och mätning	22
5.1.1	Uppstart av statisk mätning	24
5.1.2	Mätsessioner	25
5.1.3	Att beakta vid statisk mätning	26
5.1.4	Tillsyn	26
5.1.5	Efterarbete	27
5.2	Beräkning av GNSS-mätningar	27
5.2.1	Baslinjeberäkningar	30
5.2.2	Utvärdering och kontroller av baslinjer	32
5.2.3	Nätutjämning	36
5.3	SWEPOS beräkningstjänst	38
5.3.1	Beräkning, analys och kontroll	38

6	Kombinerade tekniker vid stommätning	41
6.1	Underhåll och förtätning av stomnät	41
6.2	Beräkning med kombinerade tekniker	42
7	Dokumentation och redovisning	43
7.1	Dokumentation av mätprocessen	43

Förord

HMK-Geodesi 2015 består av fyra dokument som tillsammans utgör HMK-Geodesi, samt ett femte dokument som tillkommer vid 2016 års revidering.

Arbetet med *HMK-Geodesi: Stommätning* har huvudsakligen utförts av Stig-Göran Mårtensson och Mohammad Bagherbandi, Högskolan i Gävle.

HMK-Geodesi har varit tillgängligt för remiss under två perioder, i mars 2015 samt i november 2015.

Under 2016 kommer dokumenten att genomgå en revision i samband med att *HMK-Geodesi Teknisk specifikation och metodval* tas fram.

Gävle 2016-02-03

Anders Alfredsson
Projektledare Geodesi

[Samlade förord](#)

1 Inledning

Information

Stompunkter utgör grund för annan mätning.

Stompunkter skapas vid stommätning och ansluts till ett existerande referenssystem.

HMK-Geodesi: Stommätning beskriver processer och krav som bör beaktas vid etablering av stompunkter med terrester- och/eller GNSS-teknik.

Innehållet i stommätningens dokumentet är av grundläggande natur och avser i första hand mätningar i de näthierarkier som definierades i 1990s utgåva av motsvarande HMK-dokument, dvs. anslutningsnät och bruksnät. Bruksnät som kräver speciell hänsyn har efter hand fått egna benämningar som anger behovet, som t.ex. Bruksnät för bostadsbyggnad och markarbete, Bruksnät för spåranläggning och Bruksnät för rörelse- och sättningsmätningar. Dessa bruksnät kan sammanfattas som specialnät och avhandlas inte explicit i det här dokumentet då de finns beskrivna i tekniska specifikationen SIS-TS 21143.

1.1 Hänvisningar till andra dokument

Information

Dokumenterna SIS-TS 21143 och HMK-Geodesi: GNSS-baserad detaljmätning är fritt tillgängliga på SIS, Swedish Standards Institute, hemsida www.sis.se, respektive på Lantmäteriets hemsida www.lantmateriet.se.

Andemeningen med det här dokumentet är att ge råd och anvisningar om utförande av stommätning som den bedrivs i nutid, och i nära framtid.

Mycket av det som finns om stommätning i gamla HMK-dokument, som t.ex. i HMK-Ge:GPS och HMK-Ge:S, gäller fortfarande, annat är föråldrat beroende på framför allt teknikutveckling.

Ett modernare dokument i vilket teknikutvecklingen uppmärksammats är SIS-TS 21143. Det är en teknisk specifikation som initierades av Trafikverket för att täcka deras behov avseende geodetisk mätning, beräkning och redovisning av långsträckta objekt. I den ges rekommendationer baserade på sentida teknik-, system- och metodutveckling och beprövade erfarenheter med dem, varför valet har gjorts att tills vidare hänvisas till SIS-TS 21143 i det här dokumentet.

I SIS-TS 21143 hänvisas i sin tur till vissa delar i gamla HMK, varför det kanske kommer att upplevas som aningen förvirrande med "rund-

gången” som uppstår mellan gamla HMK, nya HMK och SIS-TS. Tills vidare får vi leva med den, SIS-TS 21143:2013 revideras och kommer under 2016 ut i en uppdaterad version. När den har kommit ut är det dags att uppdatera både SIS-TS och det här dokumentet så att grundtanken att HMK ska vara ett nationellt och branschberoende dokument och SIS-TS ett branschdokument följs.

Dokumentet HMK-Geodesi: GNSS-baserad detaljmätning (HMK-Geodesi: GNSS) är specifikt inriktad på detaljmätning med hjälp av GNSS, men innehåller även allmän information och allmänna instruktioner som kan avse stommätning med statisk GNSS-teknik (statisk mätning). HMK-Geodesi: GNSS ska betraktas som komplementär till HMK-Geodesi: Stommätning.

2 Stommätning

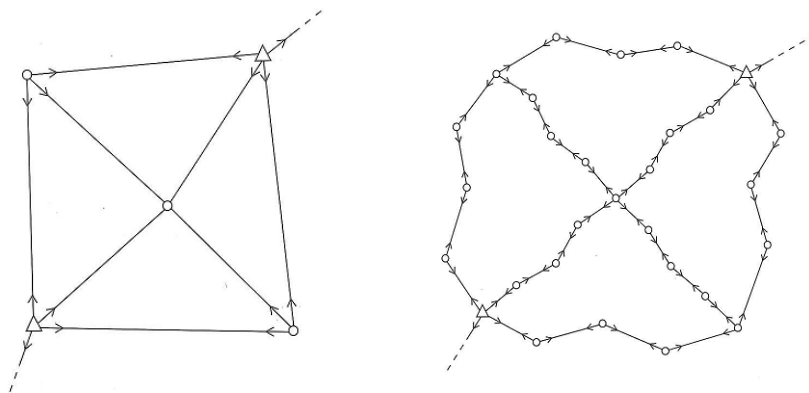
2.1 Stompunkter – stomnät

Lägesangivelser förutsätter någon form av referenssystem. Av praktiska skäl delas lägesangivelserna upp i ett koordinatsystem i plan och i ett höjdsystem. Referenssystemet representeras (realiseras) då av punkterna i stomnätet; stompunkterna. I Sverige har hittills tillämpats en funktionsanpassad hierarkisk indelning av stomnäten:

- Riksnät.
- Anslutningsnät.
- Bruksnät.

Riksnäten är väldefinierade, rikstäckande och anslutna till omvärlden. De etableras och underhålls av Lantmäteriet. Exempel på riksnät är de nät som realiserar referenssystemen SWEREF 99 och RH 2000.

Anslutningsnäten växlar ner de nationella näten till regionala nivåer, vanligtvis kommunala nivåer. Bruksnät är den lägsta nivån i näthierarkin och ansluts normalt till anslutningsnäten. Bruksnät i plan, och även anslutningsnät i plan, framställs terrestert antingen som triangelnät eller som polygonnät. Exempel på vardera kan ses i figur 2.1.



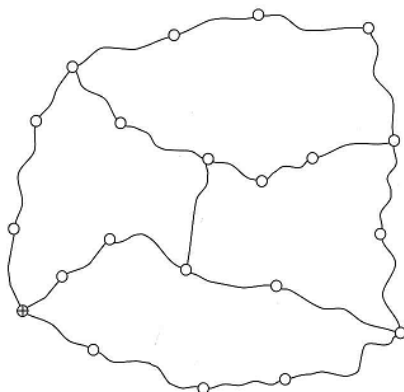
Figur 2.1. Exempel på triangelnät (vä) och polygonnät (hö). Δ = kända punkter, o = nya punkter. Pilar anger mätta riktningar och heldragna streck mätta längder.

Namnet triangelnät syftar till stomnät uppbyggda av en kombination av längd- och vinkelmätningar. Formen på de figurer som bildar näten behöver nödvändigtvis inte vara trianglar, utan även andra slutna figurer kan ingå. En variant av triangelnäten är trilaterationsnäten, i sådana mäts enbart längder.

Polygonnäten bildar en svagare form av stomnät än triangelnäten. De byggs upp av tågformade nät som ansluter till varandra i s.k. knutpunkter. Avstånden mellan knutpunkterna bör inte vara för långa för att hålla

effekten av ogynnsam fortplantning av osäkerheter på en låg nivå.

Bruksnät i höjd, och även anslutningsnät i höjd, framställs terrestert på liknande sätt som polygonnäten, nämligen med tågformade nät och knutpunkter (figur 2.2). Rådet ovan om avstånd och ogynnsam fortplantning av osäkerheter gäller även för avvägningsnäten.



Figur 2.2. Exempel på höjdnät med en känd punkt (ring med kryss nere till vänster), övriga punkter är nya punkter. Streck mellan punkterna symboliserar höjdmätningar i form av tåg.

2.2 Terrester stommätning

Totalstationer används för längd- och riktningsmätningar. Längdmätningarna avser lutande längder, dessa räknas som regel om till horisontella längder och höjdskillnader inför slutberäkningar av ett stommätningarnas nät.

Riktningsmätningarna resulterar i horisontella vinklar mellan stompunkter och i zenitvinklar (zenitdistanser) till mätpunkter. Zenitvinklarna kan användas för att indirekt beräkna horisontella längder och höjdskillnader.

Avvägningsinstrument används för direkta mätningar av höjdskillnader. Succesiva höjdskillnader i ett avvägningståg mellan två stompunkter ger totala höjdskillnaden dem emellan.

Bruksnät etableras oftast med terrester stommätning.

