

Om behovet av nationell geodetisk infrastruktur och dess förvaltning i framtiden

Jonas Ågren och Lars E. Engberg

Gävle 2010

L A N T M Ä T E R I E T





Copyright ©

2010-12-20

Författare Jonas Ågren och Lars E. Engberg

Typografi och layout Rainer Hertel

LMV-Rapport 2010:11 – ISSN 280-5731

Om behovet av nationell geodetisk infrastruktur och dess förvaltning i framtiden

Jonas Ågren och Lars E. Engberg

Gävle
December 2010

Förord

Denna rapport syftar till att ge en beskrivning av vårt behov av nationell geodetisk infrastruktur (bestående av referenssystem och referensnät) och förvaltning av denna, framförallt under den närmaste 10-årsperioden. Ursprungligen var planen att fokusera på behovet av markerade punkter, men allt eftersom arbetet fortskred har fokus mer och mer förskjutits mot andra delar av den geodetiska infrastrukturen. Titeln har också ändrats flera gånger. Behovet av markerade punkter utgör dock fortfarande någon form av röd tråd genom texten.

För att besvara frågan vilka referensnät som behövs för att realisera våra referenssystem, och hur de sedan ska förvaltas, så är det viktigt att vara klar över hur systemen ifråga definieras. Vad är det som realiserar eller bär upp dem? Vi ägnar därför förhållandevis mycket kraft åt att diskutera definitionerna av de nationella referenssystemen i plan och höjd, ibland kanske lite väl mycket. Även om Lantmäteriet redan har definierat SWEREF 99 och RH 2000, så tycker vi dock att det är viktigt att argumenten för och emot olika alternativ finns dokumenterade.

Av utrymmesskäl är vi tvungna att behandla vissa delar av den geodetiska infrastrukturen mindre utförligt än andra. I någon mån avspeglar detta urval författarnas kunskap och intresse, men det kan lika gärna förklaras med den begränsade tid som fanns till förfogande.

December 2010

Jonas Ågren
jonas.agren@lm.se

Lars E. Engberg
lars.engberg@lm.se

Denna rapport har varit underlag i arbetet med Geodesi 2010 beträffande behovet av nationell geodetisk infrastruktur och dess förvaltning. Rapporten är därför ett viktigt komplement till den strategiska planen för Lantmäteriets geodesiverksamhet 2011-2020.

Mikael Lilje
Geodesichef

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Traditionella referensnät och referenssystem	1
1.2	Satellitgeodesirevolutionen	1
1.3	Tredimensionella referenssystem anpassade för GNSS-tekniken.....	2
1.4	Höjdsystem och geoidmodeller.....	4
1.5	Syfte och innehåll	6
2	Definition av de nationella referensnäten i plan (3D) och höjd	7
2.1	Allmänt om geodetiska referensnät och referenssystem.....	8
2.2	Om definitionen av SWEREF 99	11
2.3	Försäkringspunkter.....	16
2.4	Om definitionen av det nationella höjdsystemet RH 2000	17
3	Förvaltning och ajourhållning i plan (3D) och höjd.....	24
3.1	Om förvaltningen av det aktiva referensnätet för SWEREF 99.....	25
3.2	Förvaltning av försäkringspunkter.....	27
3.3	Ajourhållning av riksnätet i höjd	29
3.4	Utveckling av geoid- och landhöjningsmodeller.....	31
4	Den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft.....	31
4.1	Den nuvarande situationen.....	32
4.2	Behov och utveckling av de nationella tyngdkraftsnäten och systemen .	34
4.3	Ajourhållning av den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft.....	40
5	Sammanfattning och rekommendationer	41
	Referenser	44

1 Introduktion

1.1 Traditionella referensnät och referenssystem

Den geodetiska infrastrukturen består av referenssystem och referensnät. Traditionellt har referensnäten (stomnäten) varit uppbyggda hierarkiskt med punkter av olika dignitet eller ordning. Detta angreppssätt var en följd av de tillgängliga mät- och beräkningsmetoderna. Exempelvis kräver vinkel- och längdmätning optisk sikt mellan punkterna, vilket begränsar punktavståndet och utan datorer var det svårt att utjämna nät med alltför många punkter.

I horisontalled har först ett överordnat triangelnät anlagts (över ett land eller region) med ett typiskt punktavstånd på 10-30 km. Detta nät har sedan förtätats i omgångar (ordningar), ända ned till en täthet lämplig för detaljmätning. Det överordnade nätet benämns riksnät, bruksnäten utgör den lägsta nivån och vars punkter är avsedda att vara utgångspunkter för detaljmätning. Anslutningsnäten utgör länken mellan riksnät och bruksnät. Förutsatt traditionell mätning, så är det självklart att referenssystemet bärs upp av de markerade punkterna på marken, näten måste därför ajourhållas så att möjligheten till anslutning inte försvinner. I Sverige är RT 90 ett bra exempel på ett referenssystem som realiseras av de horisontella koordinaterna på punkterna i ett klassiskt triangelnät.

I höjddled har en liknande konstruktion använts (och används fortfarande). Mättekniken är (precisions)avvägning. Olika ordningar utnyttjas vanligtvis eftersom det är rationellt och billigare att först mäta ett stormaskigt höjdnät med noggrannast tänkbara teknik och sedan förtäta med mindre noggrann mätning. Det skulle förstås vara bättre att mäta ett finmaskigt nät med samma höga kvalitet rakt igenom, men detta har av ekonomiska skäl endast i undantagsfall blivit gjort. Undantaget här är den tredje precisionsavvägningen i Sverige (riksavvägningen), som resulterade i vårt nya höjdsystem RH 2000. Förutsatt att höjder enbart kan mätas med traditionella metoder, som kräver sikt mellan punkterna, är situationen exakt densamma i höjd som i horisontalled. De markerade punkterna (fixarna) i referensnätet bär upp referenssystemet. Som en följd av detta är det naturligtvis viktigt att ajourhålla de markerade punkterna, så att inte den fysiska basen för referenssystemet går om intet.

1.2 Satellitgeodesirevolutionen

I och med att satellitgeodetiska metoder som GPS slog igenom för ungefär 20 år sedan blev läget ett annat. Med ens blev det möjligt att mäta noggrant över mycket långa avstånd. Den enda sikt som behövdes var uppåt, mot satelliterna. Först kunde GPS-mätning med mm- till cm-noggrannhet bara göras med statiska uppställningar och långa observationstider. Sedan dess har utvecklingen gått framåt mot mätning i realtid. Det är nu möjligt att mäta sekundsnabbt med så kallad nätverks-RTK (förutsatt initialisering). Medelfelet ligger idag (2010) runt 15 mm i plan och 20-25 mm i höjd varhelst man är i Sverige. Utvecklingen fort-

sätter fortfarande framåt i rask takt. GNSS används som ett samlingsnamn för flera olika satellitsystem. Idag finns GPS och GLONASS, men flera står för dörren, exempelvis det europeiska Galileo.

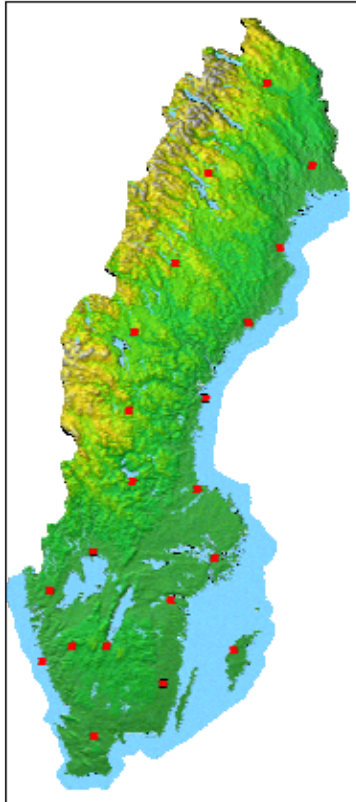
Utvecklingen av de satellitgeodetiska metoderna har inneburit att nya krav ställs på de geodetiska referensnäten och referenssystemen. Med de traditionella mätmetoderna var det enda alternativet att ansluta till de närmaste punkterna i referensnätet, dvs. till punkterna i bruksnätet. Det gjorde därför inte så mycket att det fanns brister i referenssystemen över längre avstånd. Med GNSS är situationen en annan; det mest rationella sättet att utnyttja denna teknik är att mäta relativt ett fåtal basstationer och utnyttja att avståndsberoendet är så litet. Naturligtvis innebär det att referenssystemen också måste vara noggranna över samma långa avstånd, vilket de traditionellt etablerade systemen som regel inte är. De senaste 15 åren har Sverige och andra länder arbetat med att byta till nya referenssystem som klarar de nya krav som GNSS-tekniken ställer.

Ett viktigt steg i utveckling av användandet av GNSS var att införa permanenta referensstationer, som kontinuerligt samlar in data och gör denna tillgänglig för användaren, antingen i realtid eller för efterberäkning. På så sätt behöver användaren bara mäta på nypunkterna och delar referensstationerna med andra användare. Lantmäteriet introducerade i samarbete med Onsala Rymdobservatorium, CTH, redan under den första hälften av 1990-talet det svenska nätet av permanenta referensstationer, SWEPOS®. Nätet bestod först av 21 fundamentalstationer, alla stabilt markerade i urberg med ett inbördes punktavstånd på cirka 200 km. Detta nät har sedan utvidgats så att det nu innehåller cirka 195 stationer (november 2010). De flesta av de nya stationerna är inte förankrade i berg, utan är enklare markerade, på hustak och liknande. Deras huvudsyfte är att användas för SWEPOS nätverks-RTK-tjänst; se ovan. SWEPOS-nätet består idag av klass A och klass B stationer. Klass A är de som är ordentligt markerade i berg, medan de enklare stationerna är av klass B; idag finns 40 klass A och 155 klass B (november 2010).

1.3 Tredimensionella referenssystem anpassade för GNSS-tekniken

Omvänt så har satellitgeodesirevolutionen gjort det möjligt att etablera nya referenssystem med mycket hög noggrannhet över långa avstånd, till och med runt hela jorden. Det bör påpekas att GNSS är en tredimensionell mätteknik, vilket innebär att de referenssystem som bestäms egentligen är tredimensionella. Eftersom höjdkomponenten (höjden över ellipsoiden) inte är direkt användbar som höjd (se avsnitt [1.4](#)), så används vanligtvis framförallt de horisontella komponenterna i referenssystemen. Det bör emellertid påpekas att höjdkomponenten i kombination med en geoidmodell används i ett flertal tillämpningar.

På internationell nivå finns idag ITRF (det senaste är ITRF2008), som i mångt och mycket fungerar som en grund för allt referenssystemsarbete. På grund av kontinentalplattornas rörelser (av storleksordningen 5 cm/år), kan inte ITRF användas direkt för att etablera nya nationella referenssystem. I Europa används



Figur 1.1: De 21 fundamentalstationerna i SWEPOS-nätet.

istället ETRS 89, som med en viss förenkling kan sägas vara ITRF roterat så att det följer med den eurasiska plattans rörelser. Det nya nationella referenssystemet SWEREF 99 är den officiella realiseringen av ETRS 89 i Sverige. Det etablerades genom statisk GNSS-mätning på ett antal permanenta klass A-stationer i Sverige och Norden. I Sverige ingick 21 klass A-stationer med det ungefärliga punktavståndet 200 km i den ursprungliga SWEREF 99-kampanjen. Dessa kallas också för SWEPOS-nätets fundamentalstationer., se figur 1.1. Noggrannheten för SWEREF 99 är mycket hög. Medelfelet ligger inom 1 cm i både horisontal- och höjddled. Dock är noggrannheten något högre i plankomponenterna än i höjdkomponenten.

Det är ingen enkel sak att byta till ett nytt nationellt referenssystem som SWEREF 99. Vid tidpunkten när SWEREF 99 lades fast på fundamentalstationerna arbetade de olika användarna av geografisk information i tidigare nationella system (RT 38, regionsystemen och RT 90) samt i ett stort antal kommunala system. Sedan dess har det skett ett systematiskt arbete för att få över alla användare till SWEREF 99, vilket behövs för att förenkla datautbyte och för att kunna utnyttja GNSS-teknikens

fulla potential. Idag (2010) har till exempel Lantmäteriet och cirka 200 kommuner bytt till SWEREF 99.

För att kunna transformera data från de tidigare systemen till SWEREF 99 behöver ett stort antal stompunkter i det gamla systemet mätas in i SWEREF 99. Att åstadkomma detta blev huvudsyftet för projektet RIX 95, som pågick mellan 1995 och 2006 (Andersson m.fl., 2011). Först mättes en punkt var 50:e km in relativt de 21 fundamentalstationerna i SWEPOS med noggrannast tänkbara teknik, bland annat 48 timmars observationstid, Dorne Margolin antenner och beräkning i Bernprogrammet. Detta resulterade i cirka 300 så kallade SWEREF-punkter. Därefter mättes punkter in i ett tätare nät med den traditionella stommätningstekniken för GNSS (se HMK-GPS). Detta nät består av ungefär 10 000 punkter som ofta kallas för "RIX 95 punkter". Punktavståndet är cirka 5–10 km. RIX 95 punkterna har valts så att de sammanfaller med viktiga stompunkter för de kommunala systemen. Kommunerna behöver sedan mäta in ytterligare passpunkter i SWEREF 99 för att kunna ta fram bra samband och restfelsmodeller.

Låt oss nämna redan här att vi i Sverige valt att definiera SWEREF 99 med hjälp av de 21 fundamentalstationerna i SWEPOS-nätet, mer precist av de klass A stationer som ingick i den ursprungliga SWEREF 99-kampanjen. SWEREF 99 baseras alltså på ett *aktivt referensnät*, vilket innebär att det inte finns några fysiska, markerade punkter som bär upp systemet, som då ett *passivt referensnät* utnyttjas.

Det är istället punkterna tillsammans med GNSS-antennerna, mottagarna, mm., som tillsammans bär upp systemet. Det aktiva nätet kan nyttjas dels genom att användaren hämtar "rådata" och bearbetar dessa tillsammans med egna data för att beräkna läget på inmätta punkter, dels genom att utnyttja någon av SWEPOS positionstjänster, antingen distribuerade korrektionsdata (nätverks-RTK) tillsammans med egna data för att i realtid erhålla läget på inmätta punkter eller SWEPOS beräkningstjänst, där egna data kombineras med SWEPOS-data genom statisk efterberäkning. Detta leder till frågan vilken status SWEREF- och RIX 95-punkterna har. Målet med RIX 95 var att bestämma transformations samband, inte att göra en traditionell förtätning. Ett av syftena med denna rapport är att förklara och motivera varför Lantmäteriet har valt att definiera SWEREF 99 på detta vis, vilket inte är en självklarhet (tycker författarna), och beskriva de konsekvenser detta får när det gäller förvaltning av det nationella referensnätet (riksnätet); se vidare avsnitt [1.5](#).

1.4 Höjdsystem och geoidmodeller

Höjdkomponenten i SWEREF 99 och andra höjder som bestäms direkt med GNSS är uttryckta relativt en referensellipsoid. Det finns åtminstone tre anledningar till varför höjden över ellipsoiden h är olämplig som "höjd" i de flesta praktiska tillämpningar. För det första så används ofta höjdangivelser för att på något sätt hålla reda på hur vatten rinner. Ska till exempel en avloppsledning byggas i ett flackt område är det viktigt att se till att vattnet verkligen rinner åt rätt håll, vilket kräver noggrann höjdbestämmning. Sådana uppgifter blir mycket enklare med ett höjdbegrepp som är relaterat till hur vatten faktiskt betar sig. Skulle höjden över ellipsoiden h användas skulle vattnet ofta rinna från låg höjd till hög. Den andra anledningen är att det känns naturligt att höjden för havsytan är noll (bortsett vågor, tidvatten och andra variationer). Den tredje är att den noggrannaste höjdbestämningsmetoden idag (2010) fortfarande är avvägning, åtminstone över korta avstånd. Denna teknik resulterar inte i höjdskillnader relativt ellipsoiden.

Det är således lämpligare att ange höjden i förhållande till en fysikalisk referensyta som är relaterad till hur vatten rinner och till den typ av höjder som kan mätas med konventionella metoder som avvägning. Denna fysikaliska referensyta är geoiden, vilken definieras som den ekvipotentialyta (nivåyta) i jordens tyngdkraftsfält som så bra som möjligt ansluter sig till havsytans medelnivå. Höjden i förhållande till geoiden brukar kallas höjden över havet och betecknas med H . Geoidhöjden N är avståndet mellan ellipsoiden och geoiden. Följande samband råder alltså,

$$h = N + H \quad (1-1)$$

En geoidmodell är en modell för hur geoidhöjden varierar och möjliggör transformation mellan höjden över ellipsoiden och höjden över havet. För praktiskt bruk används GNSS-bestämda höjder kombinerat med en geoidmodell i ett flertal tillämpningar.

För experten bör det nämnas att vi i denna rapport använder termerna "höjd över havet", geoidhöjd och geoidmodell på ett förenklat sätt för vad som egentligen är normalhöjd, höjdanomali respektive kvasigeoidmodell. Att vi gör det motiveras av att det ger en mer pedagogisk framställning, samtidigt som skillnaden mellan egentlig höjd över havet (ortometrisk höjd) och normalhöjd är liten, etc. I det fall andra komponenter än själva geoidhöjden bakats in i modellen, till exempel korrektioner av olika slag, så är det vidare vanligt att termen höjdkorrektionsmodell används istället för geoidmodell. Vi kommer inte heller att följa detta språkbruk i denna rapport.