2.3 Stommätning med GNSS

GNSS-stommätning sker genom relativ mätning vilket innebär att resultatet av en mätning, där två GNSS-mottagare observerar samtidigt, blir en positionsvektor (baslinje) som anger avstånd och riktning mellan två observationspunkter. Baslinjen kan delas upp i tre geocentriska komponenter; ΔX , ΔY och ΔZ . Dessa tre komponenter kan i sin tur omvandlas till t.ex. horisontell längd och orienterad riktning (bäring), och höjdskillnad i valda referenssystem.

Stomnätstyperna är i princip desamma som i avsnitt 2.1 med skillnaden att bruksnät sällan etableras med hjälp av GNSS.

2.3.1 Statisk mätning

Vid statisk GNSS-mätning står en eller flera GNSS-mottagare stationärt uppställda och samlar data under en viss tidsperiod (en mätsession). Sessionslängden kan variera från minuter (snabb statisk mätning) till timmar beroende på vilken lägesosäkerhet som eftersträvas.

Statisk relativ mätning ger positioner i förhållande till den, eller de referensstationer som valts. Egna referensstationer kan väljas, eller också kan någon eller några av SWEPOS-stationerna utnyttjas som referensstation(er). Det senare kräver dock ett abonnemang för att få tillgång till nödvändiga data.

Statisk mätning kräver efterberäkning i någon form. Vanligt är att använda instrumentleverantörers programvaror då de är anpassade till de egna instrumenten. Speciellt gäller det vid hämtning av in-samlade data eftersom formatet i regel är leverantörsspecifikt. Med möjligheten att konvertera data till ett instrumentoberoende format som RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) blir valet av programvara, eller extern beräkningstjänst, fritt.

Oavsett valet av programvara, krävs kunskap hos användaren om de valmöjligheter den erbjuder. Även om programmen som regel fungerar bra med förinställda val och parametrar (s.k. default-inställningar) händer det ibland att användaren av olika anledningar måste ingripa för att förbättra resultatet.

Statisk GNSS-mätning är en positionsbestämningsmetod som i likhet med terrestra stommätningar ger låga mätosäkerheter. Vidare är statisk mätning en mycket flexibel teknik eftersom den varken kräver kommunikation eller fri sikt mellan GNSS-mottagare.

3 Stomnätsprojekt

3.1 Nätutformning

Krav

- a) Vid bestämning av stompunkter ska nätutformning, mätning och beräkning utföras så att inverkan av grova fel, systematiska och slumpmässiga avvikelser reduceras till ett minimum.
- b) Punkter för anslutning till existerande referenssystem ska väljas så att de omsluter det område som projektet omfattar.

3.2 Nätanalys

Rekommendation

Innan mätning av ett nytt stomnät påbörjas bör någon form av nätanalys i form av simulering av nätet göras för att optimera resultatet av mätningarna.

En nätanalys ger indikationer om hur eventuella grova fel (misstag) kan lokaliseras i nätet och om eventuella svagheter i nätets utformning. En övergripande analys av hela nätet fås genom kontrollerbarhetstalet (k -talet, relativa redundansen). Det ger vägledande information om hur enskilda mätningar kontrolleras av övriga mätningar i nätet. Ett genomsnittligt mått för hela nätet fås genom att dividera antalet överbestämningar (\ddot{o}) (redundansen) med antalet mätningar (n):

$$k = \frac{\ddot{o}}{n}$$

Även enskilda mätningars kontrollerbarhetstal (k -tal, lokal redundans) kan beräknas, till det krävs normalt ett nätanalysprogram. Ett homogent nät karakteriseras av att kontrollerbarhetstalen hos de enskilda mätningarna är av ungefär samma storlek. Kriterier som att punkter och mätningar ska vara jämt fördelade över området kännetecknar också ett homogent nät, liksom att för triangelnät att de är uppbyggda av regelbundna figurer (har god geometri). Motsvarande god geometri för polygonnät är att ingående tåg ska vara sträckta och ungefär lika långa.

Inre och yttre tillförlitlighet (reliabilitet) redovisas också av analysprogram. Inre tillförlitlighet brukar kallas för "minsta upptäckbara fel" (*MUF*). Den yttre tillförlitligheten (*YT*) anger hur mycket ett *MUF* kan påverka resultatet:

$$YT = MUF(1 - k)$$

k avser här den enskilda mätningens kontrollerbarhetstal.

Summan av alla mätningars kontrollerbarhetstal i ett nät är lika med överbestämningen (*ö*).

I ett terrestert mätt nät med enskilda mätningars kontrollerbarhetstal kring 0,10, kan grova fel i storleksordningen 5–10 cm gå oupptäckta förbi (95 %) om t.ex. längdmätningar i nätet har osäkerheter på 10 mm. Sådana grova fel kan i sin tur påverka resultatet (koordinaterna) med samma belopp.

3.3 Genomförande

Det är utförarens ansvar att uppfylla kraven med hjälp av tillgängliga geodetiska mätmetoder och geodetisk infrastruktur. Vilken eller vilka metoder som är mest lämpliga utifrån förutsättningarna bör avgöras av mätningsteknisk kompetens, gärna med hänvisning till HMK-Geodesi: Teknisk specifikation och metodval. Utföraren bör även ta del av dokumentation för geodetisk mätutrustning och geodetisk infrastruktur, samt vid behov komplettera med tekniska undersökningar och egna testmätningar.

Om en eller flera mätmetoder anses uppfylla projektbehoven kan utföraren gå vidare med rekognosering av arbetsområdet samt övriga förberedelser för mätning, inklusive fastställande av kvalitetsplan för hur kontroll och dokumentation ska genomföras.

4 Terrester stommätning

Krav

- a) Instrument som används ska vara kalibrerade och justerade enligt HMK-Geodesi: Terrester detaljmätning, bilaga B.
- b) Vid all mätning i stomnät med totalstation ska totalstationen, signaler och prismor monteras i tvångscenteringsutrustning.
- c) Utföraren ska säkerställa att hela mätprocessen dokumenteras.

4.1 Förberedelser och mätning

Krav

Med stöd av SIS-TS 21143:2013 ska följande krav gälla vid terrester mätning.

- a) Vid stommätning med totalstation:

Mätklass G1 enligt tabell A.9 vid etablering av bruksnät i plan.

Mätklass G2 enligt tabell A.9 vid etablering av anslutningsnät i plan.

Mätklass G3 enligt tabell A.9 vid etablering av bruksnät i höjd.

- b) Vid stommätning med avvägningsinstrument:

Mätklass J2 enligt tabell A.17 vid etablering av bruksnät i höjd.

Mätklass J3 enligt tabell A.17 vid etablering av anslutningsnät i höjd.

Kontroller vid avvägning genomförs enligt SIS-TS 21143:2013, tabellerna A.13–A.16.

Rekommendation

a) För triangelnät:

- k -talet bör vara $>0,50$.

- Nätet bör vara homogent (mätningars $k > 0,35$).

b) För polygonnät:

- k -talet bör vara $>0,10-0,20$.

-Ingående tåg bör vara sträckta, ha ungefär samma längder och innehålla så få nypunkter som möjligt (helst färre än 4 stycken och med punktavstånd >50 m).

c) För höjdtågsnät:

- k -talet bör vara $>0,30$.

-Ingående tåg bör ha ungefär samma längder och bör dubbelmätas.

Kontrollerbarhetstalet för ett plannät beräknas med följande formel:

$$k = \frac{\ddot{o}}{n} = \frac{l+r-2p-o}{l+r}$$

där l är antalet mätta längder (stationsmedeltal), r är totala antalet mätta riktningar (stationsmedeltal) i alla riktningsserier, p är antalet nypunkter och o är antalet orienteringskvantiteter (en för varje riktningsserie). $r - o =$ totala antalet vinklar i nätet.

Näten som illustreras i figur 2.1 har följande k -tal, triangelnätet:

$$k = \frac{8+14-2\cdot 3-4}{8+14} = 0,55$$

polygonnätet:

$$k = \frac{32+66-2\cdot 27-29}{32+66} = 0,15$$

Kontrollerbarhetstalet för ett höjdnät beräknas med följande formel:

$$k = \frac{\ddot{o}}{n} = \frac{t-p}{t}$$

där t är antalet tåg och p är antalet knutpunkter.

Tåg i stomnät definieras som tåg om de går mellan känd punkt och knutpunkt, eller mellan två knutpunkter.

Knutpunkter är nypunkter i vilka tre eller flera tåg går samman, övriga nypunkter är mellanpunkter.

Höjdnätet i figur 2.2 består av 5 knutpunkter och 15 mellanpunkter sammanbundna med 9 tåg, k -talet blir:

$$k = \frac{9-5}{9} = 0,44$$

4.2 Beräkning av terrestra stommätningar

Krav

- Innan utjämning ska mätningar kontrolleras så att inga systematiska avvikelser eller grova fel finns bland dem.
- Mätningar ska innan utjämning påföras korrektioner i sådan utsträckning att den ursprungliga mätosäkerheten bibehålls genom hela beräkningsprocessen.
- För att erhålla det mest sannolika resultatet ska överbestämda terrestra stommätningar, i plan eller i höjd, beräknas (utjämnas) med hjälp av minsta kvadratmetoden.

Elementutjämning, där de enskilda mätningarna utjämnas, är klart dominerande som metod. En avgörande fördel med elementutjämning är dess förmåga att inte bara detektera oupptäckta grova fel, utan även att lokalisera dem. Utjämning där alla mätningar beräknas samtidigt kallas för sträng utjämning.

4.2.1 Korrektioner innan utjämning

Terrestra mätningar bör innan slutlig beräkning korrigeras enligt följande:

- Reduktion av längder till ellipsoiden.