Av de skäl som skisserats ovan så använder (endimensionella) höjdsystem höjden över havet H . Eftersom avvägning fortfarande (2010) är den noggrannaste tekniken för inmätning av sådana höjder, så har nya höjdsystem hittills bestämts med denna teknik. Av bland annat denna anledning har inte samma revolution skett när det gäller höjdsystem som i det horisontella (tredimensionella) fallet. Den tredje precisionsavvägningen (riksavvägningen) resulterade så sent som 2005 i det nya nationella höjdsystemet RH 2000. Detta höjdsystem bärs på ett traditionellt sätt upp av de cirka 50 000 höjdfixar som ingick i tredje precisionsavvägningen. Det kan också nämnas att en ny nationell precisionsavvägning just nu (2010) pågår i Tyskland (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie 2009).

På samma sätt som i det horisontella fallet, så finns i Sverige en stor mängd kommunala höjdsystem. Planeringen av riksavvägningen gjordes på ett sådant sätt att kommunerna så lätt som möjligt skulle kunna ansluta sig till RH 2000. Sedan det nya höjdsystemet introducerades 2005 fram till nu (november 2010) har cirka 36 kommuner bytt till RH 2000. För att ta fram sambanden utjämnas de kommunala höjdnäten på nytt, nu med fasta punkter i RH 2000.

Det är emellertid så att GNSS är en mycket effektiv metod också för höjdbestämmning, särskilt nätverks-RTK mot permanenta referensstationer, även om noggrannheten, över korta avstånd, idag (2010) inte riktigt kan mäta sig mot avvägning. GNSS utvecklas dock kontinuerligt och det kan förväntas att noggrannheten för nätverks-RTK kommer att förbättras så att tekniken runt 2020 nästan blir jämförbar med finavvägning också över korta sträckor.

Ett problem med höjdbestämmning med GNSS är att höjderna mätta över ellipsoiden behöver konverteras till höjder över havet med en geoidmodell. Den senaste svenska geoidmodellen, SWEN08_RH2000, är anpassad till SWEREF 99 och RH 2000. Den har beräknats genom att kombinera den gravimetriska geoidmodellen KTH08 med 1570 geoidhöjder beräknade ur GNSS/avvägning; jfr ekvation (1-1). Medelfelet för en geoidhöjd ur SWEN08_RH2000 är 10–15 mm över hela landet, utom till havs och i de delar av de högsta fjällen där riksavvägningen inte dragit fram, där medelfelet är högre. Medelfelet för den GNSS-bestämda höjden över havet σ_H är,

$$\sigma_H = \sqrt{\sigma_{h,GNSS}^2 + \sigma_N^2} \quad (1-2)$$

där $\sigma_{h,GNSS}$ är medelfelet för höjdbestämmningen med GNSS och σ_N är medelfelet för geoidhöjden hämtad ur modellen.

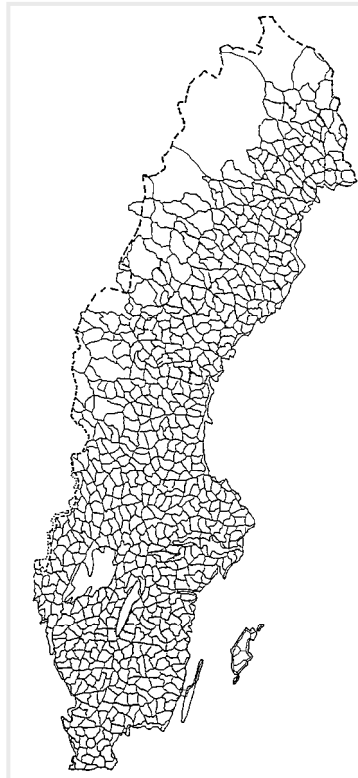
I Sverige har vi valt att definiera RH 2000 utifrån ett passivt referensnät, se figur 1.2. Det är de 50 000 fixarna i riksavvägningen som bär upp systemet. Det kan invändas att en aktiv definition med hjälp av SWEPOS borde föredras även i höjddled. Vi skulle till exempel kunna definiera ett nytt höjdsystem med hjälp av de ursprungliga klass A stationerna i SWEPOS-nätet tillsammans med en viss specificerad geoidmodell, till exempel SWEN08_RH2000. Detta system vore naturligtvis inte längre RH 2000, utan ett nytt höjdsystem som ligger nära RH 2000. Ett syfte med denna rapport är att motivera och förklara varför vi inte föredrar denna typ av definition, som skulle kräva avsevärt mindre underhåll, utan håller oss till en klassisk passiv definition i höjdfallet.

1.5 Syfte och innehåll

För att avgöra vilken geodetisk infrastruktur Lantmäteriet måste utveckla och förvalta i framtiden, så är det viktigt att veta vilka punkter som definierar (realiserar, bär upp) de nationella referenssystemen. Efter GNSS-teknikens genombrott är det inte längre självklart att fysiska, passiva punkter på marken behövs för detta ändamål. Ett mycket glesare referensnät med aktiva referensstationer kan också bära referenssystemet. De aktiva och passiva definitionerna har dock olika konsekvenser för användaren, som det är viktigt att tydligt redovisa.

Huvudsyftet med denna rapport är att presentera och diskutera hur de nationella referenssystemen definieras för att därigenom komma fram till vilken typ av referensnät som behöver utvecklas och förvaltas i framtiden, med tonvikt på perioden 2010–2020. Utöver de två typer av system som redan har introducerats, plan (3D) och höjd, så kommer även referenssystem och referensnät för tyngdkraft att behandlas. Det kommer att visa sig att geoidmodellens noggrannhet är en viktig parameter för hur det nationella höjdsystemet bör definieras. Vad som allmänt behöver göras för att noggrannheten i framtidens geoidmodeller ska förbättras behandlas inte i denna rapport utan i en separat rapport under utarbetande (Ågren, 2011); se också Ågren (2010). De krav som en förbättrad geoidmodell ställer på det nationella tyngdkraftssystemen och på tyngdkraftsnäten tas dock upp i detalj redan här.

Tanken har varit att denna rapport ska sammanfatta hur Geodesienheten (IG) på Lantmäteriet ser på realiseringen av de nationella referenssystemen och den geodetiska infrastrukturens framtida förvaltning. Den är därmed tänkt att utgöra ett komplement till *Geodesi 2010*. Huvuduppgiften för Geodesienheten är att an-



Figur 1.2: Avvägningslinjerna i den tredje precisionsavvägningen (Riksavvägningen).

svara för den geodetiska infrastrukturen på nationell nivå, vilket ska göras på ett opartiskt och objektivt sätt. Geodesienheten ska verka för enhetlighet och samordning, men inte glömma att det finns olika metoder med olika användbarhet och noggrannhet och att olika uppgifter kräver olika angreppssätt. De nationella referensnäten och referenssystemen bör utformas därefter. Det bör poängteras att noggrannhetskraven på de nationella referenssystemen är mycket höga. Kvalitetskraven bör anpassas efter noggrannast tänkbara tillämpning (även framtida). Klaras dessa krav så är mindre noggranna användningsområden inte något problem.

Trots att vi alltså behandlar de nationella näten och systemen, så är många av slutsatserna relevanta också för kommunerna. I detta fall skiljer sig emellertid behoven mellan olika kommuner, varför några allmänna råd inte kommer att ges. Vi förutsätter att kommunerna fortsätter att ansvara för sina stornät och system och att det kommunala självstyret förblir intakt. Trots att kommunerna efter byte till SWEREF 99 och RH 2000 kommer att arbeta i de nationella systemen, så är det ändå upp till varje kommun att besluta hur dessa system ska realiserar inom kommunen ifråga. I de flesta fall behöver kommunerna underhålla någon form av referensnät utöver de nationella. Behoven i till exempel Stockholm skiljer sig dock avsevärt från behoven i en glesbygdskommun. Vi återkommer till denna fråga i avsnitt [2.2](#).

Texten är organiserad enligt följande. Kapitel 2 behandlar definitionen av de nationella referenssystemen i plan (3D) och höjd. Det utgör således en fortsättning på introduktionsavsnitten 1.1–1.4. Kapitel 3 behandlar sedan vilka följder detta får när det gäller förvaltning och ajourhållning av de nationella referensnäten i 3D/plan och höjd. Vi använder här termen förvaltning inte bara för underhåll av aktiva och passiva referensnät utan också för den utveckling som behövs för att garantera förhållandevis effektiv och noggrann mätning i landet (t.ex. utveckling av bättre landhöjnings- och geoidmodeller i framtiden).

I kapitel 4 behandlas den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft. Anledningen till att denna diskussion placerats för sig självt, sist i rapporten är att de överväganden som här görs är ganska olika jämfört med de i kapitel 2 och 3. Avsnitt 4.1 redovisar den nuvarande situationen när det gäller både referensnät och referenssystem för tyngdkraft. I avsnitt 4.2 diskuteras sedan det framtida behovet och förslag ges för hur situationen bör förbättras under perioden 2010 – 2020. Det bör nämnas att detta kapitel inte behandlar frågan hur mycket kompletterande tyngdkraftsdetalj mätning som behövs (i det så kallade detaljnätet för tyngdkraft). Denna fråga tas istället upp i Ågren (2010). Rapporten avslutas i kapitel 5 med en sammanfattning av de viktigaste slutsatserna och rekommendationerna.

2 Definition av de nationella referensnäten i plan (3D) och höjd

Syftet med detta kapitel är att diskutera och slå fast definitionerna av de nationella referenssystemen SWEREF 99 och RH 2000 för att på så sätt motivera vilka

typer av riksnät Lantmäteriet måste förvalta i framtiden. Några alternativa definitioner diskuteras också.

2.1 Allmänt om geodetiska referensnät och referenssystem

Innan detaljerna rörande SWEREF 99 och RH 2000 presenteras är det lämpligt att förklara termerna referensnät och referenssystem. Det är nämligen så att olika författare använder dem olika. I detta avsnitt hålls diskussionen på ett allmänt plan utan onödiga komplikationer.

Inledningsvis ett litet tankeexperiment: Anta att vi ska starta från början och göra en noggrann karta. Oavsett vilken mätmetod vi väljer är det viktigt att observera att all mätning är relativ. Vi kan inte på något sätt bestämma det "absoluta läget", utan bara mäta in objekten relativt andra punkter som redan är kända. För att vi ska kunna komma igång med kartan, verkar det alltså som en god idé att välja ut ett antal referenspunkter som helt täcker vårt område, bestämma de inbördes lägena mellan dessa och sedan lägga fast alltihop på lämpligt sätt. Sedan kan vi mäta in alla objekt relativt referenspunkterna.

Ovan talas om att mäta in ett läge. En relevant fråga här är hur dessa lägen anges. För att representera en punkts läge behövs ett *koordinatsystem*, i vilket punktens läge kan uttryckas numeriskt (i siffror) genom projektion på ett antal koordinataxlar, t.ex. i det tredimensionella rummet behövs tre axlar, i planet två och i höjddled bara en. Det är viktigt att inse att ett koordinatsystem i sig inte är tillräckligt för att ange punkters läge. Beroende på hur axlarna förhåller sig till jorden, så fås olika koordinater på samma punkt. För att få entydighet behöver vi ett *referenssystem*, som är ett koordinatsystem som kopplats fast i förhållande till jorden. I praktiken utförs detta fastläggande när referenspunkternas lägen koordinatbestäms med hjälp av geodetiska mätningar.

Ett geodetiskt *referenssystem* består alltså av ett *koordinatsystem*, som har relaterats till jorden genom att koordinater har bestämts för ett *referensnät* av punkter. Dessa koordinater sägs *realisera* eller *bära upp* referenssystemet. Ett referenssystem är den fasta "referensram" mot vilken nya punkter kan bestämmas (på engelska kallas referenssystem ofta just för *reference frame*). En annan aspekt rörande etableringen av referenssystem, är att de måste läggas fast med geodetiska observationer. Eftersom alla observationer i någon mån är behäftade med fel (det går inte att mäta helt exakt), resulterar olika referenssystem i olika koordinater för en och samma punkt, även om exakt samma koordinatsystem och samma avsedda inplacering av detta i förhållande till jorden används.

Vid definition ett visst referenssystem måste således följande specificeras

- Det/de koordinatsystem som används. Observera att det ibland är möjligt att ange samma läge i ett referenssystem med olika typer av koordinater (koordinatsystem). Till exempel så kan samma tredimensionella läge ges antingen med geodetiska (φ, λ, h) eller kartesiska (X, Y, Z) koordinater.

- Punkterna i referensnätet.
- Koordinaterna på punkterna i referensnätet.

Ovanstående lista innehåller vad som behövs för att använda referenssystemet. Ibland brukar även en teoretisk systemdefinition förekomma, som specificerar allt det som beräknar referenssystemet behöver anta för att komma från de geodetiska observationerna till koordinaterna på punkterna i referensnätet. Denna teoretiska definition har ingen funktion i denna rapport, varför den utelämnas här.

En närmare studie av definitionen i listan ovan visar hur pass tillämplig den är för aktiva och passiva referensnät. Det är utan tvivel så att den är framtagen med traditionella, *passiva referensnät* för ögonen. För ett *aktivt referensnät* bestående av ett mindre antal permanenta referensstationer långt ifrån varandra räcker det inte med att bara ange koordinater för referensnätet. Nypunkterna kommer att få olika koordinater om den elektriska miljön på stationerna ändras eller om jordskorpan rör sig. Man kan naturligtvis fråga sig om det verkligen är eftersträvansvärt att det aktivt definierade referenssystemet inte förändras sig med tiden. Med detta menas alltså att man ska få samma koordinater på alla passiva punkter (naturligtvis inom mätnoggrannheten) om de bestäms så noggrant som möjligt vid *olika tidpunkter*. Det känns ganska självklart att detta faktiskt är något eftersträvansvärt. I annat fall kommer inte nybestämda punkter stämma överrens med tidigare inmätta punkter och data.

För att se till att det aktivt definierade referenssystemet blir så tidsberoende som möjligt behöver ovanstående lista utökas med ytterligare en punkt, som reglerar att bestämning av nya punkter ger samma koordinater som om bestämningen hade gjorts vid referensepoken. Om referensnätet är tillräckligt glest innebär det att korrektionsmodeller för geodynamiska rörelser ska användas. Det förutsätts också att det på något sätt kompenseras för ändringar av mät- och beräkningssystemet för det aktiva referensnätet, framförallt när det gäller den elektriska miljön på referensstationerna (antennar, pelare, radomer, etc.).

Innan ytterligare en punkt till listan ovan formuleras behöver geodynamiska korrektionsmodeller diskuteras mer i detalj. Om diskussionen begränsas till Sverige, så är den *postglaciala landhöjningen* den absolut viktigaste geodynamiska rörelsen. Detta fenomen beror på att jordskorpan under den senaste istiden var nedtryckt av den kilometertjocka inlandsisen. När isen smälter strävar jordskorpan efter att återta sitt tidigare läge, vilket beror på att den elastiska jordskorpan flyter på den trögflytande manteln (i det långa tidsperspektivet).

Landhöjningen är störst i vertikalled, i norra Sverige vid Bottenvikskusten upp till cirka 1 cm/år, men påverkar också de horisontella komponenterna med i storleksordningen ett par mm/år. Landhöjningen kan mätas genom att upprepa olika typer av observationer under lång tid, exempelvis

- Havsnivåobservationer vid mareografer.
- GNSS-mätningar vid permanenta referensstationer.

- Absolut och relativ tyngdkraftsmätning.
- Precisionsavvägning.

Dessutom kan observationer av gamla, daterade strandlinjer (som numera ligger uppe på land) användas. De olika observationerna ger olika sorts information om landhöjningen och kompletterar varandra. GNSS är dock den enda teknik ovan som ger information om rörelse i horisontalld.

En viktig aspekt när det gäller den postglaciala landhöjningen är att fenomenet är jämnt (smooth) till sin natur. Detta beror på att jordskorpan (litosfären) är elastisk med en viss stelhet, som gör att den inte deformeras hur häftigt som helst (om den inte brister vill säga, se tektoniska rörelser nedan). Detta gör att det är förhållandevis lätt att modellera landhöjningen. I samband med slutberäkningen av höjdsystemet RH 2000 togs en ny landhöjningsmodell fram - RH 2000 LU. Denna modell blev senare antagen som nordisk modell av den Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG), med huvudsyftet att användas vid utjämningen av de nordiska avvägningsnäten (den Baltiska avvägningsringen), och fick då namnet NKG2005LU. Den baseras på observationer från mareografer, upprepade precisionsavvägningar och data från fasta referensstationer för GPS. För området utanför de nordiska länderna är landhöjningen skattad ur en geofysisk så kallad GIA-modell, som är baserad på teorier om inlandsisens tjocklek och egenskaper hos manteln och jordskorpan. I framtiden bör så bra geofysiska GIA-modeller som möjligt tas fram över de nordiska länderna, vilket kräver internationellt samarbete. Dessa modeller bör beräknas utgående från samtliga observationstyper i punktlistan ovan, naturligtvis på ett sådant sätt att hänsyn tas till deras respektive noggrannhet och det bidrag de ger.

Trots att landhöjningen är det i särklass viktigaste geodynamiska fenomenet i Sverige, så förkommer även andra rörelser i jordskorpan. Viktigast i detta sammanhang är tektoniska rörelser som förekommer i samband med jordbävningar, huvudsakligen inom begränsade förkastningszoner (t.ex. Törnquistzonen i Skåne). Det råder för närvarande osäkerhet om hur stora dessa rörelser kan vara, men allting tyder på att de är små över så gott som hela landet med ett rms väl under 0,3-0,4 mm/år. I vissa områden kan de dock vara signifikanta men eftersom rörelserna ifråga sker plötsligt längs förkastningar, så är det mer eller mindre omöjligt att modellera dem med tillräcklig noggrannhet för att korrigera referenssystem. Därför bör ej heller korrektionsmodeller för detta införas. På samma sätt bör försök att modellera andra lokala geologiska företeelser, exempelvis "landslide", undvikas. För att få med punkten om tidsberoende i definitionen av ett referenssystem med aktivt referensnät, så införas begränsningen "bortsett från lokala rörelser". Med "lokala" menas här en upplösning (halv våglängd) mindre än cirka 100 km. Med en sådan begränsning är det bara den postglaciala landhöjningen (i höjd- och horisontalld) som ska tas om hand av de geodynamiska modellerna.