Om de mätta längderna i ett stornät är kortare än 10 km kan följande förenklade formel användas:

$$b = d \left(1 - \frac{h_A + h_B}{2R} \right)$$

där b är den reducerade längden, d är horisontell längd, h_A och h_B är ändpunkternas A och B höjder över ellipsoiden. R är ellipsoidens krökningsradie (kan sättas till 6390 km för GRS 80 i Sverige). Observera att det är höjder över ellipsoiden (h) som ska användas i formeln, sådana fås genom att addera geoidhöjd (N) till normalhöjd (H); $h = H + N$. Eftersom geoidhöjden varierar mellan ca 20 och 35 m i Sverige (GRS 80), kan ett utelämnande av N påverka en kilometerlång sträcka med 5–50 mm med H i intervallet 0 till 1000 m.

- Överföring till projektionsplanet.

Om de mätta längderna i ett stommät är kortare än 8 km kan följande formel användas:

$$b_p = b \left(1 + \left(\frac{E_A + E_B - 2\Delta E}{2r\sqrt{2}} \right)^2 \right)$$

där b_p är den projicerade längden. b är den reducerade längden som beräknats, E_A och E_B är ändpunkternas A och B E -koordinater. ΔE är eventuellt tillägg som är gjort till koordinaterna för att garantera positiva koordinater ($\Delta E = 150\,000$ m för SWEREF 99 dd mm, $\Delta E = 500\,000$ m för SWEREF 99 TM). r är i det här fallet ellipsoidens medelkrökningsradie (även den kan sättas till 6390 km för GRS 80).

- c) Korrektion för jordkrökning och refraktion vid trigonometrisk höjdmätning.

$$\Delta H_{AB} = d \cot z_A + d^2 \frac{1-k}{2R}, \text{ där } d \text{ är horisontell mätt längd,}$$

alternativt

$$\Delta H_{AB} = l \cos z_A + l^2 \frac{1-k}{2R}, \text{ där } l \text{ är lutande mätt längd,}$$

där ΔH_{AB} är höjdskillnaden mellan A och B (från A till B). R är 6390 km för GRS 80, z_A är zenitvinkeln vid A. k är refraktionskonstanten = 0,14 för Sverige.

ΔH_{AB} ger höjdskillnaden för själva mätningen, normalt tillkommer instrumenthöjd (Ih) och signalhöjd (Sh). Till formlerna ovan läggs då:

$$+ Ih - Sh$$

- d) Korresponderande mätning vid trigonometrisk höjdmätning.

Vid s.k. korresponderande trigonometrisk höjdmätning elimineras jordkrökningseffekten och även refraktionen om mätningarna vid A och B sker samtidigt. Refraktionsinverkan anses då lika stor vid båda stationerna och elimineras därför. I formlerna nedan är z_B zenitvinkeln vid B:

$$\Delta H_{AB} = d \tan \frac{z_B - z_A}{2}, \text{ där } d \text{ är horisontell mätt längd,}$$

alternativt

$$\Delta H_{AB} = l \sin \frac{z_B - z_A}{2} \cdot \sin \frac{z_B + z_A}{2}, \text{ där } l \text{ är lutande mätt längd.}$$

4.2.2 Nätutjämning

När eventuella korrektioner är genomförda och indata kontrollerade och införda i beräkningsprogrammet ska mätningarna ges vikter. Ur teoretisk synvinkel är vikten för en mätning omvänt proportionella mot kvadraten på mätningens standardosäkerhet (se formel nedan). Men mätningarnas

respektive standardosäkerheter vet man som regel inte förrän utjämnin-
gen är klar! I ett första försök ansätts därför vikter baserade på erfarenhet,
instrumenttillverkares tekniska specifikationer, eller enligt rekommendat-
ioner i avsnittet nedan. Sådana vikter kallas för a priori vikter (a priori =
på förhand).

Viktsättning

Mätningar viktas enligt någon vedertagen metod, som t.ex.:

$$p_i = \frac{1}{u^2(x_i)}$$

där p_i är mätningen i :s (x_i) vikt och $u(x_i)$ mätningens standardosäkerhet. A
priori standardosäkerheter, hämtas företrädesvis från instrumenttillver-
karnas tekniska specifikationer. Om inte, rekommenderas följande form-
ler och parametervärden för beräkning av standardosäkerheter:

Standardosäkerhet i riktning

$$u(\psi) = \sqrt{\left(\frac{A}{\sqrt{n}}\right)^2 + \left(\frac{C}{L} \cdot \rho\right)^2} \text{ mgon}$$

där $u(\psi)$ är standardosäkerheten för riktningsmedeltalet.

A är standardosäkerheten i riktning för en helsats = 0,8 mgon. n är antalet
helsatser. C är centreringsosäkerheten = 3 mm. L är siktlängden i km. ρ är
en omvandlingsfaktor från radianer till mgon = 0,063662.

Standardosäkerhet i längd

$$u(L) = \sqrt{(A + B \cdot L)^2 + C^2} \text{ mm}$$

där $u(L)$ är standardosäkerheten för mätt längd.

A är längdmätningens instrumentets konstanta osäkerhet = 5 mm. B är
längdmätningens instrumentets längdberoende osäkerhet = 3 mm/km. L är
den mätta längden i km. C är centreringsosäkerheten = 3 mm.

Standardosäkerhet i höjdtåg

$$u(\Delta H) = A \cdot \sqrt{L} \text{ mm}$$

där $u(\Delta H)$ är standardosäkerheten för ett dubbelmätt höjdtåg med höjd-
skillnaden ΔH . A är en längdberoende osäkerhetsparameter som enligt
SIS-TS 21143:2013 är 1,0 mm / $\sqrt{\text{km}}$ för anslutningsnät och 2,0 mm /
 $\sqrt{\text{km}}$ för bruksnät. L är tåglängden i km.

För att uppskatta standardosäkerheter för enkelmätta tåg, ska ovanstå-
ende värden multipliceras med $\sqrt{2}$.

Utjämnning i flera steg

En nätutjämnning inleds med en *fri nätutjämnning*. Utjämnningen avslöjar då eventuella brister bland mätningarna utan inverkan från osäkerheter som finns hos existerande referenssystem. Nätet ansluts till en enda känd punkt, för plannät definieras också en orienterad riktning utgående från den kända punkten. Den orienterade riktningen kan antingen anges med ett godtyckligt värde i utjämningsprogrammet, eller hellre, fås via en andra känd punkt som ingått i riktningmätningarna från den första kända punkten.

Har övriga kända punkter betraktats som nypunkter i den fria utjämnningen, kan nätet i nästa steg i plan passas in på deras kända lägen med hjälp av en likformighetstransformation, företrädesvis en Helmerttransformation. I höjd kan nätet passas in med hjälp av en translation, alternativt ett lutande plan. Fördelen med en *inpassning* i jämförelse med att gå direkt till nästa steg, *fast nätutjämnning*, är att eventuella felaktigheter i enstaka utgångspunkter enklare kan lokaliseras vid inpassning.

Det slutliga steget i utjämningsprocessen är att ansluta nätet till alla omgivande stompunkter i överordnat system i en *fast nätutjämnning*. Resultatet är nu präglad av det anslutna referenssystemets osäkerheter kombinerat med mätningarnas slumpmässiga avvikelser och eventuellt kvarvarande ännu inte upptäckta grova fel.

4.2.3 Resultatutvärdering och kontroller

Rekommendation

Användarmanual för aktuell programvara innehåller förklaring av de kvalitetsmått som används vid resultatredovisningen. För förståelse av dessa är det viktigt att alltid noga läsa manualen.

En generell genomgång av vilka resultat som normalt redovisas, och hur de ska kontrolleras i en nätutjämnning, sammanfattas nedan:

- Nätets k -tal (relativ redundans).
- Viktsenhetens standardosäkerhet.
- Mätningars residualer.
- Mätningars standardiserade residualer.
- Mätningars k -tal (lokal redundans).
- Inre och yttre tillförlitlighet (reliabilitet).
- Koordinaters standardosäkerheter.

För plannät tillkommer:

- Osäkerhetsellipser.

Nätets k -tal

Nätets kontrollerbarhetstal sammanfattar hela nätet. k varierar mellan 0 och 1, ju högre värde desto bättre kontrolleras mätningarna i nätet. k -talet efter utjämning bör överensstämma med k -talet från nätanalysen (se avsnitt 4.1).

Viktsenhetens standardosäkerhet

Viktsenhetens standardosäkerhet kallades tidigare "grundmedelfel". Viktsenhetens standardosäkerhet a posteriori (i efterhand) visar standardosäkerheten hos en mätning med vikten ett (1,00) och skall bli nära 1,00 om a priori viktsättningen avspeglar de korrekta mätosäkerheterna och att det inte finns något oupptäckt fel bland mätningarna.

Ett värde som vida överstiger 1,00 visar att antingen a priori viktsättningen är för optimistisk (a priori mätosäkerheterna är större än som antagits), eller att det finns ett oupptäckt fel bland mätningarna.

Statistiskt kontrolleras viktsenhetens standardosäkerhet med ett F -test för att fastställa, på vald konfidensnivå, om två varianser är lika eller inte:

$$\frac{u_0^2(x)}{u^2(x)} \leq F_{0,95,\delta,\infty}$$

där $u_0^2(x)$ är viktsenhetens a posteriori standardosäkerhet i kvadrat och $u^2(x)$ är viktsenhetens a priori standardosäkerhet i kvadrat. Den senare är normalt = 1,00. Kvadrerad standardosäkerhet benämns *varians*. Det maximala värde (baserat på $F_{0,95,\delta,\infty}$) som viktsenhetens standardosäkerhet a posteriori bör ligga under beror på konfidensnivån (0,95 = 95 %), nätets överbestämningar (δ) och kan ses i tabell 4.1.

Tabell 4.1. Maximala värden för viktsenhetens standardosäkerhet (konfidensnivå 95 %) vid sträng utjämning av stomnät.

Antal Överbestämningar	Maxvärde för viktsenhetens standardosäkerhet
1	1,96
2	1,73
3	1,61
4	1,54
5	1,49
7	1,42
10	1,35
15	1,29
20	1,25
30	1,21

50	1,16
70	1,14
100	1,11
200	1,08
500	1,05
∞	1,00

Mätningars residualer

Mätningars residualer är avvikelserna mellan mätningarna före och efter utjämning. Normalt beräknade så att de avspeglar de förbättringar som gjorts på mätningarna i minsta kvadratprocessen (MK-processen). Residualer brukar därför också kallas "förbättringar".

Att ge råd om residualers storlek är svårt då de är avhängiga flera osäkerhetskällor. En av dem är osäkerheten hos referenssystemet som de anslutits till, en annan är de kvalitetskrav som är ställda på genomförandet. Oavsett, så bör de vara jämnstora, dvs. ingen residual bör markant avvika från de övriga. Erfarenhet, egen eller andras, är här en viktig bedömningsfaktor.

Med hjälp av statistik kan residualer, om de standardiseras, testas enligt avsnittet nedan.

Standardiserade residualer

Genom att dividera residualer med sina egna standardosäkerheter, fås standardiserade residualer:

$$\left| \frac{v}{u(v)} \right|$$

där v är residualen och $u(v)$ residualens standardosäkerhet. Symbolerna som omger kvoten ($| |$) anger absolutbelopp (för att undvika negativa värden).

Standardiserade residualer är normalfördelade ($N(0,1)$) och kan testas med ett standardiserat t -test för att avslöja eventuellt grovt fel i en enstaka mätning:

$$\left| \frac{v}{u(v)} \right| \leq t$$

Tre konfidensnivåer tillämpas vid testning; 68,3 %, 95,4 % och 99,7 %. Dessa tre motsvaras i stickprov med många mätningar (>30) av t -värdena 1, 2 och 3. t -värdena blir större om antalet mätningar är färre än ca 30, men värdena 1, 2 och 3 kan även då användas under förövändningen att testet genomförs "på säkra sidan".

Följande gäller:

$$\left| \frac{v}{u(v)} \right| \leq \begin{cases} 1 - \text{nivå } 68,3 \% \\ 2 - \text{nivå } 95,4 \% \\ 3 - \text{nivå } 99,7 \% \end{cases}$$

Under förutsättningen att indata till utjämnings betraktats som fri från grova fel och systematiska avvikelser, gäller för standardiserade residualen, att:

- För merparten av mätningarna (minst 68,3 %) ska den vara 1 eller mindre.
- För minst 95,4 % av mätningarna ska den vara 2 eller mindre.
- Om den är mellan 2 och 3 bör mätningen kontrolleras. Hittas inget grovt fel, godkänns mätningen.
- Om den är lika med eller större än 3 ska mätningen uteslutas.

Mätningars k -tal

Mätningars kontrollerbarhetstal varierar mellan 0 och 1. Ju närmare 1, desto bättre kontrolleras mätningen av andra mätningar. Ett önskemål i stornätssammanhang är att k -talet inte varierar allt för mycket och att det, åtminstone för plana stornät, helst är större än 0,35.

Inre och yttre tillförlitlighet

Tillförlitlighet (reliabilitet) visar i mätningssammanhang på möjligheten att upptäcka mätningar som innehåller grova fel eller systematiska avvikelser och vilken inverkan sådana mätningar kan ha på beräknade koordinater. Värdena har statistisk bakgrund och ges som regel i samma enheter som mätningarna själva, dvs. för terrestra mätningar i meter eller gon.

Största felet som en enskild mätning skulle kunna ha och påverka andra mätningar med (kallas också för minsta upptäckbara fel, MUF) är:

$$MUF = \frac{\delta u(v)}{\sqrt{k}}$$

där MUF är beloppet hos största grova felet. δ är en statistisk parameter som baseras på signifikansen α och styrkefunktionen $1 - \beta$. Vanligt är att $\alpha = 5\%$ och $1 - \beta = 80\%$, då blir $\delta = 2,8$. $u(v)$ är residualens standardosäkerhet för mätningen i fråga. k är mätningens k -tal.

Den yttre tillförlitligheten (YT) anger hur mycket ett MUF kan påverka resultatet:

$$YT = \frac{\delta(1-k)u(v)}{\sqrt{k}} = MUF(1-k)$$

Koordinaters standardosäkerheter

Liksom vid mätningars residualer, är det svårt att ge råd om koordinaters standardosäkerheter. Att de överlag är jämnstora är att föredra, för plan-
nät även mellan koordinatkomponenterna. Storleken på osäkerheterna är
avhängig referenssystemet som stompunkterna anslutits till och t.ex. på
de kvalitetskrav som är ställda på genomförandet. Ett områdesbegränsat
och väl genomfört stomnätprojekt kan mycket väl resultera i relativa
lägesosäkerheter på millimeternivå.

Osäkerhetsellipser

Lägesosäkerheter i plan kan också redovisas med hjälp av osäkerhetsel-
lipser. Den grafiska redovisningen kan snabbt visa på styrkor och svag-
heter i lägesbestämningarna, både geometriska och mätningstekniska
sådana.

Osäkerhetsellipsens centrum definieras här som medelpunkten mellan
ellipsens fokalpunkter. Tillplattningen, excentriciteten, är ett mått på osä-
kerhetens dominerande riktning. Ju mer tillplattad en osäkerhetsellips är,
desto mer vittnar den om osäkerhet i mätningarna, eller om brister i geo-
metrin hos nätet. En ideal osäkerhetsellips går mot cirkelform. Oavsett
form, så representerar arean hos en osäkerhetsellips konfidensnivån 39,3
%. För konfidensnivån 95 % måste ellipsens axelvärden multipliceras med
faktorn 2,45.

Riktningen på osäkerhetsellipsens längsta axel (långaxeln) är orsakad av
antingen:

- dålig geometri i den riktningen – det kan saknas en mätning eller
en stom-/referenspunkt
- felaktighet i en längdmätning i den riktningen, eller i en rikt-
ningsmätning vinkelrätt mot.

Tågformade nät

Tågformade nät utjämnas och kontrolleras enligt avsnitt 4.2.3. Eftersom
tågformade nät bildar slutna slingor, finns möjlighet att genomföra kon-
troller på dessa slingor innan utjämning görs.

För polygontåg/nät rekommenderas att maximalt koordinatanslutnings-
och vinkelslutningsfel understiger rekommendationerna i SIS-TS
21143:2013 6.2.8 Beräkning – polygontåg.

För avvägningståg/nät rekommenderas kontroller enligt SIS-TS
21143:2013 tabellerna A.13 och A.14.

5 Stommätning med GNSS

Krav

- a) GNSS-mottagare som används ska vara funktionskontrollerade.
- b) Vid all mätning i stornät ska GNSS-mottagares antenner monteras i tvångscentreringsutrustning.
- c) Utföraren ska säkerställa att hela mätprocessen dokumenteras.

Information

Med goda kunskaper om de osäkerhetskällor som påverkar GNSS-mätningar och med god hand med beräkningsprogram är relativa lägesosäkerheter ner mot några få millimeter möjliga vid statisk GNSS-mätning.

Innan projektstart förutsätts att GNSS-mottagaren har konfigurerats ändamålsenligt efter projektbehov och att den är funktionskontrollerad. Även övrig utrustning – stativ, trefötter, mätband, reserv-batterier, dokumentationsmedia m.m. bör ha kontrollerats.

Kvalitetsplan som upprättats vid planering och förberedelser ska följas.

5.1 Förberedelser och mätning

Krav

Med stöd av SIS-TS 21143:2013 ska följande krav gälla vid stommätning med GNSS-teknik:

- Mätklass SA2 enligt tabell A.10 vid etablering av bruksnät i plan.
- Mätklass SA3 enligt tabell A.10 vid etablering av anslutningsnät i plan.

Rekommendation

Nedanstående beskrivning ger råd om hur mätningar kan planeras vid etablering av stornät med statisk GNSS.

För att underlätta planering och mätning kan hänsyn tas till de korrelationer som uppstår mellan olika baslinjer. Baslinjer som blivit beroende av andra kallas för triviala baslinjer, övriga kallas icke-triviala baslinjer. Antalet icke-triviala och triviala baslinjer för en session med m GNSS-mottagare bestäms med hjälp av följande ekvationer:

$$b = m - 1$$

$$b' = \frac{(m-1)(m-2)}{2}$$

där b är antalet icke-triviala och b' är antalet triviala baslinjer.

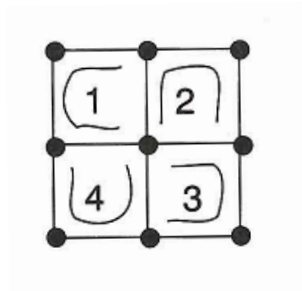
Summan av alla baslinjer blir:

$$b + b' = m \cdot \frac{m-1}{2}$$

Med exempelvis tre GNSS-mottagare som observerar samtidigt under en session blir antalet icke-triviala baslinjer 2, antalet triviala 1 och totala antalet 3.