En invändning här är att det är olämpligt bygga in korrektionsmodeller i systemdefinitionen eftersom de gradvis kommer att kunna beräknas bättre modeller. Och detta är naturligtvis alldeles riktigt. För att undvika denna konsek-

kvens ska "bästa tillgängliga" korrektionsmodeller användas. Referenssystemet definieras alltså så att bestämningen av nypunkter ska bli så tidsberoende som möjligt. Lokala rörelser med en halv våglängd mindre än cirka 100 km förutsätts dock okorrigerade. Detta innebär att ett visst tidsberoende fås lokalt i de områden där vi faktiskt har lokala rörelser; se vidare diskussionen i avsnitt [2.2](#).

Sammanfattningsvis, för att entydigt definiera ett referenssystem med ett aktivt referensnät anges

- Det/de koordinatsystem som används. Observera att det ibland är möjligt att ange samma läge i ett referenssystem med olika typer av koordinater (koordinatsystem). Till exempel så kan samma tredimensionella läge ges antingen med geodetiska (ϕ, λ, h) eller kartesiska (X,Y,Z) koordinater.
- Punkterna i referensnätet.
- Koordinaterna på punkterna i referensnätet.
- Systemets referensepok. Detta innebär att en tillräckligt bra korrektionsmodell ska användas för att vid behov räkna tillbaka inmätta koordinater till tidpunkten för referensepok. Ur ett systemförvaltningsperspektiv innebär det att *bästa tillgängliga* korrektionsmodell ska utnyttjas. Modellerna behöver alltså uppdateras kontinuerligt. Det förutsätts vidare att inga korrektioner görs för lokala geodynamiska rörelser med en upplösning mindre än cirka 100 km.

För att definiera de nationella referenssystemen behöver komponenterna i de två listorna ovan anges. Den första listan på sidan [8](#) gäller för passiva referensnät, medan den andra är för aktiva nät. Resten av detta kapitel kommer att fokuseras framförallt att på de nationella referensnäten (riksnäten), dvs. de punkter som används för att *definiera* de nationella referenssystemen. Anledningen till att vi koncentrerar oss på dessa nät är att Lantmäteriet har ett ansvar att förvalta de ingående punkterna. Sedan är det möjligt att Lantmäteriet av en eller annan anledning även måste underhålla andra punkter (se till exempel avsnitt [2.3](#)).

Det bör åter igen poängteras att det i denna rapport är frågan vilka referensnät som behövs för att bära upp de nationella referenssystemen. Det är alltså inte frågan om i vilken grad en användare behöver etablera punkter på marken för att lösa vissa uppgifter. Han/hon är alltid fri att lägga ut hur många punkter som helst. Dessa punkter definierar dock inte det nationella referenssystemet för någon annan än denne användare själv. De har bestämts i det nationella referenssystemet med en viss osäkerhet (medelfel).

2.2 Om definitionen av SWEREF 99

Som nämndes i introduktionen så definierar Lantmäteriet SWEREF 99 med hjälp av ett aktivt referensnät bestående av de 21 fundamentalstationerna i SWEPOS-nätet; se Jivall (2001). Referensepokan är 1999.5, bästa tillgängliga landhöjningsmodell ska utnyttjas och lokala rörelser (mindre än cirka 100 km) modelleras inte. Den landhöjningsmodell som just nu (2010) används är NKG_RF03vel, vilken be-

står av NKG2005LU (Ågren och Svensson, 2007) i höjd och Milne (2001), transformerad till hastighetsfältet i Lidberg (2004), i horisontalld. Dessa kommer så småningom att uppdateras. Idag har ännu inte landet hunnit deformeras så mycket, vilket gör att betydelsen av dessa modeller ännu är relativt begränsad. De blir naturligtvis viktigare allteftersom tiden går. Det bör vidare nämnas att SWEREF 99 är ett tredimensionellt system. Det används dock som nationellt referenssystem enbart i horisontalld, vilket innebär att vi i detta avsnitt kommer att koncentrera oss på de horisontella komponenterna. Hur användbar den 3:e komponenten (höjden över ellipsoiden) är i sig självt diskuteras vidare i avsnitt [2.4](#) (den är som tidigare sagts mycket användbar tillsammans med en geoidmodell).

Denna aktiva definition är dock inte den enda tänkbara. Det vore också möjligt att definiera SWEREF 99 med ett tätt passivt referensnät bestående av alla SWEREF- och RIX 95-punkter; se avsnitt [1.3](#). Det ungefärliga punktavståndet i detta fall är 5–10 km och alternativet bör tas på allvar. Huvudsyftet med detta avsnitt är att diskutera för- och nackdelar med de två definitionerna för att motivera varför den aktiva varianten valdes. Det är också ett bra sätt att förklara vad den aktiva definitionen faktiskt innebär. Den kräver nämligen ett lite annat betraktelsesätt än det traditionella. Så länge både den aktiva och den passiva realiseringen stämmer överens med varandra är det inget problem. Om/när de börjar avvika från varandra så måste det vara klart vad som verkligen realiserar SWEREF 99.

De två definitionerna benämns den aktiva respektive den passiva. Nedan följer en argumentationsanalys, som inleds med en kort sammanfattning av argumenten för och emot de två definitionerna. Efter det följer en utvärderande diskussion Observera att argumenten till stor del är komplementära, så att argument för det ena alternativet är argument mot det andra, etc.

Argument för och emot den valda, aktiva definitionen av SWEREF 99:

- + Ingen ajourhållning av passiva punkter i onödan.
- + Rationell mätning med GNSS.
- + Ingen risk att bygga fast oss i en förtätning som inte håller tillräckligt hög kvalitet jämfört med den framtida noggrannheten för GNSS.
- + Kontroll av att markeringarna för de definierande referensstationerna är stabila görs med jämna mellanrum mot ett lokalt nät runt stationen. Dessutom sker en kontinuerlig kontroll mot de omgivande stationerna.
- Hopp vid byte av landhöjningsmodell eller om okorrigerade förändringar görs i det aktiva mät- och beräkningssystemet.
- I vissa områden problem med dålig överensstämmelse mot redan inmätta data som härstammar från SWEREF- och RIX 95-punkterna.
- Problem vid eventuella lokala rörelser mellan referensstationerna (karaktäristisk upplösning kortare än cirka 100 km). Som nämndes i avsnitt

2.1 är det rimligt att anta att vi inte kommer att kunna modellera mer finstilta rörelser än så. De kan dock finnas i vissa områden.

Argument för och emot den förkastade, passiva definitionen av SWEREF 99:

- + Inget hopp vid byte av landhöjningsmodell eller vid förändring av mät- och beräkningssystemet för de permanenta referensstationerna.
- + Geodynamiska rörelser (med karaktäristisk upplösning signifikant längre än cirka 5 - 10 km) är inte något problem förutsatt att anslutning sker på närmaste passiva riksnätspunkt. Dock är ännu högre frekvenser problematiska, som alltid.
- + God överrensstämmelse garanterad mot redan inmätta data som har bestämts med hjälp av RIX 95-punkterna.
- Omfattande ajourhållning behövs samtidigt som ungefär motsvarande nät av permanenta referensstationer måste drivas ändå.
- Inte rationell mätning med GNSS. Vid högre noggrannhetskrav måste lokal anslutning på något sätt göras mot de närmaste RIX 95 punkterna.
- Konservering av RIX 95, när GNSS-mätningen blir noggrannare imorgon så kommer detta att vara hämmande.
- Problem med att den passiva markeringen kan rubbas ur sitt läge. Detta kan emellertid lösas genom att alltid ansluta på flera RIX 95-punkter. Systemet kan anses som realiserat av alla de RIX 95 punkter som stämmer överrens med sina grannar (anslut alltid på flera RIX95 punkter).

Diskussion och värdering av argumenten

En stor fördel med den aktiva definitionen är att ajourhållning av ett tätt nät med passiva punkter utgår, samtidigt som ett lika omfattande nät av permanenta referensstationer som för det aktiva fallet ändå behövs. Den passiva definitionen är således den dyrare av de två. Frågan är om det ger något mervärde.

Den viktigaste fördelen med den passiva definitionen är att inverkan av de kortvågiga geodynamiska rörelserna undviks lite mer. Vi blir också mer eller mindre oberoende av förändringar i mät- och beräkningssystemet för de permanenta referensstationerna, till exempel när det gäller byte av landhöjningsmodell. Dessutom kommer referenssystemet att stämma mot redan inmätta data. RIX 95-punkterna har ju redan använts för allehanda uppgifter, bland annat för att ansluta många kommunala system till SWEREF 99.

Det är viktigt att inse att dessa fördelar enbart uppnås om man alltid ansluter på de närmaste RIX 95-punkterna och på så sätt interpolerar in allt i det passivt definierade referenssystemet. Vid mätning med nätverks-RTK kräver det antingen att lokala inpassningar görs, vilket är mycket arbetskrävande, eller att en tidigare bestämd lokal korrektionsmodell (restfelsmodell) utnyttjas. Dylåka inpassningar måste utföras med stor omsorg. En slarvigt gjord inpassning

kommer att ge upphov till ett systematiskt fel för alla punkter som sedan mäts in. Inpassningen bör dessutom göras på tillräckligt många punkter (minst tre, helst fler) för att möjliggöra en tillfredställande anslutning. Att bara ansluta på en punkt är olämpligt eftersom dennas markering kan vara dålig och ha rört på sig. Att använda en korrektionsmodell kräver inte lika mycket arbete. Lägg dock märke till att för att undvika att resultatet blir beroende av förändringar i mät- och beräkningssystemet för de permanenta referensstationerna (som var en fördel med konceptet), så behöver korrektionsmodellen kontrolleras och uppdateras regelbundet. Ska den också ta om hand mer lokala geodynamiska rörelser (en annan påstådd fördel), så måste den nybestämmas ofta. Slutsatsen av ovanstående blir att den passiva definitionen ger vissa fördelar, men de fås till ett högt pris, både när det gäller underhåll och en mer omständlig och dyrare mätmetodik med GNSS.

Ett mycket viktigt argument för den aktiva definitionen är att GNSS-tekniken kommer att förbättras i framtiden, vad gäller både noggrannhet och tillförlitlighet. Frågan är väl egentligen bara hur mycket. Detta innebär att det är direkt olämpligt att välja ett framtida koncept där alla mätningar trycks in i en gammal förtätning (RIX 95). Inmätningen i RIX 95-projektet har inte gjorts på något dåligt sätt, tvärtom, men sett i ljuset av den noggrannhet som kommer att vara möjligt runt 2020, så är det högst troligt att denna realisering inte håller måttet. Om den passiva definitionen skulle ha valts och vi sedan upplever RIX 95-förtätningen som dålig, så finns risken att detta driver fram ett byte till ett nytt nationellt referenssystem, vilket kan bli mycket kostsamt.

Det är viktigt med god överensstämmelse mot redan inmätta detaljer, dvs. den externa noggrannheten i förhållande till redan bestämda punkter måste vara hög (även om dessa inte är markerade som stompunkter). Det är således också viktigt mot SWEREF- och RIX95-punkterna, eftersom dessa används för att transformera kommunala och andra referenssystem (och enorma mängder information). Detta talar, som sagts ovan, för den passiva definitionen. Det är dock så att SWEREF 99 realiserat genom SWEPOS och realiserat genom RIX 95 idag stämmer överrens inom mätnoggrannheten i större delen av landet (säg 95 %). Att av den anledning underhålla ett landsomfattande nät av passivt markerade punkter känns som slöseri med resurser. Nya punkter kan lätt mätas in igen närhelst de behövs. Genom att använda den statistiska GNSS-metoden med längre observationstid och SWEPOS beräkningstjänst (Bernprogrammet), så kan detta redan idag enkelt göras med hög noggrannhet.

Genom att väga ovanstående argument mot varandra valde Lantmäteriet att satsa på den aktiva definitionen av det nya nationella referenssystemet SWEREF 99. Två stora fördelar är att ingen resurskrävande ajourhållning av ett tätt passivt nät krävs och att GNSS-mätning kan utföras mer rationellt. Definitionen tar dessutom hänsyn till att mätnoggrannheten för GNSS kommer att förbättras i framtiden. Den aktiva definitionen har ett antal problem (se minustecknen i listan ovan), men de bedöms bara vara kritiska för en liten del av riket. Dessutom, i de sällsynta områden där det faktiskt är problem, är det aktiva referensnätet ett bra verktyg för att göra något åt saken, och då bara i dessa

områden. Ett sätt är att bestämma korrektionsmodeller (restfelsmodeller), ett annat är att lokalt byta referenssystem till den vid tidpunkten gällande realiseringen av SWEREF 99. Observera att om det finns lokala geodynamiska rörelser i ett mindre område (som ju inte ska hanteras av landhöjningsmodellen), så är SWEREF 99 tidsberoende på marken där. Den aktiva definitionen erbjuder alltså ett delvis självregenererande system. I framtiden möjliggörs också successiv uppbyggnad när GNSS-tekniken blir bättre, vilket definitivt är en fördel.

En nackdel med den aktiva definitionen är att en förändring i referenssystemet kan uppstå om mät- och beräkningssystemet ändras på ett okorrigerat vis. Eftersom det aktiva systemet i sig själv inte innehåller oberoende kontrollmöjligheter för alla sådana förändringar, så införde Lantmäteriet 2007 så kallade försäkringspunkter. Dessa behandlas i nästa avsnitt. Först diskuteras ytterligare två aspekter av den aktiva definitionen av SWEREF 99, som illustrerar hur den ska tolkas.

Punkter på marken i stenstaden?

En invändning som ofta görs i detta sammanhang är att passiva stompunkter åtminstone behövs på marken i stenstaden, exempelvis i Stockholms innerstad. Detta är alldeles riktigt, men frågan är nu om detta på något sätt ska påverka definitionen av SWEREF 99. Som vi tidigare poängterat så är användaren fri att markera och använda vilka punkter han/hon vill, men detta innebär inte att de för den skull ska inkluderas som passiva riksnätspunkter.

Lantmäteriets inställning är att det är kommunens ansvar att svara för det stomnät som behövs i stenstaden och liknande områden med begränsad sikt uppåt. Kommunens realisering av SWEREF 99 bör naturligtvis vara konsistent med SWEREF 99 i luften (via det aktiva referensnätet). Visserligen har vi ingen möjlighet att överallt i staden mäta direkt med GNSS, men det går på bergknallar, tak, torg, parker och andra speciella platser med god sikt mot satelliterna. Eftersom ett konventionellt stomnät finns, eller kan etableras, mellan sådana potentiella GNSS-punkter och de markerade stompunkter som krävs, så finns ingen speciell anledning att inkludera dessa punkter i referensnätet för SWEREF 99. Om sådana punkter tas med, borde då inte stompunkter i tunnlar, inomhus och under jorden också inkluderas? För detta ställningstagande talar också att det är en klar fördel med en enhetlig definition. Observera att den aktiva definitionen inte säger någonting om att all mätning måste ske med GNSS-teknik mot permanenta referensstationer. Den säger egentligen bara vad som bär referenssystemet. Sedan får användare lösa sina problem på bästa möjliga vis, med eller utan markerade punkter.

Om användningen av RIX 95-punkterna

Att den aktiva definitionen för SWEREF 99 valts, innebär heller inte att RIX 95-punkterna nödvändigtvis är ointressanta. Det innebär bara att dessa punkter *inte* realiserar referenssystemet och därigenom inte är felfria. Det medför också att de inte kommer att ajourhållas av Lantmäteriet. Å andra sidan kommer de inte heller att sprängas bort. De kan tillsvidare med fördel användas som

hjälpunkter för att bestämma nya punkter i SWEREF 99, t.ex. för att ansluta lokala system. Medelfelet i horisontalld blir

$$\sigma_{plan} = \sqrt{\sigma_{mätning\ mot\ RIX95}^2 + \sigma_{RIX95}^2} \quad (2-1)$$

där σ_{RIX95} är medelfelet för RIX 95 punkterna i horisontalld, som ligger runt 10 mm. Förutsatt relativ mätning över korta avstånd, så är σ_{plan} idag (2010) av samma storleksordning som medelfelet för mätning med Nätverks-RTK mot SWEPOS. När noggrannheten för GNSS förbättras i framtiden så kommer dock σ_{RIX95} att gradvis bli mer besvärande. En övergång till mätning relativt det aktiva referensnätet (SWEPOS) kommer då successivt att ske och denna ses som den riktiga. Parallellt med denna utveckling kommer också fler och fler riksnätspunkter försvinna eftersom de inte ajourhålls.

En relaterad aspekt av den aktiva definitionen är att det inte är lika enkelt att utnyttja RIX 95 punkter för kontrolländamål som i det passiva fallet. Eftersom RIX 95 punkterna har medelfelet σ_{RIX95} i SWEREF 99, så fås förhållandevis höga felgränser. Hade den passiva vägen valts, så skulle dessa punkter förutsatts vara felfria, viket hade gjort felgränserna lägre. (Det bör dock observeras att hänsyn alltid måste tas till att enstaka RIX 95-markeringar kan ha rubbats ur sitt läge.)