Planeringsmetoden som leder fram till antalet nödvändiga mätsessioner för stornätning med GNSS bygger på tre principer:

1. Alla punkter vid planeringen betraktas som nypunkter, alltså även kända punkter.
2. Endast icke-triviala baslinjer tas med i planeringen.
3. Nätet byggs upp av fyrhörningar (gärna så kvadratiska som möjligt) av icke-triviala baslinjer.



Figur 5.1. Idealt fyrhörningsnät för GNSS med nio punkter och fyra föreslagna sessioner markerade.

Följande beräkningar kan göras (applicerade på ett idealt nät som det i figur 5.1). Antalet nödvändiga sessioner (s):

$$s = \frac{2(p - \sqrt{p})}{m - 1}$$

där p är antalet punkter (nya + kända). Om s blir ett decimaltal avrundas det uppåt till närmaste heltal. I figur 5.1 med $m = 4$:

$$s = \frac{2(9 - \sqrt{9})}{4 - 1} = 4 \text{ sessioner}$$

Totala antalet icke-triviala baslinjer (B) i nätet:

$$B = s(m - 1)$$

I figur 5.1:

$$B = 4(4 - 1) = 12 \text{ icke-triviala baslinjer}$$

Antalet fyrhörningar (k):

$$k = B - p + 1$$

I figur 5.1:

$$k = 12 - 9 + 1 = 4 \text{ fyrhörningar}$$

Antalet triviala baslinjer i varje session enligt figur 5.1 blir:

$$b' = \frac{(m-1)(m-2)}{2} = \frac{(4-1)(4-2)}{2} = 3 \text{ triviala baslinjer}$$

(två diagonaler och en sida).

5.1.1 Upstart av statisk mätning

Rekommendation

För minsta möjliga osäkerhet vid stommätning med GNSS bör samma typ av antenner användas i samtliga GNSS-mottagare.

Vidare är det av vikt att antennerna under mätning orienteras lika (mot norr) vid varje station.

Information

Felaktig antennhöjd leder inte bara till felaktiga höjder, även planläget hos mätt punkt kan påverkas!

Vid etablering av GNSS-mottagare är det viktigt att vara noggrann vid centrering av antennen över mätpunkten och vid mätning av antennens höjd. Om inte antennhöjden mäts till antennens referenspunkt (ARP), måste också avståndet från avläsningen till ARP beaktas. Om SWEPOS beräkningstjänst avses användas, ska vertikal antennhöjd upp till ARP anges i den RINEX-fil som skickas för beräkning.

För att uppnå minsta möjliga osäkerhet bör s.k. *choke-ring*-antennerna eller antenner försedda med ett jordplan användas. Sådana antenner är mindre känsliga för flervägsfel än traditionella antenner.

Inställningen av elevationsgräns är inte så viktigt i samband med observationerna, den kan sättas till noll grader och, om nödvändigt, regleras vid efterberäkningen.

Statisk mätning bygger på att minst två GNSS-mottagare observerar samtidigt. Om etablering av de mottagare som ska skapa en mätsession inte kan ske inom rimlig tidsram, kan förinställda start- och stopptider användas.

5.1.2 Mätsessioner

Krav

Enligt SIS-TS 21143:

- a) Baslinjelängder ska vara kortare än 20 km och sessionslängder ska vara minst 45 min vid statisk mätning.
- b) Baslinjelängder ska vara kortare än 15 km och sessionslängder ska vara minst 15 min vid snabb statisk mätning.

Enligt HMK-Geodesi: Stommätning:

Se tabell 5.1

Rekommendation

- a) Observationsepokernas längd bör vara 15–30 s vid statisk mätning.
- b) Observationsepokernas längd bör vara 5–10 s vid snabb statisk mätning.

Statiska GNSS-mätningar utförs normalt under betydligt längre tid än realtidsmätningar. Sessionslängden beror på baslinjelängden – ju längre baslinjen är desto längre observationstid behövs för att uppnå fixlösning och ställda krav på mätosäkerhet (se t.ex. tabell 5.1).

Någonstans med ökande baslinjelängd minskar, eller upphör möjligheten att få fixlösning och då ökar också osäkerheten. Optimal sessionslängd kan definieras som den som behövs för att uppnå fixlösning.

Det är viktigt att ha samma epoklängd hos alla GNSS-mottagare som ingår i en mätsession, annars finns risken att observationer går förlorade i efterberäkningen.

Om programvaran för efterberäkning stödjer bestämning av periodobekanta för korta observationsperioder, kan snabb statistisk mätning tillämpas.

Tabell 5.1. Val av minsta observationstid beroende på baslinjelängd och förväntad relativ lägesosäkerhet (95 %) vid statistisk GNSS-mätning.

Baslinje-längder [km]	Förväntad relativ lägesosäkerhet	
	Minsta observationstid	
	Plan <50 mm Höjd <80 mm	Plan <25 mm Höjd <40 mm
0–10	20 min*	1 h
10–20	40 min	2 h
20–30	80 min	3 h
30–50	2 h	4 h
50–100	3 h	6 h

*) avser snabb statistisk mätning

5.1.3 Att beakta vid statistisk mätning

Krav

Om en punkt mäts med en och samma GNSS-mottagare under två eller fler mätsessioner ska antennen centreras om mellan mätsessionerna.

Kvalitetsplan som upprättats för mätningarna, bör innehålla uppmaning om fortlöpande tillsyn under mätningar (se 5.1.4 nedan) och speciellt om hur genomförda mätningar ska kvalitetskontrolleras.

5.1.4 Tillsyn

Rekommendation

Regelbunden tillsyn av GNSS-mottagare under mätningarna rekommenderas.

Tillsynen bör kontrollera att:

- Datainsamling påbörjats och pågår.
- Stationsuppställningen är stabil.
- Batteriernas kapacitet är tillräcklig för fortsatt mätning.

5.1.5 Efterarbete

Rekommendation

Oavsett om insamlade data lagrats i GNSS-mottagarens internminne, eller på flyttbart media, bör en kopia skapas och sparas på säkert ställe innan bearbetning av data börjar.

Det rekommenderas starkt att ladda ner och efterberäkna observationsdata så snart som möjligt efter en avslutad mätning. Åtminstone dagligen för att kunna detektera eventuella problem i ett tidigt skede. Exempelvis är felaktigt mätta antennhöjder ett vanligt förekommande problem.

5.2 Beräkning av GNSS-mätningar

Rekommendation

Alla beräkningar i ett stornät mätt med statisk GNSS bör om möjligt utföras med samma programvara och programversion.

Statiska GNSS-mätningar har som regel syftet att uppnå lägsta möjliga osäkerhet vid lägesbestämning. Kunskap om beräkningsprogrammen och deras datahantering blir därför viktigt.

Tillgången till allt fler satelliter och satellitsystem som sänder på olika frekvenser gör att GNSS-mottagare och efterberäkningsprogram kontinuerligt uppdateras för att dra fördelar av den utökade tillgången. Att i en handbok täcka alla möjligheter som utökad tillgång ger är svårt. En sak är dock säker – ju fler satelliter och satellitsystem, desto mer tillförlitliga blir lägesbestämningarna.

Rekommendationer i det här avsnittet försöks hållas generella och vara GNSS-oberoende, men vissa rekommendationer är "signalberoende", då avses i första hand GPS.

Nedan behandlas generellt beräkningsgången för efterberäkningsprogram som beräknar baslinjer (s.k. baslinjeprogram) med utgångspunkt från en referenspunkt med kända koordinater, eller med tillräckligt bra s.k. initialkoordinater. Om SWEPOS beräkningstjänst ska användas hänvisas till avsnitt 5.3.

Förberedelser

En logisk följd av förberedelser innan beräkningsprocessen, ges i punkt-

listan nedan, den följs sedan av råd och kommentarer kring punkterna:

- Indata.
- Val av antenmodell.
- Val av bandata.
- Initialkoordinater.

Import av GNSS-data

Om programvaran för efterberäkning kommer från samma tillverkare som den använda GNSS-mottagaren, underlättas överföringen av mätdata. Tillverkarens manual bör innehålla instruktioner och rekommendationer för datahantering.

Om annan programvara avses användas, måste mätdata som regel konverteras till RINEX-format antingen direkt vid lagring på överföringsmedia, eller i för ändamålet avsedd programvara.

RINEX-filer är traditionella textfiler (ASCII-filer) som kan läsas och kontrolleras innan de används. Speciellt kan följande i filhuvudet (*header section*) kontrolleras:

- Korrekt punktbezeichnung vid MARKER NUMBER
- Korrekt anten vid ANT # / TYPE
- Antennhöjd vid ANTENNA: DELTA H/E/N

Observationsdata

Det första steget efter importen av observationsdata från GNSS-mottagare till programvara, är att kontrollera följande baserat på bl.a. observationsprotokollet:

- Punktnummer.
- Antenmodell.
- Antennhöjd.
- Start- och stopptider för observationerna för att säkerställa att sessionslängder är korrekta.

I programvaran finns vanligtvis möjlighet att korrigera de första tre parametrarna innan beräkningen.

Val av antenmodell

Krav

- För noggrann lägesbestämning ska korrekt antenmodell användas vid beräkningar.
- Tillverkarnas rekommenderade antenmodell ska i första hand användas.

Information

Antennmodeller finns fritt tillgänglig på National Geodetic Survey's (NGS:s) webbsida:
<http://geodesy.noaa.gov/ANTCAL/>

Kalibreringsvärden fås i formatet Antex (*Antenna exchange format*) etablerat 2003 av IGS:s Antenna Calibration Working Group. Sedan 2012 används absolutkalibrerade antennmodeller.