Det är således viktigt att anpassa mät- och kontrollmetodik efter den nya definitionen. Det är för det första viktigt att kontrollera att allting står rätt till med det aktiva mät- och beräkningssystemet, både hos den som tillhandhåller tjänsten och på användarsidan. Sedan bör användaren se till att kontrollera sig mot sådant som mätningarna måste stämma emot. Det kan till exempel vara tidigare detaljmätning som gjorts i området, tidigare mätningar i samma projekt, osv. I den kontrollerbarhetsmetodik som bör användas i det aktiva fallet är det sådana överväganden som styr och inte ett givet passivt definierat nationellt system.

2.3 Försäkringspunkter

Med valet att definiera SWEREF 99 med ett aktivt referensnät följer att referenssystemet (så att säga) hänger i luften. I slutet av förra avsnittet antydde vikten av att kunna kontrollera att allting står rätt till med det aktiva referensnätet. En viktig kontroll, som bör kunna utföras vid behov, är att mäta upp om något har hänt på de aktiva referensstationerna, som resulterar i ändrade koordinater. För detta ändamål krävs ett antal prioriterade punkter som är stabila och som dessutom är passiva och tillgängliga för alla. Det är alltid en fara att interna inkompetensproblem hos den organisation som driver det aktiva referensnätet leder till att referenssystemet ändras, kanske oavsiktligt. Även om inga sådana problem finns nu, eller ser ut att kunna uppstå de närmaste åren, så är det omöjligt att sia om framtiden. Skulle någon annan än Lantmäteriet ta över driften av SWEPOS, till exempel en privat aktör, så är det naturligtvis viktigt att det finns passiva punkter som är lämpliga för kontroller. En annan viktig kontroll är att användarens mät- och beräkningssystem är korrekt inställt, vilket

med fördel utförs på en testpunkt utanför kontoret. Innan referenskoordinater slås fast för denna rekommenderas dock att en kontroll görs på en punkt helt säkert stabil och opåverkad av lokala geodynamiska rörelser. För att möta dessa kontrollbehov införde Lantmäteriet år 2007 så kallade försäkringspunkter. Ytterligare ett syfte med dessa är att användas för kontroll av landhöjningsmodeller och ge kompletterande information om eventuella rörelser mellan referensstationerna. Det är inte i första hand meningen att försäkringspunkterna ska användas direkt som observationer vid landhöjningsmodellering. Huvudpoängen är att genom upprepade mätningar kunna fastställa om punkterna är stabila eller inte i förhållande till de definierande aktiva referensstationerna, förutsatt "bästa tillgängliga" landhöjningsmodell.

Kortare uttryckt, en *försäkringspunkt* är en passiv punkt på marken med god sikt mot GNSS-satelliterna, som används för att kontrollera dels mät- och beräkningssystemet för det aktiva referensnätet, dels geodynamiska rörelser mellan referensstationerna. Användaren kan också använda dessa punkter som stabila kontrollpunkter för att verifiera det egna mätsystemet. Det bör poängteras att försäkringspunkterna inte på något sätt definierar eller bär upp SWEREF 99. De fyller dock en viktig funktion för det aktivt definierade nationella referenssystemet. De används för att *försäkra* att den externa noggrannheten för det aktiva nätet av referensstationer är tillräckligt hög över tiden. Med god extern noggrannhet menas här att de positioner som bestäms för passiva punkter är stabila över tiden.

Som försäkringspunkter valdes de cirka 300 SWEREF-punkter som var fasta vid utjämningen av RIX 95-nätet. Det finns alltså en försäkringspunkt ungefär var 50:e km. Punkterna mäts sedan in med jämna mellanrum (vart 6:e år) med den state-of-the-art teknik som användes för den ursprungliga SWEREF-punktsbestämningen (avsnitt [1.3](#)). Mer om försäkringspunkterna följer i avsnitt [3.2](#).

2.4 Om definitionen av det nationella höjdsystemet RH 2000

Det nya nationella höjdsystemet RH 2000 realiserar av höjderna över havet på de cirka 50 000 höjdfixar som precisionsavvägdes i riksavvägningen. Det är dock inte de individuella fixarna som bär upp systemet, utan de fixar som överensstämmer med sina grannar. På så sätt undviks problemet med instabil markering. En klar nackdel med denna definition är att en ganska omfattande ajourhållning krävs; se vidare avsnitt [3.3](#). Man kan invända att en aktiv definition borde vara att föredra även i höjddled, mycket baserat på liknande argument som användes i avsnitt [2.2](#). Här diskuteras om det är lämpligt att uppdatera den passiva definitionen av RH 2000 till en aktiv motsvarighet och vilka krav detta skulle ställa på den geodetiska infrastrukturen.

Låt oss först diskutera hur ett aktivt definierat RH 2000 skulle kunna se ut. Det bästa alternativet verkar vara att utforma det på samma sätt som SWEREF 99 (avsnitt [2.2](#)), men med den skillnaden att en specificerad geoidmodell tas med i definitionen. Detta innebär att höjdsystemet bärs upp av fundamentalstationerna

i SWEPOS-nätet, referensepoken, bästa tillgängliga landhöjningsmodell (som inte modellerar lokala rörelser) och den valda geoidmodellen. Det aktiva alternativet innebär alltså *inte* att vi definierar höjdsystemet direkt med höjden över ellipsoiden h i SWEREF 99. Argument mot detta presenterades redan i avsnitt [1.4](#).

Frågan är nu vilken geoidmodell som skulle väljas i den aktiva definitionen. Ytterligare en fråga är om vi överhuvudtaget behöver välja en viss modell. Kan vi inte säga som när det gäller landhöjningsmodeller, dvs. att *bästa tillgängliga* geoidmodell ska användas? Den viktigaste anledningen till att detta inte går är att skillnaderna (hoppen) mellan successiva geoidmodeller skulle bli alldeles för stora, särskilt i de delar som inte täcks av GNSS/avvägningsobservationer. Dagens geoidmodeller är inte tillräckligt noggranna, vilket även kommer att vara fallet åtminstone under den första hälften av perioden 2010–2020. För SWEN08_RH2000 har vi till exempel angett medelfelet 10–15 mm i de områden där GNSS/avvägning finns. Observera att detta är liktydigt med att vi i 5% av landet har geoidfel som är större än cirka 20–30 mm. I fjällen och till havs kan mycket större skillnader förväntas när geoidmodellen uppdateras. Tyvärr är det vidare svårt att få felen för successiva geoidmodeller att närma sig noll på ett icke-alternerande sätt (med samma tecken); se undersökning i Ågren (2011). Skillnaden mellan modellerna kan därför mycket väl ligga i samma storleksordning som geoidmodellsfelet. Vi drar slutsatsen att vi inte kan definiera ett höjdsystem med *bästa tillgängliga* geoidmodell, åtminstone inte så länge signifikanta hopp riskeras vid uppdatering av geoidmodellen.

Vilken geoidmodell ska vi då välja för vår hypotetiska aktiva definition? Eftersom det passivt definierade RH 2000 redan har börjat användas, införs i kommuner, etc., så är det mer eller mindre ett krav att välja en modell som så bra som möjligt ansluter sig till detta höjdsystem. Av denna anledning är det fördelaktigt att välja en geoidmodell som har beräknats genom att utnyttja GNSS/avvägning, t.ex. SWEN08_RH2000. I annat fall kommer inte de långvägiga felen i höjdsystemet att modelleras. Dessa fel är i och för sig begränsade för RH 2000. De skattade relativa medelfelen från utjämnningen av RH 2000 är maximalt cirka 15 mm inom Sveriges gränser. Över avstånd runt 500 km är de strax under 10 mm, över 50 km, cirka 5 mm; se vidare Ågren (2011). I detta sammanhang är dessa fel definitivt stora nog för att behöva modelleras över lite längre avstånd.

Det är naturligtvis även möjligt att definiera ett nytt aktivt höjdsystem med en rent gravimetrisk geoidmodell, men då kan vi förvänta oss större hopp i förhållande till dagens passivt definierade RH 2000. På grund av de långvägiga felen som nämndes ovan skulle detta vara liktydigt med att etablera ett helt nytt höjdsystem. I GNSS/avvägningsfallet kan vi i bästa fall föra in (smyga in) det nya aktiva systemet som en modifiering eller uppdatering av det gamla passiva RH 2000 (så att säga).

En relevant fråga är vilken roll GNSS/avvägningspunkterna får i det aktiva fallet. Behöver inte dessa underhållas även i det fall? Så länge höjdsystemet är definierat med *en* fastlagd geoidmodell används inte dessa punkter för att på något sätt bära upp systemet. Som vi förstår den aktiva definitionen här spelar

det ingen roll om de förgås eller inte. I och med att vi tar steget till det *aktiva* RH 2000, så släpper vi i strikt mening all kontakt med punkterna på marken. Det är fundamentalstationerna, referensepoken, bästa tillgängliga landhöjningsmodell och den fastslagna geoidmodellen som bär höjdsystemet. Alternativet är att låta punkter på marken definiera systemet passivt och sedan successivt uppdatera geoidmodellerna.

Ovanstående resonemang räcker för att förklara hur vi tänker oss att en aktiv definition skulle kunna appliceras för RH 2000. Frågan är nu om det är fördelaktigt att göra något sådant nu eller inom en snar framtid. Nedan följer en sammanfattning av argumenten för och emot. Därefter följer en utvärderande diskussion.

Argument för och emot att i dagsläget definiera RH 2000 med ett aktivt referensnät (höjd över ellipsoiden i SWEREF 99 och geoidmodell):

- + Det är en klar fördel att ingen ajourhållning av passiva punkter krävs i det aktiva fallet. Däremot måste det aktiva nätet av permanenta referensstationer förvaltas, men det måste göras i vilket fall som helst.
- + Med den aktiva definitionen fås vid mätning med GNSS inget extra fel på grund av brister i geoidmodellen. I det passiva fallet har vi medelfelet för höjden över havet:

$$\sigma_{H,GNSS} = \sqrt{\sigma_{h,GNSS}^2 + \sigma_{geoid}^2} \quad (\text{passiv def.}) \quad (2-2)$$

Med det aktiva systemet blir samma medelfel bara

$$\sigma_{H,GNSS} = \sigma_{h,GNSS} \quad (\text{aktiv def.}) \quad (2-3)$$

Att på detta sätt bli av med geoidfelet känns speciellt bra med tanke på att mätnoggrannheten för GNSS kommer att förbättras i framtiden. Det innebär att alla som använder GNSS mot permanenta referensstationer (SWEPOS) som *enda mätteknik* inte får något extra fel på grund av geoidmodellen.

Notera dock att den externa noggrannheten i förhållande till redan inmätta punkter (detaljer) i det passiva RH 2000 inte förbättras på något vis. Dessa inkluderar bland annat alla kommunala höjder som hunnit bestämmas i RH 2000.

Observera också att det lägre medelfelet för GNSS-mätning gäller höjden i det aktivt definierade höjdsystemet. Om geoidmodellen är felaktig innebär detta att de erhållna höjderna över havet kommer att avvika med geoidfelet från höjder som anger hur vatten rinner, etc. Observera att motsvarande problem också finns i det passiva fallet, men det är då istället fråga om fel i höjdsystemet. (Det bör påpekas att vi bedömer att problemet med hur vatten rinner är litet i praktiken både för geoidmodellen SWEN08_RH2000 och för höjdsystemet RH 2000.)

Ett stort problem med den aktiva definitionen är att geoidfelet istället måste adderas till avvägning relativt riksavvägnings- och andra fixar:

$$\sigma_{H,avv} = \sqrt{\sigma_{avv}^2 + \sigma_{geoid}^2} \quad (\text{aktiv def.}) \quad (2-4)$$

där σ_{avv} är medelfelet för avvägning relativt fix och $\sigma_{H,avv}$ är medelfelet i det aktiva höjdsystemet. Detta innebär att vi inte längre kan utnyttja avvägning relativt fixar för högsta noggrannhet. Vi använder då bara riksavvägningen som GNSS/avvägning (en gång för alla för att beräkna den definierande geoidmodellen) och som hjälpunkter med ett visst medelfel (=geoidmedelfelet). Så länge avvägning är den noggrannaste höjdbestämningsmetoden över korta avstånd (fortfarande fallet 2010), så känns detta inte optimalt. (Bakom detta resonemang ligger principen att vi bara kan ha ett nationellt höjdsystem i Sverige. Precis som förut är det emellertid fritt upp till var och en att göra som han vill, men då jobbar man inte i det nationella systemet.)

- Den aktiva definitionen medför att vi bygger in den aktuella geoidmodellen med fel och brister, vilket innebär att den inte kan förbättras med tiden. Med stor sannolikhet driver detta så småningom fram ett byte till ännu ett aktivt höjdsystem. Om GNSS-noggrannheten förbättras, och det samtidigt blir möjligt att beräkna bättre geoidmodeller, så kommer vi garanterat att vilja förbättra situationen. All erfarenhet från tidigare införande av geodetisk infrastruktur visar att det är så det går till. Det kommer att börja frågas varför vi nödvändigtvis ska använda en undermålig geoidmodell, nu när en bevisat bättre modell finns tillgänglig. Med en passiv definition håller vi dörren öppen för gradvisa förbättringar av geoidmodellen.
- Överensstämmelsen över landsgränser riskerar bli riktigt dålig om inte exakt samma geoidmodell används. Hur ska vi kunna ena oss internationellt om att bygga in en mer eller mindre bristfällig geoidmodell i referenssystemet? Sverige, Norge och Finland har ju nu passiva höjdsystem med god överensstämmelse över gränserna.
- Med ett passivt definierat RH 2000 har vi ett otroligt bra verktyg för att se till att få alla kommuner i ett gemensamt höjdsystem i Sverige. Inför vi en aktiv definition så implicerar det att GNSS relativt SWEPOS bör användas vid upprättningen. Det är ju så man ska mäta för att komma in i höjdsystemet. Detta är för närvarande inte optimalt. Vi tror att det bästa resultatet fås genom att utjämna om kommunens avvägningsobservationer i RH 2000. Det främjar också en ordentlig genomgång av de kommunala höjdsystemen, vilket nästan alltid behövs. Det är egentligen enda sättet att garantera noggrann GNSS-mätning i kommunen i framtiden. Dessutom, med det aktiva systemet är det mycket troligt att vi inom en inte alltför lång framtid måste byta igen. Detta kommer inte att öka bytesviljan hos de redan tveksamma kommunerna.

Det kan tyckas vara ett problem med den aktiva definitionen att landhöjningsproblemet kommer in på exakt samma sätt som vid mätning i SWEREF 99. Det

aktiva höjdsystemet definieras relativt ett glest nät av aktiva referensstationer och en landhöjningsmodell som inte modellerar lokala rörelser; se vidare avsnitt [2.2](#). Vi har således inte möjligheten att undvika de lokala rörelserna genom lokal anslutning. Å andra sidan har vi alltid problem med GNSS-mätning över längre avstånd i dessa områden och det kan lika gärna anses vara ett problem i det passiva fallet att systemet inte lika enkelt kan nydefinieras som vid en aktiv definition; jämför diskussionen i avsnitt [2.2](#). Som vi sa i detta avsnitt, så kan vi inte anpassa referenssystemsstrategin för hela landet på några få undantagsområden.

Ytterligare diskussion och utvärdering av argumenten

En följd av argumenten i listan ovan är att ett passivt definierat RH 2000 för närvarande främjar mätning med olika tekniker bättre än den aktiva motsvarigheten. Så länge höjdmedelfelen för GNSS-mätning är högre än för geoidmodellen, så erhålls bästa möjliga utnyttjande av både GNSS och konventionell teknik (avvägning). Hur är argumentet här? Jo, om vi definierar det nationella höjdsystemet passivt blir medelfelet vid avvägning mot näraliggande fixar lika med

$$\sigma_{H,avv} = \sigma_{avv} \quad (\text{passiv def.}) \quad (2-5)$$

Medelfelet vid GNSS-mätning ges i ekv. (2-2). Så länge medelfelet för GNSS är större än för geoidmodellen, så drunknar geoidfelet till viss del i GNSS-felen. Med en aktiv definition måste vi addera geoidfelet till avvägningen mot lokala fixar enligt ekv. (2-4). Då skulle vi bli tvingade att mer eller mindre *alltid* etablera nya höjdnät med GNSS. Så länge finavvägning är den noggrannaste tekniken (över korta avstånd) känns det fel att inte *kunna* utnyttja den. Med denna teknik kan vi idag bestämma höjdskillnader inom kortare avstånd relativt riksavvägningsfixarna med några få millimeters medelfel. Visst är omständligt, men det är ändå viktigt att kunna ta till för högsta noggrannhet. Dessutom är det en enkel och robust metod. Med en aktiv definition begränsar vi noggrannheten till vad som kan åstadkommas med GNSS mot de permanenta referensstationerna i SWEPOS-nätet alternativt till geoidfelet (om avvägning används).