Val av bandata

Rekommendation

Efterberäknade bandata ska användas när minsta möjliga osäkerhet eftersträvas och/eller när baslinjer är långa (>tiotal km).

Information

Efterberäknade satellitbandata finns på webbplatsen International GNSS Service (IGS):
http://igsb.jpl.nasa.gov/components/prods_cb.html

Utsända bandata är preliminära (predikterade) bandata (*Broadcast Ephemerides*), betydligt noggrannare är efterberäknade (precisa) bandata (*Precise Ephemerides*).

För att få en uppfattning om vilken osäkerhet som kan fås i baslinjeberäkningen beroende på osäkerheten i bandata, kan Bauersimas tumregel från 1983 användas:

$$u(B) = B \frac{u(S)}{\rho}$$

där $u(B)$ är baslinjelängden B 's osäkerhet, $u(S)$ är osäkerheten i bandata och ρ är avståndet till satelliten. Under antagandet att det är ungefär 25 000 km till satelliterna och att B är 25 km, fås:

$$u(B) [\text{mm}] \approx u(S) [\text{m}]$$

Dvs. att på en 25 km lång baslinje, blir osäkerheten hos baslinjelängden i millimeter lika stor som osäkerheten i satellitens bandata i meter. Osäkerheten i utsända bandata hos satelliter varierar med tidpunkt och satellit, men har uppskattats till att vara lite drygt en meter (avser GPS år 2012).

Initialkoordinater

Information

Sker beräkningarna i SWEREF 99 eller WGS 84 behöver inte initialkoordinater särskilt anges vid baslinjeberäkningar.

Referenspunkten för baslinjeberäkning bör ha bra initialkoordinater för att undvika systematiska avvikelser i beräkningarna.

5.2.1 Baslinjeberäkningar

Rekommendation

- a) Någon form av linjärkombination mellan två frekvenser för att eliminera jonosfärspåverkan rekommenderas om baslinjer är längre än 10 km.
- b) På kortare och speciellt på mycket korta (<5 km) baslinjer kan en enkelfrekvens (L1), eller användning av två frekvenser (L1 och L2), ge ett bättre resultat än en linjärkombination.

På baslinjer kortare än 5 km anses jonosfär- och troposfärspåverkan vara ungefär lika stora vid båda de observerade stationerna och kommer därmed att elimineras vid beräkningen.

Programvaran som tillhandahålls av tillverkare av GNSS-mottagare för efterberäkning bearbetar observerade ändringar i bärvågsfaser för att bilda observationsekvationer (där baslinjekomponenter ΔX , ΔY och ΔZ ingår som obekanta parametrar). Observationsekvationerna bildas genom att beräkna olika slags differenser mellan fasobservationer och löses genom en minsta kvadratutjämning (MK-utjämning). Resultatet blir den mest sannolika skattningen av baslinjekomponenterna och deras varianskovariansmatris, från vilken standardosäkerheterna för ΔX , ΔY och ΔZ kan beräknas.

Baslinjeberäkning där periodobekanta har fixerats till heltal kallas för *fixlösning*. Ibland är det inte möjligt att uppnå en fixlösning, vanligtvis vid långa baslinjer och/eller för korta sessionslängder. I dessa fall kan man endast få en *flytlösning*, dvs. att periodobekanta inte har fixerats till heltal. En flytlösning har större osäkerhet än fixlösning. Ibland är denna lösning den enda möjliga. Det kan även hända att en fixlösning inte är tillförlitlig (t.ex. om vissa periodobekanta inte har bestämts korrekt), och då är flytlösningen att föredra.

Beräkningar

För baslinjeberäkningen kan olika strategier tillämpas genom att ändra parametrar i programvaran. Nedan följer sådant som kan vara aktuellt:

1. Elevationsgränsen. Om låga satelliter uppvisar många signalavbrott kan de filtreras bort genom att öka elevationsvinkeln.
2. Minsta sessionslängd (ett alternativ för automatisk borttagning av för korta sessioner kan finnas i programvaran).
3. Troposfärmodell. Två vanligt använda troposfärmodeller är Hopfield och Saastamoinen vilka i princip är likvärdiga. Det finns också andra modeller som kan vara implementerade i aktuell programvara, men skillnader dem emellan är generellt mycket små för elevationsvinklar som är större än 15° . Det är viktigt att se till att samma modell används för alla baslinjer.
4. Jonosfärmodell. Utsända banddata för GPS innehåller en jonosfärmodell (Klobuchar-modell) som kan kompensera för ca 50 % av jonosfäreffekten, och är exempelvis lämplig om enkelfrekvens (L1-lösning) används. Under lugna jonosfärs-förhållanden är påverkan från jonosfären på lägesosäkerheten vid L1-lösning inte väsentlig om baslinjelängden är kortare än ca 10 km. I detta fall kan standardosäkerheter om 1 cm uppnås i varje koordinatkomponent på 95 % konfidensnivå. För längre baslinjer och under förekomst av jonosfärsstörningar kan en s.k. jonosfärfri linjärkombination (betecknas L3) av fasobservationer på L1 och L2 bildas för att ta bort jonosfäreffekten. Med en L3-lösning kan man ta bort 99,9 % av jonosfärspåverkan på GNSS-signaler. L3-lösningar är dock "brusigare" än L1-lösningar eftersom bruset i observationer som formas genom linjärkombinationer (inklusive dubbeldifferenser) förstärks jämfört med ursprungliga observationer.
5. Metod för bestämning av periodobekanta, vanligtvis LAMBDA-metoden (*Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment*).

Normalt kan användaren inte välja metod för hur differenser mellan satelliter bildas mellan fasobservationer från en GNSS-mottagare till olika satelliter (som sedan används för att bilda dubbeldifferenser). Vanligtvis är det två alternativa metoder som är "hårdkodade" i programvaran – referenssatellit eller sekventiell metod. I det första fallet beräknas alla enkeldifferenser i förhållande till en av programvaran vald referenssatellit. Om en "dålig" satellit har valts kommer alla dubbeldifferenser också att bli "dåliga", vilket kommer att påverka lösningen negativt. Om istället det sekventiella alternativet används kommer bara dubbeldifferenser som innehåller den problematiska satelliten att påverkas.

Om det inte är möjligt att ändra inställningen för differentiering mellan satelliter, eller om den inte är tillgänglig, kan man vid eventuella problem försöka att byta plats mellan stationerna som bildar baslinjen och göra en ny beräkning. Detta eftersom följderna av satelliter som har observerats på referensstationen kan vara annorlunda på den nya punkten.

5.2.2 Utvärdering och kontroller av baslinjer

Rekommendation

Användarmanual för aktuell programvara innehåller förklaring av de kvalitetsmått som används vid resultatredovisningen. Den brukar också innehålla riktlinjer för att kunna välja en "optimal" lösning beroende på bl.a. baslinjelängd. Det är därför viktigt att alltid noga läsa och följa användarmanualen.

Efter att baslinjeberäkningen är klar behöver resultatet utvärderas. Till det finns inte någon standardiserad metod, utan den är som regel programvaruspecifik.

Följande kan finnas i resultatredovisningen:

1. Något slags kvadratisk medelvärde (RMS, *Root Mean Square error*) av observationsresidualerna. Det kan ses som den mest tillförlitliga kvalitets- och tillförlitlighetsindikatorn för lösningen, samt om lösning av periodobekanta har lyckats. RMS-värdet kan anges i enheterna meter eller cykler. Ju mindre RMS-värde desto bättre lösning. Generellt kan ett RMS-värde som är mindre än 0,1 cykel (ca 3 cm) ses som godtagbart.
2. Antalet uteslutna observationer (grova fel) - ett lågt värde betyder en acceptabel lösning.
3. Typ av lösning - fix- eller flytlösning. Vanligtvis bör man eftersträva fixlösning för alla baslinjer. Som nämnts i avsnitt 5.2.1 kan dock flytlösning ibland vara tillförlitligare än fixlösning (eller den enda möjliga). Om det är något tvivel om fixlösningens kvalitet kan flytlösningen vara att föredra. Det kan vara en bra idé att jämföra baslinjekomponenter som har bestämts med fixlösningen, och kontrollera om de har ändrats mer än 0,1 m jämfört med flytlösningen. Det bör nämnas att om data från både GPS och GLONASS bearbetas, kan det vara möjligt att lösa periodobekanta bara för GPS, men inte för GLONASS.
4. Standardosäkerheter för baslinjekomponenter. Dessa är som regel programspecifikt optimistiska och utan hänsyn till icke-modellerade systematiska effekter. För en fixlösning brukar standardosäkerheterna ligga på millimeternivå, och på centimeternivå för en flytlösning.

Om en eller flera baslinjer inte uppfyller ställda krav och eventuellt har "flaggats" som problematiska, finns det vanligtvis möjlighet att redigera observationerna för respektive session.

Följande är exempel på det som kan behöva åtgärdas under analys av resultatet:

1. Eventuell korrigerings av punktbezeichnung, antennhöjd, antennmodell eller antennkalibreringsmodell.
2. Inaktivering av satelliter som endast var tillgängliga under en kort period under sessionen (sådana som precis klarat elevationsgränsen). Satelliter bör helst bidra under hela sessionen.
3. Inaktivering av observationsintervall med (flera) periodbortfall som försvårar fixlösning och som normalt markerats av programvaran. Identifiering av satelliter med periodbortfall kan även göras genom att titta på grafisk redovisning av observationsresidualer efter trippeldifferenslösningen. Periodbortfall framträder som "spikar" i data.
4. Inaktivering av "brusiga" satelliter. Återigen kan grafisk granskning hjälpa till för att identifiera brusiga satelliter.
5. Ändring av elevationsvinkeln (alternativ till inaktivering av satelliter enligt punkt 2).