Ett annat viktigt argument för det passiva alternativet är att vi inte bygger in en icke-perfekt geoidmodell. Även om vi naturligtvis skulle försöka beräkna en så optimal modell som möjligt innan det aktiva systemet läggs fast (utnyttja den fulla potentialen av GOCE, mm.), så är det viktigt att kunna förbättra geoidmodellen med tiden. Som vi argumenterade för ovan, så bör geoidmodellen för det aktiva systemet vara anpassad till RH 2000. I annat fall kommer de långvågiga höjdsystemsfelen inte att finnas med, vilket leder till större hopp vid introduktionen av det aktiva systemet. Lagg märke till att det aktiva alternativet idag faktiskt innebär att vi blir tvungna att bygga in de nuvarande GNSS-höjdmätningarna (SWEREF och möjligen RIX 95) i den aktiva definitionen. Vi utnyttjar dock inte GNSS/avvägningsobservationerna rakt av, utan bara den långvågiga trenden för avvikelserna mot den gravimetriska modellen. Att på detta sätt bygga in det gamla i definitionen kan tyckas synd när noggrannheten för GNSS förbättras i framtiden. Med en passiv definition kan vi mäta in ett tillräckligt antal fixar

med den noggrannare GNSS-mätningen, vilket ger oss ett utmärkt verktyg för att förbättra geoidmodellen. Eftersom den relativa noggrannheten för det passiva RH 2000 är tillräckligt hög över korta avstånd, så kommer på detta sätt mycket noggranna modeller att kunna tas fram (RH 2000 är mycket noggrant över korta avstånd, höjdsystemsfelen över längre avstånd kan vi modellera med GNSS/avvägning). Försäkringspunkterna borde vara utmärkta för detta ändamål. Det är därför viktigt att de avvägs.

Det kanske viktigaste skälet till att vi i dagsläget bör undvika att definiera om RH 2000 till ett aktivt system är att detta kommer att försvåra den pågående nationella övergången till RH 2000. Riksavvägningen planerades redan från början på ett sådant sätt att kommunerna skulle ha lätt att ansluta sina höjdsystem. Genom att räkna om de kommunala höjdnäten i RH 2000, så fås noggranna höjder för ett stort antal kommunala fixar, vilket är ett mycket bra sätt att åstadkomma ett gemensamt nationellt höjdsystem i Sverige. Vi tror att införandet av en aktiv definition skulle förvirra och försvåra denna process. Om riksavvägningsfixarna bara är att betrakta som hjälppunkter med ett visst medelfel, så finns det idag inget sätt att bestämma höjder bättre än höjdmätningarnas noggrannheten för GNSS (relativt de definierande referensstationerna), dvs. med ett medelfel runt 10 mm (statisk mätning). Dessutom, bara själva misstanken att Lantmäteriet ska introducera ett nytt aktivt system kommer att göra att många kommuner avvaktar. Betydelsen av att få över alla till ett gemensamt höjdsystem kan inte nog över-skattas.

Vi tycker att ovanstående argument klart och tydligt visar att det inte är läge att ändra definitionen av det nationella höjdsystemet nu eller inom den närmaste framtiden. RH 2000 bör fortsätta att vara ett traditionellt, passivt definierat höjdsystem åtminstone under den närmaste perioden. Tyvärr kräver detta ajourhållning, men av ovanstående skäl ser vi detta som en investering väl värd pengarna (se avsnitt 3.3), särskilt med tanke på att vi tidigare spenderat runt en kvarts miljard kronor på att mäta och beräkna RH 2000.

Det bör nämnas att USA och Kanada för närvarande arbetar på att införa GNSS/geoidbaserade höjdsystem; se till exempel hemsidan för *GRAV-D* när det gäller USAs planer (National Geodetic Survey 2010). Situationen är dock annorlunda i dessa länder: För det första, så är de existerande avvägda, höjdsystemen inte av hög kvalitet, i alla fall inte över längre avstånd. Att båda länderna är enormt stora gör vidare att det inte är realistiskt att satsa på nya avvägningbase-rade höjdsystem; det skulle bli orimligt dyrt. Därför är det logiskt för dem att välja denna väg. I Sverige har vi redan ett nytt höjdsystem av hög kvalitet, som är resultatet av en mycket ambitiös riksavvägning. Det är klart att vi ska utnyttja det.

Ett nationellt höjdsystem med aktivt referensnät i framtiden?

Att vi inte kan rekommendera införandet av ett aktivt system i dagsläget innebär inte att det aldrig kan bli aktuellt. Med dagsläget menas här att det skulle ske under perioden 2010–2020. Detta ställningstagande motiveras framförallt av de argument vi diskuterade ovan. Hur är det med argumenten i slutet av perioden

2010–2020 eller ännu senare? Hur man än ser på situationen så bör emellertid införandet av det aktiva systemet vänta tills

- Utvecklingskurvan för höjdmätning med GNSS relativt de definierade permanenta referensstationerna har hunnit plana ut.
- Geoidmodellen har hunnit förbättras så pass mycket så att den inte upplevs som en begränsning förutsatt den uppnådda, utplanade noggrannheten för höjdmätning med GNSS; se vidare Ågren (2010).
- Det stora flertalet av Sveriges kommuner har bytt till RH 2000.

Vi vet med säkerhet att noggrannheten för GNSS kommer att bli bättre. Det verkar rimligt att anta att vi år 2020 kan åstadkomma runt 5 mm höjdmedelfel med nätverks-RTK relativt de permanenta referensstationerna och att tillförlitligheten har förbättras. Det borde då också finnas statistiska metoder som kan ge ett medelfel nedåt 3 mm. Har vi väl nått så långt är GNSS jämförbar med finavvägning över korta avstånd och vi kan anse att utvecklingskurvan har planat ut.

Om vi prioriterar arbetet med att förbättra geoidmodellen, så är det troligt att vi kan nå en motsvarande noggrannhet (medelfel bättre än cirka 5 mm) någon gång under perioden 2020–2025. Eftersom en viktig typ av indata är GNSS/avvägning (förslagsvis på försäkringspunkterna), så uppstår en viss fördröjning jämfört med noggrannhetskurvan för GNSS. Observera att geoidmodellen förutsätts modellera dels själva geoidhöjden, dels de långvägiga felen i det passiva RH 2000. Dessa två komponenter måste separeras från varandra.

Det är troligt att majoriteten av Sveriges kommuner har hunnit byta till RH 2000 tills 2020.

Om ovanstående krav är uppfyllda, så känns det ganska säkert att introducera ett aktivt definierat RH 2000. Frågan är dock vad vi vinner på det i detta läge. Har väl geoidmodellens noggrannhet förbättrats så klarar vi oss utmärkt med det nuvarande, passiva RH 2000. Detta alternativ har dessutom fördelen att vi slipper att införa ett nytt system (även om vi kanske kan göra det i smyg), samtidigt som vi håller dörren öppen för framtida förbättringar av geoidmodellen. Priset för detta är ajourhållning.

Vi anser därför att vi inte *nu* bör ha som mål att införa ett aktivt definierat nationellt höjdsystem. Vad vi däremot bör arbeta för är att förbättra geoidmodellen och att få så många kommuner som möjligt att byta till RH 2000 (på ett bra sätt). Förutsatt att noggrannheten för GNSS förbättras, så spelar det sedan inte så stor roll om en aktiv eller en passiv definition utnyttjas. Vill vi slippa byta, så kan vi vara kvar i det passiva RH 2000.

Tittar vi längre fram (kanske 30–40 år) så kan läget dock bli sådant att det passivt definierade RH 2000 inte längre håller måttet och behöver ersättas. Detta kan bero på

- att kvaliteten inte längre är tillräcklig,

- att för många fixar har försvunnit på grund av otillräcklig ajourhållning och
- att de höjdsystem som används i vår omvärld förändras. Ett nytt höjdsystem kan till exempel ha introducerats av politiska skäl på den europeiska nivån, kanske anpassat till ett nytt världshöjdssystem (WHS). (Observera att vi under perioden 2010–2020 inte ser någon risk för att detta händer, även om ett officiellt definierat WHS introduceras. Det enda som kommer att ske då är att vi får transformationssamband till WHS.)

I detta läge (om 30–40 år) är det med stor säkerhet ett aktivt definierat höjdsystem som gäller. Allt vi gör för att förbättra geoidmodellen kommer vi då att kunna tillgodoräkna oss. Det verkar mycket osannolikt att en ny nationell precisionsavvägning någonsin kommer att utföras igen.

3 Förvaltning och ajourhållning i plan (3D) och höjd

Huvudsyftet med detta kapitel är att redovisa den förvaltning och ajourhållning som behövs av den geodetiska infrastrukturen i plan (3D) och höjd, förutsatt de valda definitionerna i kapitel 2.

Som vi diskuterade ovan så definieras SWEREF 99 med hjälp av ett aktivt referensnät bestående av de 21 fundamentalstationerna i det permanenta referensstationsnätet SWEPOS®. Det förutsätts att punktbestämning görs på ett sådant sätt att samma resultat erhålls som om den gjorts vid referensepokern 1999.5 (bortsett från lokala rörelser med en högre upplösning än cirka 100 km). Detta innebär bland annat att bästa tillgängliga landhöjningsmodell ska utnyttjas. Vid större förändringar av det aktiva referensnätet, har vi också möjlighet att kompensera med andra typer av korrektionsmodeller, men detta är något som bara bör användas i undantagsfall; se vidare i avsnitt [3.1](#).

I det aktiva nätet ingår förutom referensstationer med antenner och mottagare även driftscentral, programvara, kommunikations- och datadistributionskanaler m.m. Att ett aktivt nät används innebär inte att ajourhållningsuppgifterna försvinner utan de ändrar bara karaktär. Det är inte längre enbart de markerade punkterna som måste underhållas utan även övriga ingående komponenter. I avsnitt [3.1](#) behandlas ett antal aspekter av förvaltningen av det aktiva referensnät som realiserar SWEREF 99.

Som vi motiverade i avsnitt 2.3, så behöver vi även ett nationellt nät av *försäkringspunkter*. Dessa kan sägas vara ett *passivt* komplement till ett *aktivt* nät. Förvaltningen av försäkringspunkterna behandlas i avsnitt [3.2](#).

Det nya höjdsystemet RH 2000 realiserar helt och hållet med ett *passivt nät*, bestående av de höjdfixar som ingick i tredje precisionsvägningen (som överensstämmer med sina grannar). Det är alltså höjdfixarna – stabila markeringar, vanligen i fast berg – som bär upp höjdsystemet. Förvaltningen av det passiva referensnätet för RH 2000 kallas för ajourhållning, vilket innebär att de fysiska

punkterna först inspekteras och sedan eventuellt ersätts. Ajourhållning av RH 2000 tas upp i avsnitt [3.3](#).

I diskussionen i kapitel 2 framkom tydligt att landhöjnings- och geoidmodeller kommer att bli mycket viktiga i framtiden. En viktig del av förvaltningen av den geodetiska infrastrukturen är därför att kontinuerligt utveckla bättre modeller, vilket diskuteras vidare i avsnitt [3.4](#).

3.1 Om förvaltningen av det aktiva referensnätet för SWEREF 99

Som sagt, att ett aktivt nät används för att bära upp referenssystemet innebär inte att vi kan sluta med allt vad underhåll heter. Den förvaltning som behövs är dock annorlunda. Vad som behövs är åtgärder som gör att vi får tidsberoende koordinater (bortsett från mätfel och lokala geodynamiska rörelser). I detta avsnitt diskuterar vi förvaltning ur detta perspektiv för mät- och beräkningssystemet för SWEPOS.

Fysiska förändringar på fundamentalstationerna (och övriga klass A-stationer)

Fysiska förändringar på fundamentalstationerna innebär att det blir koordinatförändringar i de beräknade positionerna och därmed gäller inte längre de gamla koordinaterna. Detta är naturligtvis extra beklagligt om det gäller stationer som är bärare av ett referenssystem, varför man i högsta grad ska försöka undvika det. Exempel på förändringar som kan ha en inverkan på de beräknade positionerna:

- byte av antenn eller radom
- byte av mottagare (framförallt om det innebär att den mäter bättre på låga elevationer, jfr elevationsgränsens betydelse)
- röjning av sikthinder (jfr elevationsgränsens betydelse)
- annan förändring av miljön runt punkten

Byte av utrustning på de 21 definierande SWEPOS-stationerna (bärarna av SWEREF 99) bör vi därför vara extra försiktiga med att genomföra. Detta gäller i nästan lika hög grad även övriga klass A stationer som också används för tidsserier och därmed ligger till grund för de geodynamiska landhöjningsmodeller som behövs för att förvalta SWEREF 99; se avsnitt [3.4](#).

Det finns dock tillfällen där ett utrustningsbyte blir nödvändigt, t.ex. om mottagare eller antenn fungerar dåligt eller är helt ur funktion. Det är bättre att ersätta en dåligt fungerande utrustning än att hålla kvar vid den gamla för att inte införa förändringar. Vid byte av utrustning bör följande beaktas:

- Antennbyte ger större effekt än mottagarbyte. Mottagarbyten kan dock ge effekter, t.ex. om mottagaren trackat dåligt på låga elevationer.

- Försök om möjligt byta till en antenn av samma typ (går det överhuvudtaget att få tag på AOAD/M_T?).
- På EPN-stationer måste dessutom antenntypen (egentligen i kombination med använd radom) vara absolutkalibrerad.
- Viktigt att se till att radomen hamnar i samma läge som tidigare.
- Viktigt att förändringen dokumenteras samt att påverkan på koordinater följs upp.

Andra förändringar som kan påverka bör också dokumenteras och följas upp:

- Röjning av sikthinder
- Nya byggnader i närheten eller förändringar som t.ex. nytt tak
- Installation av fläkt för att smälta snö
- Det mikrovågsdämpande materialet Eccosorb

Alla förändringar vid referensstationerna måste dokumenteras för att kunna kopplas ihop med förändringar i koordinaterna.

Från förvaltningssynpunkt bör vi alltså vara på vår vakt mot alla onödiga förändringar vid referensstationerna. I de fall ett byte verkligen behövs kan det bli nödvändigt att införa en korrektionsmodell, till exempel uppdaterade antennmodeller, men också andra typer kan komma ifråga. Dubbla monument på fundamentalstationerna, med modern utrustning på den ena, ger möjlighet att bestämma och kontrollera dylika korrektionsmodeller. Det bör dock understrykas att det finns många problem med att modellera de effekter som utrustningsförändringar kan ge upphov till. Rekommendationen blir därför att så långt det bara går undvika förändringar, och när det inte går bör de göras så små som möjligt. Att tro att varje förändring enkelt kan modelleras med en korrektionsmodell är en mycket farlig väg, som äventyrar den aktiva definitionen av SWEREF 99.

Förändringar av beräkningsstrategi/byte av programvara

Använd beräkningsstrategi och modeller påverkar också i högsta grad de resulterande koordinaterna och även uppskattning av koordinatdifferenser vid fysiska förändringar (t.ex. byte av utrustning).

Bestämningen av s.k. SWEREF-punkter inom RIX95-projektet har räknats i samma programvara (Bern-programmet version 4.2), med samma beräkningsstrategi och parameterintervall som i SWEREF 99-kampanjen.

Efter RIX95-projektets avslutande har SWEREF-punktsberäkningen rationaliserats genom att använda SWEPOS nya beräkningstjänst som använder version 5.0 av Bern-programmet. Strategi och parameterintervall är i allt väsentligt sammanfallande med tidigare SWEREF-punktsberäkningar och SWEREF 99-kampanjen. Förändringar av beräkningsstrategi och parameterintervall testas noga innan eventuellt införande i rutinerna, för att se om de inför någon systematisk

förändring. Anledningen att undersöka vissa justeringar av parametervärderna är att få starkare lösningar.

På sikt kan man fundera på att använda även GLONASS, Galileo och andra satellitsystem vid bestämning av nya punkter i SWEREF 99. Den förbättrade satellitgeometrin (t.ex. mätningar i "hållet i norr") och nya frekvenser kommer sannolikt att ge starkare lösningar med kortare mättider (kanske inte aktuellt just för SWEREF-punkter, men för andra punkter) samtidigt som det förmodligen innebär systematiska koordinatförändringar (osäkerhet råder om hur stora dessa kan vara). För att kunna dra nytta av sådana förbättringar som fler satelliter och signaler skulle man kunna tänka sig någon form av korrektion för de systematiska effekter som uppstår i förhållande till SWEREF 99.

Eftersom effekterna av förändringar på stationerna blir olika med olika programvaror och beräkningsstrategier bör SWEPOS-nätet räknas i olika programvaror och med olika strategier så att kunskapen om effekterna i olika program/beräkningsstrategier ökas.

Klass B punkter (Nätverks-RTK-stationer)

Punkterna av typ klass B som utgör merparten av dagens SWEPOS-nät är i sig inte bärare av referenssystemet utan snarare en del av ett mätsystem. Det innebär dock inte att dessa punkter, representerade av antenner fästa i byggnader, kan lämnas utan tillsyn från referenssystemsynpunkt. De utgör en väsentlig del av den nationella geodetiska infrastrukturen.

På samma sätt som för klass A-stationer påverkas koordinaterna vid förändringar såväl på som i närheten av stationen. Vid byte av utrustning på klass B-stationer ska man naturligtvis vara medveten om att detta kan innebära koordinatförändringar och då behövs strategier för att kontrollera och hantera detta. SWEPOS dagliga monitorering är en viktig del i detta. Alla sådana förändringar ska självfallet också dokumenteras för klass B-stationerna.

Eftersom "fundamentet" för antennen på en B-station i normalfallet utgörs av en byggnad kan det inte uteslutas att den är utsatt för en rörelse. Antingen kan hela byggnaden röra sig eller också den byggnadsdel i vilken antennfästet är förankrat. Dessa rörelser ska kontrolleras genom att antennens läge dagligen bestäms relativt fundamentalpunkterna. Vid konstaterade signifikanta förändringar ska koordinaterna uppdateras.

Vi vill slutligen påpeka att det är eftersträvansvärt att fler nätverks-RTK-stationer markeras stabilt i berg.

3.2 Förvaltning av försäkringspunkter

Genom den valda definitionen av SWEREF 99 har behovet av markerade punkter i passiva nät betydligt reducerats. I stället för de 10 000 punkter som genom RIX 95-projektet erhållit koordinater i SWEREF 99 behöver endast cirka 300 passiva försäkringspunkter underhållas; se avsnitt [2.3](#) för en beskrivning av försäkringspunkterna.

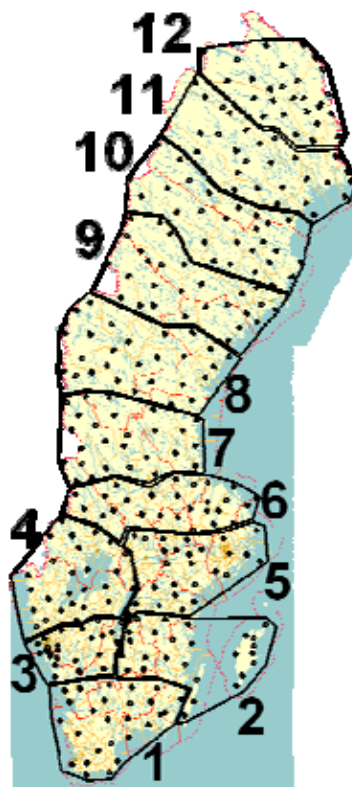
Som försäkringspunkter valdes de cirka 300 SWEREF-punkter som användes som fasta vid utjämnningen av RIX 95-nätet, vilket innebär att det finns en försäkringspunkt ungefär var 50:e km. Det finns tre anledningar till att SWEREF-punkterna valdes. För det första är dessa punkter från början valda på ett sådant sätt att de är väl markerade och lämpliga för GNSS-mätning. För det andra, så användes dessa punkter som fasta vid utjämnningen av RIX 95-nätet. Eftersom de därmed har en relation till all data som mätts in i SWEREF 99 utgående från de senare, så är det viktigt att veta om de är stabila och noggranna. För det tredje så har SWEREF-punkterna redan bestämts en gång under perioden 1995 – 2005, vilket innebär att den första epokens mätning redan är gjord.

Noggrannhetskraven för inmätningen och beräkningen av försäkringspunkterna är högsta tänkbara.

Dessa försäkringspunkter ajourhålls och mäts om vart 6:e år enligt ett löpande schema med tolv olika områden. Varje år mäts två områden, ett i södra och ett i norra Sverige (för att klara den korta säsongen i norr). Mätningarna upprepas sedan enligt ett löpande schema vart 6:e år med noggrannast tänkbara mätmetod mot det aktiva referensnätet (SWEPOS).

I en särskild PM (Andersson, 2009) specificeras vilken utrustning som ska användas och hur mätningen ska utföras. I korthet gäller följande:

- Tvåfrekvensmottagare som ger ett horisontellt medelfel på högst 5 mm + 1 ppm ska användas. Mottagaren ska ge full våglängd på L2 även vid A-S.
- Samma antenntyp som på SWEPOS-stationerna (Dorne-Margolin choke-ring) ska användas, men utan antennradom.
- Trefot utan inbyggt optiskt lod ska användas. Centreringsfelet får ej överstiga 1 mm.
- Mätningen ska utföras när det inte förekommer snöfall.
- Antennen ska orienteras så att dess referensriktning är orienterad mot norr. Antennhöjden ska mätas med överbestämning.
- Statisk bärvågsmätning med elevationsgränsen 5° ska tillämpas. Data ska registreras under 2 sessioner om vardera 24 timmar med loggningsintervall 30 sekunder Uppställningar ska utföras oberoende (olika antennhöjd) för de två sessionerna.
- Mätupställningarna ska fotograferas och mätprotokoll ska föras.



Figur 3.1: Försäkringspunkter indelade i ajourhållningsområden.

Eftersom vi efter en tids mätning kommer att få ett kvitto på vilka försäkringspunkter som är stabila, samtidigt som den bestämda GNSS höjden då är mycket noggrann, så är dessa punkter utmärkta som GNSS/avvägningsobservationer för beräkning av framtida geoidmodeller. Samtliga försäkringspunkter ska därför avvägas (jfr avsnitt [2.4](#)).

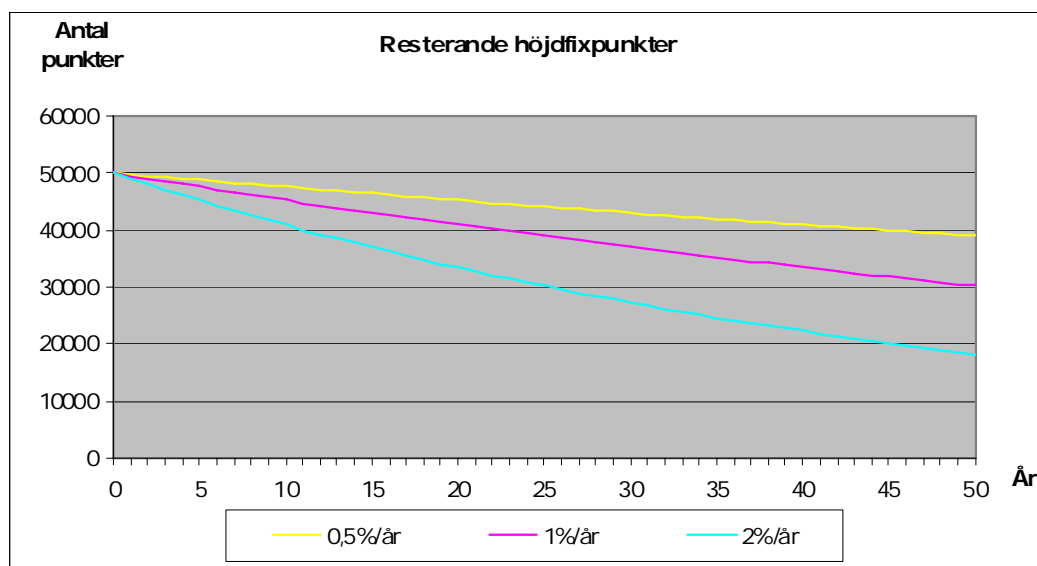
Ifall en försäkringspunkt försvinner ska den ersättas med en ny, likvärdig punkt som ligger så nära den gamla som möjligt. Även ersättningspunkterna ska avvägas.

3.3 Ajourhållning av riksnätet i höjd

Beträffande höjdsystemet RH 2000, som definieras av punkterna i den tredje precisionsavvägningen (se avsnitt [2.4](#)) kvarstår fortfarande behovet av ajourhållning.

Den senaste precisionsavvägningen omfattar cirka 50 000 punkter. Flertalet av dessa är belägna i anslutning till vägar eftersom huvuddelen av mätningarna utfördes som motoriserad avvägning. Detta medför att punkternas lägen blir mer utsatta, med ökad risk för rasing i samband med vägbyggnads- eller andra anläggningsprojekt.

De stora ekonomiska värden (cirka 250 Mkr) som investerats i nätet urholkas snabbt om inte de förstörda punkterna återupprättas; se figur 3.2. Ett kontinuerligt underhåll är i det långa loppet mer ekonomiskt än massiva insatser med långa mellanrum.



Figur 3.2: Resterande fixpunkter som en funktion av tiden beroende på hur snabbt punkterna försvinner.

Traditionell ajourhållning

Fram till och med 2009 användes vad vi kan kalla traditionell ajourhållning av RH 2000. Detta innebär att alla punkter behandlas lika och förutsätts ha samma vikt. Punkterna inventeras och förstörd punkt ersätts med ny som avvägs året därpå. En rimlig inventeringsnivå ligger här på cirka 2500 punkter/år, dvs. det tar 20 år innan hela nätet är inventerat. Beroende på områdets karaktär – landsbygd/tätort – försvinner 0–2 % av punkterna årligen. I extremfallet kan således cirka 1/3 av punkterna i det sista inventeringsområdet vara förstörda.

Föreslagen ajourhållning

Det kan ifrågasättas om denna typ av ajourhållning ger ett optimalt utnyttjande av de tillgängliga ekonomiska resurserna. Den förutsätter nämligen att alla fixar är lika mycket värda, vilket faktiskt inte är fallet; till exempel stabila bergfixar är mer värda än sämre markerade punkter. Vi har därför föreslagit en modifierad typ av ajourhållning, som förväntas minimera kostnaderna. Den vägledande principen är att punkterna ges olika vikt och endast de med hög vikt ersätts.

I likhet med den traditionella ajourhållningen inventeras samtliga punkter. Däremot ersätts bara punkt som

- ligger inom områden med ej anslutna lokala nät
- utgörs av bergfix¹, om den raserade bergfixen medför att avstånden mellan återstående bergfixar överstiger 15 fixhåll
- utgör enda kvarvarande bergfix inom två fixhåll från en knut
- utgör en knut, om det inte inom två fixhåll finns en bergfix
- ligger intill ersatt punkt i tåget
- dessutom gäller att om fler än 7 punkter i rad i en avvägningsslinga har försvunnit ersätts dessa punkter.

Denna modell för ajourhållning motiveras enligt följande: Punkter som ligger i områden med ej anslutna lokala nät ajourhålls för att möjligheten till anslutning ska kvarstå. Bergfixar är stabila och därför av väsentlig betydelse för definitionen av höjdsystemet. Med begränsningen att avståndet mellan kvarvarande bergfixar ska understiga 15 fixhåll säkerställs att arbetet med eventuell nyetablering av fixpunkter inte behöver bli alltför omfattande. Andra punkter av betydelse är knutpunkter varför även dessa bör ersättas. Dock kan istället näraliggande bergfix ersätta förstörd knutpunkt. Den näst sista punktsatsen faller sig naturligt av att systemet bärs upp av fixpunkter som överensstämmer med sina grannar. Dessutom kommer man ändå att avväga förbi försvunna grannpunkter när en punkt ersätts av annan anledning. Den sista punktsatsen säkerställer att det inte blir tomt längs en linje om till exempel en väg byggs om.

Inledningsvis, dvs. så länge det finns lokala nät som inte anslutits, kommer förhållandevis många fixpunkter att behöva ersättas, speciellt inom tätortsområ-

¹ Med bergfix likställs även s.k. jordmarkering

den. När merparten av de lokala näten anslutits kommer endast ett mindre antal (knutar/bergfixar) att ersättas. Denna reducerade ajourhållning tror vi kommer att innebära att RH 2000 upprätthålls på ett nästan lika bra sätt som vid traditionell ajourhållning, men till en betydligt lägre kostnad. Med denna metod borde det vara möjligt att inventera runt 2 500 punkter/år (se ovan).

3.4 Utveckling av geoid- och landhöjningsmodeller

Lantmäteriet ska tillhandahålla en över tiden hållbar nationell geodetisk infrastruktur, dvs. lägesbestämning i de aktuella referenssystemen ska med hänsyn till mätnoggrannheten vara entydig. Exempelvis ska läget för en punkt angivet i SWEREF 99 alltid motsvara läget sommaren 1999 (bortsett från lokala rörelser). Med ett glest referensnät erfordras därför korrektionsmodeller för att kunna korrigera för systematiska geodynamiska rörelser; se avsnitt [2.1](#). Vi har i definitionen av referenssystemet infört referensepoken och i samband med detta specificerat att "bästa tillgängliga korrektionsmodeller" ska utnyttjas.

Det innebär således att vi kontinuerligt måste studera och modellera de postglaciala rörelserna i plan och höjd (landhöjningen). Eftersom landhöjningskorrektionen blir större med tiden, så måste landhöjningsmodellerna förbättras i minst motsvarande grad.

För att möjliggöra höjdbestämning med GNSS måste en geoidmodell användas. Som vi förklarade i avsnitt [2.4](#) så är det av yttersta vikt att den nationella geoidmodellen som är knuten till RH 2000 förbättras. Det innebär att arbetet med att ta fram nya geoidmodeller också måste pågå mer eller mindre kontinuerligt.

I förvaltning av dessa modeller avses vidareutveckling genom såväl dattainsamling som analys av dessa data varefter nya (förbättrade) modeller kan konstrueras. En annan viktig parameter är att infrastrukturen för tyngdkraft förbättras, vilket är ämnet för nästa kapitel.

4 Den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft

Detta kapitel behandlar behovet av geodetisk infrastruktur och förvaltning när det gäller tyngdkraft i Sverige. Avsnitt 4.1 redovisar den nuvarande situationen inom området. I avsnitt 4.2 diskuteras sedan behoven för den kommande perioden 2010–2020 och ett förslag presenteras av vilka förbättringar som behövs för att möta dessa behov. Kapitlet avslutas med en diskussion av den ajourhållning som behövs av tyngdkraftsnäten.

Låt oss redan här nämna att vi i denna rapport inte diskuterar detaljmätning av tyngdkraft på nationell basis. Det nät med punkter där sådan detaljmätning gjorts av Lantmäteriet kallas för detaljnätet (andra ordningens nät), även om de inmätta punkterna inte är tänkta att användas som stompunkter och oftast inte är markerade. Eftersom huvudsyftet med Lantmäteriets detaljnät är att användas vid geoidbestämning, så tas det istället upp i en separat rapport om geoidbestäm-

ning som är under utarbetande (Ågren, 2011). I föreliggande rapport koncentrerar vi oss på tyngdkraftsnäten och tyngdkraftssystemen och diskuterar bara detaljnätet ur detta perspektiv, dvs. med avseende på de krav det ställer på högre ordningens infrastruktur.

4.1 Den nuvarande situationen

Sverige har inte kommit lika långt med infrastrukturen för tyngdkraft som i plan och höjd. En hel del arbete har emellertid gjorts, så situationen är inte direkt dålig. Mycket återstår dock att göra för att få en enhetlig, väl sammanhängande infrastruktur. I detta avsnitt beskriver vi de nuvarande näten och systemen.

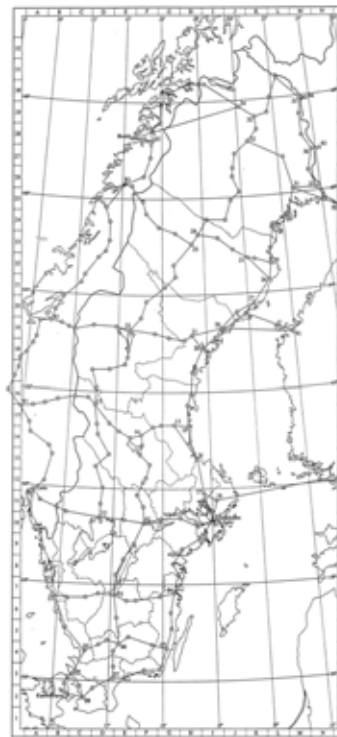
Genom åren har fyra olika nationella tyngdkraftssystem etablerats i Sverige, nämligen RG 1896, RG 41, RG 62 och RG 82. Det senaste systemet, RG 82, är det nuvarande nationella referenssystemet för tyngdkraft, men RG 62 används också fortfarande.

RG 62 och RG 82

RG 62 är det tyngdkraftssystem som realiserar av tyngdkraftsvärdena på det andra fundamentala tyngdkraftsnätet i Sverige. Detta nät bestod av 198 stationer, vilka mättes mellan 1960 och 1966 med en Worden-gravimeter (Pettersson, 1967); se figur 4.1. Systemet är anslutet till European Calibration System 1962 (ECS 62), vilket innebär att nollnivån ges av en absoluttyngdkraftsbestämning med inverterad pendel utförd i Potsdam runt år 1900 (Torge 1989). Det är ett välkänt faktum att detta absolutvärde är cirka 14 mGal för högt. Vissa av punkterna har avvägda höjder, medan andra har höjdbestämts på andra, mindre noggranna sätt; se Pettersson (1967). Medelfelet är i storleksordningen 0,05 mGal (= 50 μ Gal).

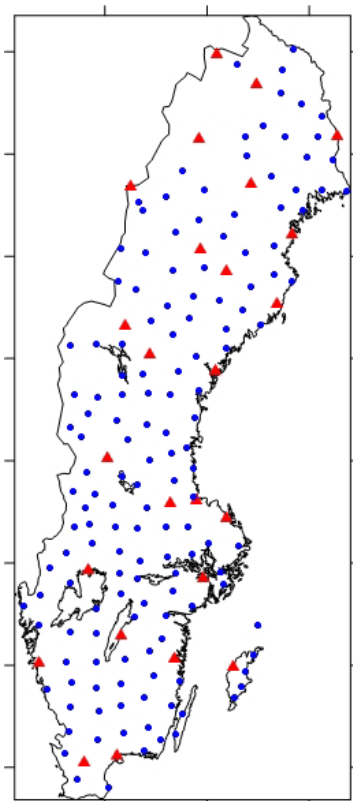
I slutet av 70-talet konstaterades att RG 62 inte uppfyllde de krav som kan ställas på ett fundamentalt tyngdkraftssystem. Noggrannheten var för låg, punkterna i första ordningens nät var inte markerade och mer än 30 procent av mätpunkterna var förstörda. Därmed startades arbetet med att etablera ett nytt tyngdkraftsnät i Sverige vilket resulterade i RG 82 (Haller och Ekman, 1988).

RG 82 är uppmätt åren 1981-1982 och vilar på fyra italienska absolutmätningar (med IMGC-instrumentet) gjorda i Mårtsbo, Södankylä, Göteborg och Köpenhamn. Det nät som bär systemet består i sin helhet av 25 stationer. Alla stationer utom två (Stensele och Björkliden) är avvägda och



Figur 4.1: Det andra fundamentala nätet för tyngdkraft i Sverige (Pettersson 1967).

de har minst en näraliggande reservpunkt (en används överallt utom i Stugun och Kramfors, där tre reservpunkter finns). Idag har några av punkterna försvunnit (huvud eller reserv), så att det bara finns en markering kvar på några stationer. Detta nät är det tredje fundamentala tyngdkraftsnätet i Sverige, som också kallas för Nollte ordningens nät. Vid beräkningen av RG 82 har hänsyn tagits till tidjord, poldrift och landhöjning. Systemet är definierat med ett nollsystem för den permanenta tidjorden och landhöjningsepoken 1982.0; se vidare Haller och Ekman (1988). Systemet sammanfaller ungefär med det globala tyngdkraftssystemet IGSN 71 (Torge, 1989). Noggrannheten ligger runt 0,01 mGal (=10 μ Gal).