Kontroll av baslinjer och slingor

Rekommendation

Sessionerna kontrolleras mot varandra genom jämförelser mellan dubbelmätta baslinjer eller, när endast två GNSS-mottagare använts, genom beräkning av slutningsfel i slingor.

1. För att kontrollera att baslinjerna inom varje session stämmer överens görs en nätutjämnning per session. Förbättringarna i en sådan utjämnning bör vara små (några mm), eftersom baslinjerna byggs på samma observationer (triviala baslinjer).
2. Vid tågformade GNSS-mätningar som skapar slingor kontrolleras slutningsfel enligt tabell 5.2. Det totala slutningsfelet beräknas genom att summera slutningsfelen för alla baslinjekomponenter (ΔX , ΔY , ΔZ eller ΔE , ΔN , ΔH om transformationer till relevant SWEREF 99-kartprojektion och höjdsystem har gjorts). Teoretiskt ska slutningsfel vara lika med noll. I programvaror finns normalt en funktion för beräkning av slutningsfel och även fördefinierade gränsvärden, som t.ex. de i tabell 5.2.

Tabell 5.2. Parametrar till toleranser för dubbelmätta baslinjer och slutningsfel i slingor (ppm = mm/km).

		Varningsgräns (95,4 %)		Kassationsgräns (99,7 %)	
		a [mm]	b [ppm]	a [mm]	b [ppm]
Dubbelmätta baslinjer	Norr	10	2	15	3
	Öster	6	2	9	3
	Upp	20	3,4	30	5,1
	Plan	11	2,6	15	3,6
	3-D	23	4,3	30	5,6
Slutningsfel i slingor	Norr	8	1,6	11	2,4
	Öster	5	1,6	7	2,4
	Upp	15	2,7	22	4,1
	Plan	8	2,1	11	2,9
	3-D	17	3,4	22	4,6

3. Dubbelmätta baslinjer kontrolleras mot följande tolerans (T_d):

$$T_d = a + bL \text{ mm}$$

där L är baslinjelängden i km. Parametrarna a och b fås ur tabell 5.2.

Slutningsfel i slingor kan kontrolleras mot följande tolerans (T_s):

$$T_s = \frac{an + bL}{\sqrt{n}} \text{ mm}$$

där n är antalet baslinjer i slingan, L är slingans totala längd i km. Parametrarna a och b fås även här ur tabell 5.2.

Vid överskridande av varningsgränsen bör baslinjen/slingan noggrant kontrolleras. Upptäcks ingen felaktighet behålls baslinjen/slingan om felaktigheten är under kassationsgränsen.

Statistisk test av dubbelmätta baslinjer

Skillnader mellan baslinjekomponenter hos dubbelmätta baslinjer kan testas statistiskt enligt nedan:

- $\Delta X_1, \Delta Y_1, \Delta Z_1$ är baslinjekomponenter från första mätningen med sin varians-kovariansmatris C_1 .
- $\Delta X_2, \Delta Y_2, \Delta Z_2$ är baslinjekomponenter från andra mätningen med sin varians-kovariansmatris C_2 .

Kvadratroten ur varians-kovariansmatrisernas diagonalelement är standardosäkerheterna hos baslinjekomponenterna – $u(\Delta X)$, $u(\Delta Y)$, $u(\Delta Z)$. Standardosäkerheterna är, som nämnts i förra avsnittet, som regel optima (programspecifikt), varför nedanstående hypotesprövning kan utelämnas om inte speciell misstanke om felaktighet hos någon dubbelmätt baslinje finns.

Kontrollförfarandet är en hypotesprövning om huruvida det finns några skillnader, eller inte. Antingen är de (statistiskt) lika med noll eller också är de (statistiskt) skilda från noll. De statistiska övervägandena görs med hjälp av någon konfidensnivå – typiskt 95 %.

För hypotesprövningen beräknas skillnad och standardosäkerhet enligt följande ekvationer:

$$\Delta X = \Delta X_2 - \Delta X_1$$

$$u(\Delta X) = \sqrt{u^2(\Delta X_2) + u^2(\Delta X_1)}$$

Motsvarande gäller för beräkningar av ΔY , ΔZ , $u(\Delta Y)$ och $u(\Delta Z)$.

Baslinjekomponenterna antas ha tillkommit genom många mätningar och skillnaderna (ΔX , ΔY , ΔZ) hos dem antas vara slumpmässiga och normalfördelade. Då är statistiskt (95 %) skillnaden mellan ΔX -komponenterna noll om:

$$\left| \frac{\Delta X}{u(\Delta X)} \right| \leq 1,96$$

Slutsatsen blir då att det inte är någon skillnad mellan baslinjernas ΔX -komponenter. Skulle kvoten vara större än 1,96, då finns en statistisk signifikant skillnad dem mellan, slutsatsen blir då att utesluta eller mäta om baslinjen. Är hypotesen om att det inte finns någon skillnad mellan baslinjernas ΔX -komponenter sann, utförs motsvarande test på ΔY och slutligen på ΔZ .

Kontroll av baslinjer med terrester teknik

Krav

Med stöd av SIS-TS 21143:2013 ska avsnitt 6.2.6 Kontrollmätning av baslinje gälla vid kontroll av GNSS-mätt baslinje med terrester teknik.

Mätningstekniken som väljs bör ha en mätosäkerhet som inte överstiger den förväntade mätosäkerheten hos GNSS-metoden med mer än en tredjedel. I sådant fall kan kontrollmetoden betraktas som felfri. Lämpliga metoder är t.ex. direktmätning med totalstation mellan punkter om avstånd och sikt medger det, eller valfri etablering med totalstation mellan

punkter för indirekt mätning av avstånd/höjdskillnad mellan dem.

Om avståndet (baslinjelängden lutande eller horisontellt) och höjdskillnaden mellan två GNSS-bestämde punkter är S_{GNSS} respektive ΔH_{GNSS} med standardosäkerheterna $u(S_{GNSS})$ respektive $u(\Delta H_{GNSS})$ och avståndet (lutande eller horisontellt) och höjdskillnaden mätta terrestert är S_{terr} respektive ΔH_{terr} , då gäller på konfidensnivå 95 %, följande krav:

$$\left| \frac{S_{GNSS} - S_{terr}}{u(S_{GNSS})} \right| \leq 1,96 \text{ för avstånd}$$

$$\left| \frac{\Delta H_{GNSS} - \Delta H_{terr}}{u(\Delta H_{GNSS})} \right| \leq 1,96 \text{ för höjdskillnad}$$

Om detta är sant, då föreligger ingen skillnad mellan terrestert och GNSS-mätt avstånd och/eller höjdskillnad.

5.2.3 Nätutjämnig

Krav

För att på något sätt beakta korrelationer mellan baslinjer, ska alla baslinjer, dvs. även triviala sådana, tas med vid den slutliga nätutjämnigen.

Viktsättning

Stomnät som etablerats med GNSS har ofta samma observationsdata använts vid beräkning av flera baslinjer, baslinjerna blir då korrelerade med varandra. Även inom baslinjerna, mellan de olika komponenterna, finns korrelationer. Särskild hänsyn vid viktningen krävs därför enligt ett av följande alternativ:

- Viktsättning kan göras med hjälp av den varians-kovariansmatris som erhållits vid utjämnig av baslinjerna.
- Om den i tabell 5.3 föreslagna standardviktsättningen tillämpas bör kovarianserna från utjämnigen av baslinjerna inte tas med vid nätutjämnigen.

Tabell 5.3. Standardviktsättning för baslinjer upp till 20 km. Baslinjelängden L anges i km. X, Y, Z avser geocentriska kartesiska koordinater.

Baslinjekomponenter	A priori standardosäkerhet
Norr	$5 + 0,7 L$ mm
Öster	$5 + 0,7 L$ mm
Upp	$8 + 1,2 L$ mm
X	$6 + 0,8 L$ mm
Y	$5 + 0,7 L$ mm
Z	$7 + 1,1 L$ mm
Längd	$5 + 0,7 L$ mm
Azimut	$0,04 + \frac{0,32}{L}$ mgon
Zenitvinkel	$0,08 + \frac{0,51}{L}$ mgon

Nätutjämningsen är, till skillnad från den terrestra nätutjämningsen, tredimensionell. Den följer dock samma metodik varför den inleds med en *fri nätutjämningsen* för att kontrollera mätningarna utan påverkan av valt referenssystem. Valet av utgångspunkt för den fria nätutjämningsen görs som regel automatiskt, men kan även bestämmas manuellt. Utvärdering av resultatet kan göras med hjälp av instruktionerna gällande terrester mätning i avsnitt 4.2.3.

Har övriga kända punkter betraktats som nypunkter i den fria utjämningsen, kan nätet i nästa steg i plan passas in på deras kända lägen med hjälp av en likformighetstransformation, företrädesvis en Helmerttransformation. I höjd kan nätet passas in med hjälp av en translation, alternativt ett lutande plan. Fördelen med en *inpassningsen* i jämförelse med att gå direkt till nästa steg, *fast nätutjämningsen*, är att eventuella felaktigheter i enstaka utgångspunkter enklare kan lokaliseras vid inpassningsen.