Figur 4.2: Det tredje fundamentalnätet eller Nollte ordningens nät (röda trianglar) och Första ordningens nät (blå punkter) och Första ordningens nät (blå prickar).

andra fundamentalnätets noggrannhet. En viss extra osäkerhet kvarstår dock på grund av att en transformation måste utnyttjas.

Förtätningen av fundamentalnätet gjordes genom mätningar 1984-2002, vilket resulterade i Första ordningens nät. Det består totalt av 149 punkter; det finns antingen en Första- eller en Nollte ordningens punkt var 50:e kilometer där vägar finns; se illustration i figur 4.2.

Som nämndes i introduktionen till detta kapitel finns dessutom detaljnätet, även kallat Andra ordningens nät. Detta nät består idag av cirka 26 000 punkter med en täthet på cirka 5 km. Ungefär hälften av punkterna är markerade, resten inte. Ofta har punkterna avvägs (om de sammanfaller eller ligger nära fixar), men inte sällan har de höjdbestämts på annat vis, med sämre noggrannhet.

Ett problematiskt faktum är att större delen av detaljnätet (cirka 24 000 punkter) mätts in relativt det andra fundamentalnätet och således har tyngdkraftsvärden i det gamla systemet RG 62. Resterade punkter har bestämts relativt det nya Nollte och Första ordningens nät, vilket innebär att deras tyngdkraftsvärden är direkt bestämda i RG 82. För geoidbestämning används idag RG 82 (\approx IGSN 71). För de punkter som ursprungligen bestämts i RG 62 har ett empiriskt bestämt andragradspolynom använts. Denna transformation bygger på 33 passpunkter och har ett skattat medelfel runt 0,04 mGal (=40 μ Gal). Detta borde vara ett hyfsat mått på det

Det nordiska absolutgravimetriprojektet

De senaste åren har en stor satsning gjorts på absoluttyngdkraft i Sverige. Bland annat har en FG5 absolutgravimeter införskaffats, med vilken årligen återkommande mätningar görs på cirka 10-15 stationer med ett medelfel runt 0,002 mGal (= 2 μ Gal). Dessa ansträngningar görs som en del av det nordiska absoluttyngd-

kraftsprojektet, som koordineras av den Nordiska Kommissionen för Geodesi (NKG). I projektet deltar för närvarande Lantmäteriet, Statens Kartverk och Universitetet för Miljö- och Biovetenskap i Norge, det Geodetiska Institutet i Finland, Danmarks Tekniske Universitet (DTU Space) samt IfE och BKG från Tyskland. Huvudsyftet är att bestämma tyngdkraftsförändringar med hög noggrannhet, vilket kommer att ge viktig information för beräkning av förbättrade landhöjningsmodeller i framtiden. De stationer som dessa mätningar görs på presenteras i figur 4.3. De sven-



Figur 4.3: Stationer i det nordiska absolutgravimetriprojektet.

ska stationerna är vanligen samlokaliserade med SWEPOS-stationer och är markerade med stabila, bergfasta betongplattor inomhus (antingen i de små bodar som ligger vid SWEPOS-stationerna eller i näraliggande hus).

Även om huvudsyftet med absoluttyngdkraftsprojektet är att bestämma tyngdkraftens förändring, så är det naturligtvis så att tyngdkraftsvärdet blir ytterst välbestämt (för en viss epok). För tillfället finns enbart en preliminär koppling mellan det tyngdkraftsnät som realiserar RG 82 (eller RG 62) och de g-värden som bestäms vid de nya absolutstationerna.

Sammanfattning

Det nationella tyngdkraftssystemet i Sverige är idag RG 82, men RG 62 används fortfarande. Dessa system realiseras av det tredje respektive andra fundamentálnäten. Det tredje fundamentálnätet (Nollte ordningens nät) har även förtätats ned till ett Första ordningens nät, bestående av 149 punkter (de blå punkterna i figur 4.2). Den största delen av detaljnätet har bestämts i RG 62 och sedan transformerats till RG 82. Bara en mindre del har anslutits på ett tillfredställande sätt till RG 82. De nya absoluttyngdkraftsstationerna i det nordiska absolutgravimetriprojektet har än så länge ingen koppling till de nuvarande referenssystemen för tyngdkraft, trots att g -värdet och dess förändring där är bestämda med den i särklass högsta noggrannheten.

4.2 Behov och utveckling av de nationella tyngdkraftsnäten och systemen

Vilka behov finns för att utveckla tyngdkraftsnäten och systemen under den närmaste 10-årsperioden? För att avgöra detta behöver vi vara klara över varför

tyngdkraftsmätningar behövs på marken överhuvudtaget. Följande punktlista redovisar de viktigaste tillämpningarna (i den ordning de tas upp för diskussion nedan):

1. Beräkning av höjder över havet vid etablering av traditionella höjdsystem (passiva)
2. Landhöjningsbestämning
3. Geoidbestämning
4. Geofysiska ändamål, prospektering (SGU)
5. Globala geodetiska ändamål, t.ex. kalibrering av tyngdkraftssatellitssystem och bestämning av satellitbanor
6. Kalibrering av maskiner och system, t.ex. tryckgivare och tröghetssystem

Beräkning av höjder över havet har tidigare varit mycket betydelsefullt, men eftersom det är osannolikt att en ny precisionsavvägning någonsin kommer att utföras i Sverige, så anser vi att denna tillämpning inte längre bör prioriteras. Som vi diskuterade i avsnitt 2.4, så är det istället förbättrad geoidbestämning som är mest centralt.

För Lantmäteriets del är landhöjningsbestämning och geoidbestämning de viktigaste tillämpningarna; det är inte meningsfullt att debattera vilken som är viktigast, båda blir svaret. Det är också Lantmäteriets ansvar att utveckla och förvalta referensnäten och systemen för tyngdkraft. Vilka krav ställer tillämpningarna 2 och 3 på dessa? Låt oss börja diskussionen med att påpeka att *landhöjningsbestämning* med hjälp av tyngdkraft egentligen inte ställer några krav alls på referensnät och referenssystem. I detta fall bestäms tyngdkraftsförändringen med hög noggrannhet genom upprepade absolutbestämningar på ett antal utvalda stationer; se ovan. De hårdaste kraven ställs istället av *geoidbestämning*. För att uppnå en geoidmodell med ett *medelfel* nedåt 5 mm bör tyngdkraftsobservationerna (enligt Ågren, 2010)

- vara resultatet av detaljmätning med ett medelfel bättre än cirka 0,2 mGal (inklusive fel i referenssystemet). Också mindre noggranna data bidrar positivt, men för att resultera i en geoidmodell med så lågt medelfel som 5 mm krävs extremt noggranna data. I områden med till exempel bara flygmätt tyngdkraft, blir det nästan omöjligt att nå ett så lågt medelfel som 5 mm; jfr Ågren (2010).
- vara i ett väldefinierat och högkvalitativt tyngdkraftssystem, som inte är behäftat med några signifikanta systematiska fel. Små systematiska fel över lite större områden ger lätt upphov till stora signifikanta fel i geoidmodellen. Denna punkt är mycket relevant för diskussionen i denna rapport.
- ha ett punktavstånd på cirka 5 km yttäckande över hela landet; se Ågren (2010). I vissa områden med högfrekventa densitetsvariationer (bergstrakter, mm.) kan tätare observationer krävas.

- ha en noggrant bestämd höjd över havet med ett medelfel bättre än cirka 0,5 – 1 m under förutsättning att höjdfelen för olika observationer är okorrelerade; se vidare Ågren (2010). Ifall höjdfelen är korrelerat behövs betydligt högre noggrannhet. För att *garantera* att en 5 mm geoidmodell kan bestämmas i framtiden bör därför antingen avvägning eller RTK med geoidmodell användas. Det finns ett visst mått av cirkelrörelse här, men cirkeln är inte farlig (ett fel i geoidmodellen ger ett litet höjdfel som har en obetydlig inverkan på tyngdkraftsanomalin, etc.). Det är naturligtvis också möjligt att använda sig av en ännu noggrannare GNSS-teknik, t.ex. snabbstatisk mätning. En annan möjlighet är att ta höjden från Ny nationell höjdmodell, men detta kräver i så fall noggrann horisontell positionsbestämning alternativt att punkten ifråga tydligt kan identifieras i höjdmodellen själv. Om inte annat kan lämpligen Ny nationell höjdmodell användas för kontrolländamål.
- sträcka sig åtminstone 220 km utanför det område över vilket vi vill beräkna en noggrann geoidmodell. Eventuellt innefattas Östersjön och havet utanför västkusten i geoidmodellens målområde. Ju längre bort från målområdet, desto glesare kan observationerna vara.
- inte uppvisa några diskontinuiteter (hopp) vid gränserna till våra grannländer, framförallt mot Norge, Finland och Danmark. Noggranna kontrollmätningar behövs för att verifiera detta, lämpligen samordnade via NKG.
- göras på stabila underlag som berg, stora stenar, tjocka betonggolv och liknande. Alla punkter behöver inte markeras, men åtminstone en av detaljpunkterna ska vara ordentligt markerad för varje slinga mellan överordnade referenspunkter. Detta möjliggör senare kontroll och anslutning av slingan.

Denna lista innehåller tuffa krav, som långt ifrån är uppfyllda i den nuvarande situationen; se Ågren (2010) för motivering och djupare diskussion. För att möjliggöra bestämning av tyngdkraften med ett medelfel under 0,2 mGal med låg korrelation i rummet behöver tyngdkraftssystemet vara av yppersta kvalitet. Det bör poängteras att kraven inte per automatik genererar en geoidmodell med medelfelet 5 mm. För detta krävs också att teorin för geoidbestämning förfinas. Det är därför mycket viktigt att till exempel det arbete som utförs av prof. Lars E Sjöberg och hans grupp vid KTH fortsätter; jfr Sjöberg (1991) och Sjöberg (2003). Utöver detta kommer också andra data att behövas, som höjd- och djupmodeller samt eventuellt densitetsdata. Vi förutsätter att GOCE kommer att ge upphov till potentialmodeller av tillräcklig kvalitet och upplösning. Observera att även om vi prioriterar så att vi inte gör alla dessa förbättringar under 2010 – 2020, så är det viktigt att referensnäten och systemen utformas så att de möjliggör denna förbättring när det blir dags i framtiden. Som vid allt arbete med geodetisk infrastruktur måste ribban läggas högt och på ett sådant sätt att vi inte snart behöver höja den på nytt.

Vilka krav ställer de övriga tillämpningarna på den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft? För *geofysisk prospektering, etc.* (tillämpning 4), är det inte lika viktigt att det nationella tyngdkraftssystemet är av högsta kvalitet. Denna tillämp-

ning ställer å andra sidan högre krav på att punkterna i tyngdkraftsnätet är lätt tillgängliga. Dessutom finns ett behov av noggranna kalibreringslinjer. Tyngdkraftens variation i höjdlid (gradienten) bör även vara noggrant bestämd på de ingående stationerna i dessa kalibreringslinjer.

Vi går inte in i detalj på de två sista tillämpningarna (5 och 6). Det räcker med att säga att de inte ställer några krav som inte redan ställts i den föregående diskussionen.

Förslag till inrättande av nya tyngdkraftsnät och ett nytt tyngdkraftssystem, RG 2000

Av ovanstående diskussion drar vi slutsatsen att nuvarande tyngdkraftsnät och system inte riktigt håller måttet. För att kunna beräkna en riktigt noggrann geoidmodell i framtiden är det ett mycket viktigt krav att inte något systematiskt fel introduceras på grund av brister i tyngdkraftssystemet. Detta krav gäller även då långvågiga potentialmodeller från GOCE med efterföljare introduceras. Dessa modeller är på grund av tyngdkraftsfältets uttunning med höjden (the attenuation effect) begränsade till våglängder längre än cirka 100 km. Finare detaljer måste tas från tyngdkraftsdata. Ur en digital höjdm modell (DEM), kan också högre frekvenser beräknas, men det bygger alltid på antaganden om densiteten för de topografiska massorna.

För att höja noggrannheten i det nationella tyngdkraftssystemet, så föreslår vi att Lantmäteriet definierar ett nytt tyngdkraftssystem och för in en ny hierarki av tyngdkraftsnät, där den högsta ordningen består av de nya, nordiska absolut-tyngdkraftspunkterna. Detta är också ett bra sätt att städa upp ordentligt i den något röriga situation som nu råder.

Vi föreslår alltså introduktion av följande *tyngdkraftsnät*:

- Ett (fjärde) *fundamentalnät* baserat på de nya absolutpunkterna i Sverige som ingår i det nordiska absoluttyngdkraftsprojektet.
- *Anslutningsnät 0*: Lämpliga punkter i gamla Nollte ordningens nät samt en delmängd av de punkter som mäts in med A10 (se nedan). Punkterna ska vara väl markerade med reservpunkt. Avvägda höjder.
- *Anslutningsnät 1*: Gamla Första ordningens punkter samt punkter inmätta med A10 (utom Nollte ordningens punkter). Markerat utan reservpunkter. Avvägda höjder. I många sammanhang behöver vi inte skilja på anslutningsnät 0 och 1, utan talar då bara om *Anslutningsnätet för tyngdkraft*.
- *Detaljnet*: Nu bara markerade punkter med bra höjder (avvägda eller RTK med geoidmodell). Allt annat blir *detaljmätning*.

Vi föreslår också att vi introducerar ett nytt *referenssystem för tyngdkraft*, som kallas *RG 2000*. Detta system bör definieras med landhöjningsepoken 2000.0 för att vara konsistent med SWEREF 99 och RH 2000. Nollsystem bör användas för den permanenta tidjorden. Även i övrigt bör systemet definieras i enlighet med gällande internationella konventioner.

För att etablera denna nya infrastruktur behöver följande utföras:

1. Tyngdkraftsvärdena för det nya (fjärde) fundamentalnätet bestäms med absolutgravimetri. En landhöjningsmodell för tyngdkraftsförändringen tas också fram, vilken sedan används för att få tyngdkraften för referensepoken 2000.0. Landhöjningsmodellen bör bestämmas som en geofysisk GIA-modell, vilket kommer att förbättra resultatet framförallt för de punkter som inte har långa tidsserier (t.ex. Lycksele).
2. Anslutningsnätet (anslutningsnät 0 och 1) bestäms sedan relativt fundamentalnätet. Detta görs lämpligen så att allt utjämnas tillsammans med en rimlig viktning av observationerna. Även här behöver geofysiska landhöjningskorrektioner appliceras. För att förbättra strukturen bör korta (< cirka 50 km), tidigare omätta förbindelser mellan anslutningspunkterna, samt anslutningen till fundamentalstationerna, mätas in relativt på noggrant vis. Alla punkter i anslutningsnät 0 som tillåter detta bestäms också direkt med absolutgravimetern A10 (medelfel cirka 0,005–0,010 mGal = 5–10 μ Gal). Detta ger en bra kontroll samtidigt som nätet stagas upp på ett utmärkt sätt. Det förutsätts att A10- och relativobservationerna utjämnas tillsammans med lämplig viktning. En delmängd av punkterna i anslutningsnät 1 bör också mätas in med A10, säg cirka 20–30 stycken. Dessa bör väljas på ett sådant sätt att de bidrar så mycket som möjligt och stagar upp nätet på ett optimalt vis. Tyngdkraftsgradienten behöver även bestämmas med relativgravimeter för de punkter som mäts in med A10.
3. Ett omfattande arbete med att införa den nya infrastrukturen i praktiken blir att kontrollera och ansluta redan gjord detaljmätning. Om inte detta görs på ett bra vis, så kommer inte den eftersökta förbättringen att fås när det gäller geoidbestämning. Denna fråga diskuteras i detalj i Ågren (2011), men låt oss redan här kort indikera vad som behöver göras. För det första måste vi se till att ersätta alla observationer som inte håller tillräckligt hög noggrannhet och/eller som inte har tillräckligt bra höjder. Alla återstående tyngdkraftsobservationer bör anslutas som de är relativt det nya anslutningsnätet.

För de nya detaljpunkter som bestämts i RG 82 kommer detta (troligen) inte bli något problem, eftersom de anslutits relativt det gamla Nollte och Första ordningens nät, dvs. det nya anslutningsnätet. Det blir värre att få in de äldre observationerna (som nu transformerats från RG 62). Dessa har anslutits till det andra fundamentalnätet (Pettersson, 1967), som inte består av markerade punkter utan av kyrktrappor och liknande. En inte obetydlig del av dessa så kallade Petterssonpunkter är nu förstörda, dock okänt exakt hur många. Det lämpligaste sättet att få över de detaljpunkter som anslutits mot Petterssonpunkterna är att först mäta in alla kvarvarande Petterssonpunkter i RG 2000 relativt det nya anslutningsnätet. Försvunna punkter bestäms sedan genom att utnyttja de gamla observationerna. En lämpligen delmängd av Petterssonpunkterna bör också mätas in med A10, förslagsvis ca 10–20 stycken.

Tyvär finns idag ingen information i den digitala databasen om vilka Pettersonpunkter varje detaljpunkt har mätts in emot. Sådan information går dock att plocka fram för de punkter som är mätta av Lantmäteriet genom att gå igenom ett större antal gamla anteckningsböcker, där mätningarna beskrivs i detalj. Eftersom det är fråga om väldigt många punkter är detta ett mycket omfattande arbete. Ett snabbare, mer approximativt förfarande är att anta att man anslutit mot närmaste Pettersonpunkt, alternativt att man interpolerar in sig mellan närmaste Pettersonpunkter. Hela anslutningsförfarandet bör kontrolleras med listigt utförda kontrollmätningar.