Det slutliga steget i utjämningsprocessen är att ansluta nätet till alla omgivande stompunkter i existerande referenssystem. Kända punkter som klassificerats som nypunkter, återfår nu statusen som kända punkter och deltar i en *fast nätutjämningsen*. Resultatet är nu präglad av det anslutna referenssystemets osäkerheter kombinerat med mätningarnas slumpmässiga avvikelser och eventuellt kvarvarande ännu inte upptäckta grova fel. Nätet kontrolleras återigen enligt avsnitt 4.2.3.

5.3 SWEPOS beräkningstjänst

Krav

Med stöd av SIS-TS 21143 ska mätklass SA4 enligt tabell A.10 gälla vid etablering av stompunkter med SWEPOS beräkningstjänst.

SWEPOS beräkningstjänst är ett webbaserat alternativ till egen efterberäkning av insamlade GNSS-data som hanteras och beräknas punktvis. Dels finns en rikstäckande ordinarie tjänst som ansluter mot SWEPOS fundamentalstationer, dels projektanpassade tjänster.

Det här dokumentet avser den ordinarie tjänsten.

Användaren för över sina data till tjänsten via ett webbformulär och får resultatet i form av en textfil via e-post. Indata ska vara dubbelfrekvens-GPS-data i RINEX-format. RINEX-filen kan innehålla observationer av andra GNSS, t.ex. GLONASS, men dessa kommer inte att användas vid beräkningen.

Vid användning av beräkningstjänsten ska observationstiden vara minst 2 timmar för att få ett tillförlitligt resultat med osäkerheter på centimeter-nivå. Kortare mättider kan ge osäkerheter på decimeternivå. Beräkningstjänsten kan bearbeta sessioner inom intervallet 0,5–24 h. Följande är också att beakta:

- Vid beräkningen används data från satelliter ner till 10 graders elevation. Elevationsmasken i GNSS-mottagaren bör därför vara högst 10°.
- Beräkningen görs med epoklängden 30 sekunder. Om epoklängden i RINEX-filen är kortare än det "tunnas" filen ut till 30 sekunders epoklängd.

För mera detaljer kring användning av beräkningstjänsten hänvisas till SWEPOS hemsida: <https://swepos.lantmateriet.se>

5.3.1 Beräkning, analys och kontroll

Beräkningsförfarandet är annorlunda mot det som används i kommersiella programvaror. I beräkningar som sker i Bernese GNSS Software (ett avancerat program från universitetet i Bern, Schweiz) används data från de fem närmaste SWEPOS-fundamental-stationerna och eventuellt andra närliggande SWEPOS klass A-stationer samt bästa tillgängliga banddata (företrädesvis *Final* eller *Rapid*). Det är alltså en MK-utjämning av minst fem baslinjer som utförs för att få koordinater på en ny punkt. Beräkningarna sker i den aktuella versionen av ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) och koordinaterna transformeras därefter till SWEREF 99. Resultatet presenteras även i valfri projektion av SWEREF 99 TM och RH 2000. Det är för närvarande bara GPS-observationer som används vid beräkningen.

Beräkningstjänsten baseras på en L3-kombination med skattning av troposfärsfördröjningen, vilket betecknas som L3T. Denna lösning minskar effekten av jonosfären och troposfären, men förstärker lokala effekter, t.ex. flervägs effekter. Därför kan höjden på en ny punkt bestämd med beräkningstjänsten skilja några centimeter från höjden på samma punkt bestämd genom en L1-lösning vid egen efterberäkning mot en SWEPOS-referensstation (gäller relativt korta baslinjer).

Analys och utvärdering

Beräkningsresultatet innehåller ett antal kvalitetsparametrar för utvärdering av dess kvalitet. Nedan följer några tumregler för utvärderingen:

- Medelvärde för andelen lösta periodobekanta (Amb Res) ska vara större än 30 %.
- RMS i slutlig fixlösning ska vara mindre än 3 mm.
- Viktsenhets standardosäkerhet (grundmedelfelet) i inpassningen mot SWEREF 99 (genom Helmerttransformation) ska vara mindre än 10 mm.
- Differens i höjd, i det s.k. elevationsgränstestet, ska vara mindre än 30 mm.
- Om dessa kriterier är uppfyllda kan den förväntade mätosäkerheten i lägesbestämningen vara ca 1 cm i plan och 2 cm i höjd (förutsatt att mätningarna har utförts med en choke-ring-antenn under minst 2-3 timmar). Om andra geodetiska antenner används blir mätosäkerheten större.

Andra parametrar att beakta är:

- Differensen mellan fix- och flytlösningen – ett stort värde är en indikation på antingen problem med bestämningen av periodobekanta eller på för kort observationstid.
- Andelen borttagna observationer – ska vara låg.

Kontroll

Om bara en GNSS-mottagare använts vid mätningar som bearbetats med beräkningstjänsten, kan endast kontroll av avstånd enligt avsnitt 5.2.2 med terrester mätteknik mellan punkter genomföras. Om fler än en GNSS-mottagare använts kan, i separata mätsessioner och med egen programvara, baslinjer beräknas och användas för kontroll.

I det senare fallet måste även den separata baslinjemätningens standardosäkerhet tas hänsyn till då den sannolikt inte är mindre än en tredjedel av SWEPOS-tjänstens standardosäkerhet. Formlerna nedan kan då användas för att statistiskt avgöra om SWEPOS-tjänstens resultat är likvärdigt med kontrollens. I formlerna är S_b avstånd beräknat med hjälp av koordinater från SWEPOS-tjänstens resultat och S_m är motsvarande mätta lutande avstånd från kontrollmetoden. $u(S_b)$ och $u(S_m)$ är deras respektive standardosäkerheter.

För hypotesprövningen beräknas skillnad och standardosäkerhet enligt följande ekvationer:

$$\Delta S = S_b - S_m$$

$$u(\Delta S) = \sqrt{u^2(S_b) + u^2(S_m)}$$

$u^2(S_b) = 0,00050 \text{ m}^2$ om kriterierna under Analys och urvärdering ovan är uppfyllda.

På konfidensnivån 95 %, ska följande gälla om SWEPOS-tjänstens och kontrollmetodens avstånd ska betraktas som likvärdiga:

$$\left| \frac{\Delta S}{u(\Delta S)} \right| \leq 1,96$$

6 Kombinerade tekniker vid stommätning

6.1 Underhåll och förtätning av stornät

Krav

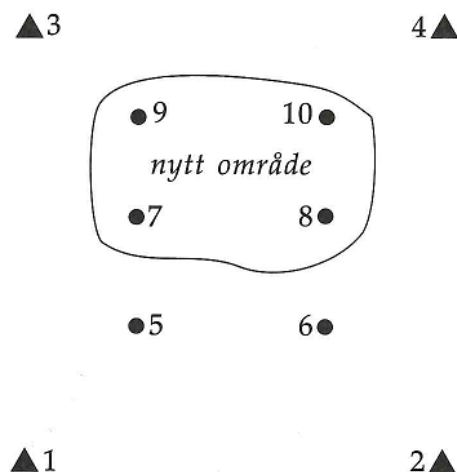
Mätningar för underhåll och förtätning av stornät ska vid terrestra mätningar genomföras enligt avsnitt 4 Terrester mätning och vid GNSS-mätningar genomföras enligt avsnitt 5 Stommätning med GNSS.

Rekommendation

Terrestert mätta stornät i höjd rekommenderas inte att underhållas eller kompletteras med GNSS-mätningar.

GNSS-mätningar kan, där det är lämpligt, underhållas och förtätas med terrestra mätningar, liksom att terrestra mätningar i plan kan, det är lämpligt, underhållas och förtätas med GNSS-mätningar.

Vid förtätning av stornät i plan är det lämpligt att strategiska punkter som stärker nätets närsamband (geometri) och punkter som skapar bra fjärrsamband (med anslutningsnät) väljs. Anslutningsstrategin bör ske i två steg enligt exemplet i figur 6.1.



Figur 6.1. Förtätning av existerande nät.

I figur 6.1 har punkterna 5–8 bestämts med hjälp av mätningar mot punkterna 1–4 i existerande referenssystem. Utökning av nätet med punkterna 9 och 10 är önskvärt.

Mätningar bör då planeras så att de genomförs dels mot 7 och 8 (för närsambandet) och dels mot punkterna 1–4 (för fjärrsambandet).

6.2 Beräkning med kombinerade tekniker

Vid beräkning av mätningar som kombinerar traditionella terrestra mätningar (vinklar, längder, höjdskillnader) och GNSS-baslinjer, bör baslinjemätningarna först utjämnas och kontrolleras separat i en fri utjämning. Det ger möjligheter att utvärdera om a prioriviktsättningen är realistisk i förhållande till de terrestra mätningarnas a priorivikter. Om inte, bör GNSS-baslinjernas a priorivikter skaleras om för att bli jämförbara med de terrestra a priorivikterna. Även eventuella skal- och orienteringsskillnader mellan de terrestra mätningarna och GNSS-mätningarna bör om möjligt utredas innan de kombineras.

7 Dokumentation och redovisning

7.1 Dokumentation av mätprocessen

Krav

Vid varje uppställning ska följande dokumenteras:

- Projekt/mätområde.
- Projektansvarig/mätansvarig.
- Datum och tidpunkter (mätstart, mätslut).
- Punktbeteckning med eventuell punktkod.
- Mätutrustning – fabrikat, instrumentnummer.
- Antenn-, instrument- och signalhöjder – före och efter mätning.
- Eventuell offset till ovanstående.
- Fritextkommentarer, som t.ex. avvikelser.

I SIS-TS 21143:2013 bilaga B, finns en tabell som anger vad som ska redovisas av det som planerats, dokumenterats och utförts i ett stommätprojekt.