4. Efter att allt som kan räddas av det gamla har tagits om hand, bör sedan nya detaljmätningar göras enligt kraven för geoidbestämning i listan ovan. Förutom kompletterande mätning som uppfyller dessa krav, så behövs mer data i Väner, Vättern och till havs (framförallt längs kusterna). Detta kommer mestadels att behöva utföras med flyggravimetri, vilket innebär att det blir nästan omöjligt att uppnå en så hög noggrannhet som 5 mm, men det behövs kanske inte heller just där (t.ex. mitt i Östersjön). Frågan hur mycket ny detaljmätning som behövs behandlas i detalj av Ågren (2011). Ett annat förslag här är att vi i högre utsträckning än idag försöker att samordna Lantmäteriets och SGUs detaljmätning av tyngdkraft.

Förutsatt att ovanstående förbättringar görs kommer Lantmäteriet att väl uppfylla de krav som kan ställas på den myndighet som är ansvarig för den nationella infrastrukturen för tyngdkraft.

Utöver införandet av det nya tyngdkraftssystemet och tyngdkraftsnäten samt komplettering av nödvändig detaljmätning, så rekommenderar vi att Lantmäteriet gör följande när det gäller tyngdkraft under perioden 2010–2020:

- Lantmäteriet bör satsa på att bli metrologiskt ansvarig myndighet, dvs. ansvarig för realiseringen av (den härledda) enheten för tyngdkraft i Sverige.
- Lantmäteriet behöver etablera åtminstone ett par praktiska kalibreringslinjer för tyngdkraft med välbestämd gradient för de ingående punkterna.

Fortsättning av det nordiska absoluttyngdkraftsprojektet

Det nordiska absoluttyngdkraftsprojektet föreslås fortsätta i samma fotspår som tidigare på de redan etablerade stationerna, vilka kommer att utgöra de nya, fjärde fundamentalnätet för tyngdkraft. Detta inkluderar även att vi fortsätter absolutobservationerna på ändpunkterna i den västra delen av den 63:e landhöjningslinjen, Kramfors och Vågstranda.

Det nordiska absoluttyngdkraftsprojektet och relaterat arbete med landhöjningsmodeller är mycket viktigt, men behandlas inte i detalj i denna rapport. Vi påpekar dock särskilt att följande utveckling behövs inom detta projekt:

- Nya stationer etableras i Örebro och Kungsholmsfort, vilket ger en bättre geografisk spridning i landet.

- Vi bör utveckla och underhålla superstationer för tyngdkraft, vid vilka tyngdkraftsfältets tidsvariationer specialstuderas (lokal hydrologi, grundvatteneffekter, mm.). Utöver Onsala, så bör Mårtsbo bli en sådan station. Det föreslås att en gPhone samt lämpliga hydrologiska sensorer installeras där. Detta behövs särskilt om Lantmäteriet blir metrologiskt ansvarig myndighet för tyngdkraft i Sverige.

4.3 Ajourhållning av den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft

I det förra avsnittet föreslås att ett nytt tyngdkraftssystem, RG 2000, och tre nya tyngdkraftsnät introduceras. För att den fysiska basen för det nya systemet inte ska försvinna, så bör den nya nätstrukturen ajourhållas på ett bra sätt. Vi förslår att tyngdkraftsnäten ses över enligt:

- Fundamentalnätet: Om en dylik absoluttyngdkraftsstation hotar att förstöras, så bör den direkt flyttas till en näraliggande plats. Samma krav gäller för etableringen av den nya stationen som för den gamla. Samordnas med SWEPOS.
- Anslutningsnät 0: Punkterna i det gamla (tredje) fundamentalnätet (Haller och Ekman, 1988) ajourhålls med en period om 20 år. Förlorade punkter ersätts genom mätning mot respektive reservpunkt, som också ajourhålls, eller med hjälp av A10.
- Anslutningsnät 1: Ajourhålls med en period om 20 år. Försvunnen punkt nyetableras på liknande sätt som den gamla, relativt anslutningsnät 0 eller med hjälp av A10.
- Detaljnätet: Ajourhålls inte. Nya punkter i detaljnätet (markerade + bra höjd) läggs ut efter behov. Det finns inte något krav på att de ska vara yttäckande. Om en detaljpunkt förstörs, är det i många fall lämpligare att etablera en ny detaljpunkt någon annanstans (där den just då behövs bättre).

5 Sammanfattning och rekommendationer

Referenssystemen och referensnäten bygger tillsammans upp den nationella geodetiska infrastrukturen, som i sin tur är förutsättningen för en hållbar lägesbestämning av all lägesbunden information.

Traditionellt definieras (realiseras) ett geodetiskt referenssystem av koordinater eller höjder på markerade punkter i ett passivt referensnät. I och med introduktionen av satellitmetoder (GNSS), vilka tillåter noggrann punktbestämning över mycket långa avstånd, blev det möjligt att realisera referenssystem med aktiva referensnät, bestående av ett litet antal permanenta referensstationer för GNSS, exempelvis SWEPOS. I detta fall är det inte enbart de fysiska punkterna som bär systemet, utan hela mät- och beräkningssystemet för det aktiva nätet. På så sätt kan ett nationellt referenssystem bäras upp av några få punkter, vilket gör det onödigt att ajourhålla ett passivt nät med tusentals punkter.

Huvudsyftet med denna rapport har varit att diskutera definitionen (realiseringen) av våra referenssystem i plan (3D) och höjd för att på så sätt komma fram till hur mycket förvaltning som krävs under den kommande tioårsperioden.

I **kapitel 2** diskuterades definitionerna av SWEREF 99 och RH 2000. Meningen är att noggrant redovisa argument för och emot olika tänkbara definitioner. Visserligen har Lantmäteriet redan bestämt hur SWEREF 99 och RH 2000 ska förstås, men vi tror ändå att det finns ett behov av att samla alla argument på ett och samma ställe. Vår ambition är att det ska vara helt klart för eftervärlden varför Lantmäteriet ser SWEREF 99 som ett aktivt definierat system (se [2.2](#)), vilket får till följd att ingen ajourhållning görs av RIX 95-nätet eller att ingen speciell status ges till dessa punkter. På samma sätt vill vi att det ska vara väl motiverat varför vi inte ser saker och ting på samma sätt i höjdded, och istället föredrar att definiera RH 2000 passivt med de enormt många punkterna i den tredje precisionsavvägningen (cirka 50 000 höjdfixar). Det är annars nästan omöjligt att ge en kortfattad sammanfattning av argumenten i kapitel 2; läsaren hänvisas istället till kapitlet ifråga. Låt oss här bara nämna att vi bland annat också motiverar införandet av så kallade försäkringspunkter till det aktiva referensnätet som bär upp SWEREF 99 (bestående av SWEPOS fundamentalstationer). En annan viktig slutsats är att det är mycket angeläget att satsa på att förbättra den nationella geoidmodellen allteftersom noggrannheten för höjdmätning med GNSS förbättras i framtiden. Vidare är det av högsta vikt att de pågående aktiviteter som syftar till att byta kommunala och andra lokala system mot de nationella SWEREF 99 och RH 2000 slutförs så snart som möjligt.

I **kapitel 3** behandlade vi den förvaltning som behövs av de nationella referenssystemen i plan (3D) och höjd under perioden 2010-2020. Våra rekommendationer sammanfattas nedan:

Förvaltning av SWEREF 99

Att SWEREF 99 bärs upp av ett aktivt nät av permanenta referensstationer innebär inte att ajourhållningsuppgifterna försvinner helt, men de ändras

karaktär. För att basen för SWEREF 99 inte ska försvinna, så bör vi vara *väldigt* konservativa när det gäller dels fysiska förändringar på referensstationerna (antennar, pelare, radomer, dämpande material, mm.). Vi bör även vara observanta när det gäller förändringar av beräkningsstrategier, programvaror och liknande. Visserligen finns det en möjlighet att modellera dessa typer av förändringar med en korrektionsmodell, vilken sedan alltid ska användas. Eftersom det i många fall är omöjligt att skapa en tillräckligt bra modell, så är detta något som bör undvikas så långt det går. Det ska bara göras i undantagsfall.

I avsnitt [3.2](#) motiverar vi valet av SWEREF-punkterna som försäkringspunkter för SWEREF 99. Förvaltningen av dessa cirka 300 punkter kräver kontinuerlig mätning, beräkning och analys. Varje punkt ska mätas in en gång var 6:e år enligt ett löpande schema. Mät- och beräkningstekniken väljs för högsta noggrannhet och uppdateras när så behövs. Om en punkt försvinner ska en ny lämplig punkt etableras i närheten enligt samma kriterier (stabil, lämplig för GNSS-mätning, mm.) Alla försäkringspunkter ska också avvägas för att kunna användas vid beräkningen av nästa generations geoidmodell.

Eftersom ett krav på definitionen av SWEREF 99 är att vi ska få samma koordinater vid punktbestämning oavsett tidpunkt (bortsett från lokala geodynamiska rörelser), så har vi specificerat i systemdefinitionen att *bästa tillgängliga landhöjningsmodell* ska användas. Förvaltningen av SWEREF 99 kräver således att vi kontinuerligt förbättrar de postglaciala landhöjningsmodellerna; se även RH 2000 nedan.

Ajourhållning av RH 2000

Eftersom RH 2000 definieras av ett passivt referensnät bestående av höjdfixarna från den tredje precisionsavvägningen, så krävs ajourhållning för att garantera att punkterna finns kvar. Fram till nu har alla 50 000 fixar ajourhållits med en takt som gör att det tar 20 år att klara av hela landet. För att få ett bättre utnyttjande av resurserna föreslås i avsnitt [3.3](#) att en ny ajourhållningsprincip antas, som innebär att alla punkter inspekteras, men bara de med en tillräckligt hög vikt ersätts; se avsnitt 3.3 för hur punkterna ska viktas.

Utöver de punkter som bär höjdsystemet, så behöver Lantmäteriet även kontinuerligt utveckla och förvalta nationella geoidmodeller och landhöjningsmodeller. Trots att dessa i dagsläget inte har någon definierande status, så utgör de mycket viktiga delar av den nationella geodetiska infrastrukturen, som måste uppdateras kontinuerligt allteftersom höjdnoggrannheten för GNSS förbättras och tiden går (landhöjningskorrektionerna blir större och större); se avsnitt [2.4](#).

Kapitel 4 behandlar den geodetiska infrastrukturen för tyngdkraft. Denna del av den geodetiska infrastrukturen har placerats i ett separat kapitel eftersom de överväganden som här gäller är av en lite annan karaktär än i plan (3D) och höjd. I det första avsnittet presenterades den nuvarande situationen när det gäller tyngdkraftsnät och tyngdkraftssystem i Sverige. Det framgår tydligt att läget är ganska osammanhängande och spretigt, bland annat så används för närvarande i

praktiken två tyngdkraftssystem. De nya, noggranna absoluttyngdkraftsstationerna ingår inte i den nuvarande nationella nätstrukturen på något sätt.

Vi diskuterade sedan behovet av tyngdkraftsobservationer i framtiden och vilka krav som ställs på referensnäten och referenssystemen. Vår slutsats är att de två viktigaste nationella tillämpningarna är geoid- och landhöjningsbestämning med absolutgravimeter. Av dessa så är det bara geoidbestämning som ställer krav på det nationella tyngdkraftssystemet; se vidare Ågren (2011) för hur noggrannheten för geoidmodellen ska kunna förbättras i framtiden. Dessutom, uppfyller de nationella tyngdkraftssystemet de krav som gäller för detta område (geoiden), så klaras också alla andra viktiga tillämpningar, t.ex. prospektering. Dock ställer denna senare typ av geofysiska tillämpningar högre krav på att tyngdkraftsnäten är tillgängliga samt på att högkvalitativa kalibreringslinjer finns uppmätta.

För att förbättra situationen på ett sådant sätt att förutsättningarna finns för att beräkna en mycket noggrann geoidmodell (medelfel runt 5 mm), så föreslås att ett nytt tyngdkraftssystem, *RG 2000*, tas fram och introduceras under den kommande tioårsperioden. Detta system bärs upp av ett nytt fundamentalnät, som består av alla absoluttyngdkraftsstationer i Sverige. I samband med detta införs en ny nätstruktur bestående av ett Anslutningsnät och ett Detaljnät. Gemensamt för alla punkter i dessa nät är att de är markerade och har välbestämda höjder. Övriga punkter i dagens detaljnät som inte är markerade, behandlas som detaljmätning.

Införandet av denna nya infrastruktur för tyngdkraft kommer att skapa förutsättningar för att en mycket noggrann geoidmodell ska kunna tas fram. För att en riktig förbättring ska kunna åstadkommas behöver sedan all nuvarande detaljmätning anslutas på ett bra sätt, samtidigt som ganska omfattande kompletteringsmätning kommer att behövas. Dessutom krävs förbättringar när det gäller teori och beräkningsalgoritmer för geoidbestämning, men detta är inte ämnet för denna rapport utan för Ågren (2011).

Referenser

- Andersson, B: 2009, *Ajourhållning av SWEREF-punkter*. (Intern PM)
- Andersson, B, Alfredsson, A och Nordqvist, A: 2011, *RIX 95-projektet – slutrapport*, LMV-rapport (under utarbetande)
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2009, *Report of Activities 2009*, Tillgänglig på <http://www.bkg.bund.de> (2010-12-13)
- Haller, L-Å och Ekman, M: 1988, *The Fundamental Gravity Network of Sweden*, LMV-rapport 1988:16, Gävle 1988
- Jivall, L: (2001) *SWEREF 99 – New ETRS89 Coordinates in Sweden*, LMV-rapport 2001:6, Gävle 2001
- Jivall, L: 2007, *Byte av utrustning och programvara vid aktiva stationer*, (Intern PM)
- Milne, G, Davis, JL, Mitrovica, JX, Scherneck, H-G, Johansson, JM, Vermeer, M, Koivula, H: 2001, *Space-Geodetic Constraints on Blacial Isostatic Adjustments in Fennoscandia*. Science 291, 2381-2385
- National Geodetic Survey, 2010, *GRAV-D*, Hemsida tillgänglig på <http://www.ngs.noaa.gov/GRAV-D> (2010-12-13)
- Petterson, L: 1967, *The Swedish First Order Gravity Network*, RAK meddelande A35, Stockholm 1967
- Sjöberg, L E: 1991, *Refined least squares modification of Stokes' formula*, Manuscr Geod 16, 367-375
- Sjöberg, L E: 2003, *A computational scheme to model the geoid by the modified Stokes' formula without gravity reductions*, J Geod 77, 423-432
- Ågren, J: 2009, *Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70*, LMV-rapport 2009:1, Gävle 2009
- Ågren, J: 2010, *On the need of improved gravity data to compute the next generation of quasigeoid models in Sweden*, Artikel presenterad på NKG General Assembly i Sundvolden, Norge
- Ågren, J: 2011, *Geoidbestämning i Sverige under perioden 2010 – 2020*. LMV-rapport (under utarbetande)
- Ågren, J och Svensson, R: 2007, *Postglacial Land Uplift Model and System Definition for the New Swedish Height System RH 2000*, LMV-rapport 2007:4, Gävle 2007

Rapporter i geodesi och geografiska informationssystem från Lantmäteriet

- 2007:10 Lidberg Martin & Lilje Mikael: Evaluation of monument stability in the SWEPOS GNSS network using terrestrial geodetic methods - up to 2003.
- 2007:11 Lilje Christina, Engfeldt Andreas, Jivall Lotti: Introduktion till GNSS.
- 2007:12 Ivarsson Jesper: Test and evaluation of SWEPOS Automated Processing Service.
- 2007:14 Lilje Mikael, Eriksson Per-Ola, Olsson Per-Anders, Svensson Runar, Ågren Jonas: RH 2000 och riksavvägningen.
- 2008:4 Johansson S Daniel & Persson Sören: Kommunikationsalternativ för nätverks-RTK - virtuell referensstation kontra nätverksmeddelande.
- 2009:1 Ågren Jonas: Beskrivning av de nationella geoidmodellerna SWEN08_RH2000 och SWEN08_RH70.
- 2009:2 Odolinski Robert & Sunna Johan: Detaljmätning med nätverks-RTK - en noggrannhetsundersökning.
- 2009:4 Fridén A & Persson A-K: Realtidsuppdaterad etablering av fri station - ett fälttest med radioutsänd projektanpassad nätverks-RTK.
- 2009:5 Bosrup, Susanna & Illerstedt, Jenny. Restfelshantering med Natural Neighbour och TRIAD vid byte av koordinatsystem i plan och höjd.
- 2010:1 Reit Bo-Gunnar: Om geodetiska transformationer (finns även på engelska med titeln *On geodetic transformations*).
- 2010:2 Odolinski Robert: Studie av noggrannhet och tidskorrelationer vid mätning med nätverks-RTK.
- 2010:3 Odolinski Robert: Checklista för nätverks-RTK.
- 2010:4 Eriksson Per-Ola (ed.): Höjdmätning med GNSS - vägledning för olika mätsituationer.
- 2010:5 Eriksson Per-Ola (ed.): Anslutning av lokala höjdnät till RH 2000 med GNSS-stommätning.
- 2010:6 Engfeldt Andreas & Odolinski Robert: Punktbestämning i RH 2000 - statisk GNSS-mätning mot SWEPOS.
- 2010:7 Lord Jonas: Test av GNSS-mottagare från DataGrid.

L A N T M Ä T E R I E T



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