

BILAGA 1

Bilaga till Rapporten Koordinatbestämda gränser, 2017-03-27, Dnr 508-2017/939

1 Tekniska förutsättningar; geodetiska referenssystem

Grunden för den geodetiska infrastrukturen utgörs av referenssystemen, inklusive definitioner, konventioner och regler för deras användning. I Sverige gäller SWEREF 99 och RH 2000. Referenssystemen realiserar i form av referensnät, som kan vara aktiva eller passiva.

SWEREF 99

I Sverige har vi valt att definiera SWEREF 99 med hjälp av de 21 fundamentalstationerna i SWEPOS-nätet. 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 utnyttjar.

RH 2000

I Sverige har vi valt att definiera RH 2000 utifrån ett *passivt* referensnät. Det är de 50 000 fixarna i den tredje precisionsavvägningen som bär upp systemet.

I den geodetiska infrastrukturen ingår förutom referensnäten, både aktiva och passiva, även system för tillhandahållande och support beträffande SWEPOS och det digitala geodetiska arkivet.

1.1 Referenssystems stabilitet

Ett geodetiskt *referenssystem* består av ett *koordinatsystem*, som har relaterats till jorden genom att koordinater har bestämts för ett *referensnät* av punkter. Dessa koordinater sägs *realisera* referenssystemet. Ett referenssystem är den fasta "referensram" mot vilken nya punkter kan bestämmas. Ett referenssystem etableras genom geodetiska observationer och eftersom alla observationer i någon mån är behäftade med osäkerhet, resulterar olika realiseringar 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 *passivt* referenssystem måste 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.

För definition av ett *aktivt* referenssystem 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.

- Systemets referensepok. Detta innebär att en tillräckligt bra korrektionsmodell ska användas för att vid behov räkna tillbaka inmätta koordinater till tidpunkten för referensepoken.

Ur ett systemförvaltningsperspektiv innebär det att *bästa tillgängliga* korrektionsmodell ska utnyttjas. Modellerna behöver alltså uppdateras kontinuerligt. Det förutsätts vidare att inga korrekationer görs för lokala geodynamiska rörelser med en upplösning mindre än cirka 100 km.

Nypunkterna kommer att få olika koordinater om jordskorpan rör sig. Man kan naturligtvis fråga sig om det verkligen är eftersträvansvärt att det aktivt definierade referenssystemet inte förändras med tiden. Med detta menas alltså att man ska få samma koordinater på alla passiva punkter (naturligtvis inom mätosäkerheten) 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 överens med tidigare inmätta punkter och data.

Det innebär såväl att korrektionsmodeller för geodynamiska rörelser ska användas som att det kompenseras för ändringar av mät- och beräkningssystemet för det aktiva referensnätet, framförallt när det gäller den elektriska miljön på referensstationerna (antennar, pelare, radomer, etc.).

1.1.1 Geodynamiska effekter

Om diskussionen begränsas till Sverige, så är den *postglaciala landhöjningen* den absolut viktigaste geodynamiska rörelsen.

Trots att landhöjningen är det i särklass viktigaste geodynamiska fenomenet i Sverige, så förekommer 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. 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.

1.1.2 Referensstationernas miljö

Förändringar av miljön på och omkring referensstationerna på samma sätt som förändringar i beräkningssystemet kan medföra att en punkts koordinater kan förändras över tid. Exempel på åtgärder som kan ge förändrade koordinater är

- fysiska förändringar på fundamentalstationerna
- förändring av beräkningsstrategi
- byte av programvara

Alla förändringar vid referensstationerna dokumenteras för att kunna kopplas ihop med förändringar i koordinaterna. Onödiga förändringar vid referensstationerna undviks i största möjliga utsträckning.

Lantmäteriet införde år 2007 så kallade försäkringspunkter för att möta behovet av att kontrollera referenssystemets stabilitet. Ytterligare ett syfte med dessa är att användas för kontroll av landhöjningsmodeller och ge kompletterande information om eventuella rörelser mellan referensstationerna.

Korrektionsmodeller

För att minimera inverkan av vissa systematiska effekter används olika korrektionsmodeller.

Landhöjningens inverkan tas idag om hand av en landhöjningsmodell där såväl de vertikala som horisontella rörelserna modellerats. Däremot modelleras inte andra typer av lokala geologiska företeelser som förkastningar, jordskred etc., vilka dock påtagligt kan förändra koordinaterna för en viss punkt.

I de fall ett byte av utrustning verkligen behövs kan det bli nödvändigt att införa en korrektionsmodell, till exempel uppdaterade antenmodeller, men också andra typer kan komma ifråga.

Att tro att varje förändring enkelt kan modelleras med en korrektionsmodell är en mycket farlig väg, som äventyrar den aktiva definitionen av SWEREF 99.

1.2 Koordinater och koordinatsystem

Enligt ISO 19111 definieras koordinat och koordinatsystem enligt följande

co-ordinate

one of a **sequence** of n numbers designating the position of a point in n -dimensional space

co-ordinate system

set of mathematical rules for specifying how **co-ordinates** are to be assigned to points

Koordinater i ett koordinatsystem används för att i en n -dimensionell modell av verkligheten ange en punkts läge. I vårt fall kan n anta värdena 1-, 2- eller 3. Vi kan använda dessa koordinater för att beräkna relationer mellan godtyckliga punkter, t.ex. avstånd, och arealer för figurer vars begränsningslinjer/kurvor går mellan dessa punkter. Så länge man opererar i modellen kan koordinaterna anses vara exakta eftersom det endast handlar om matematik.

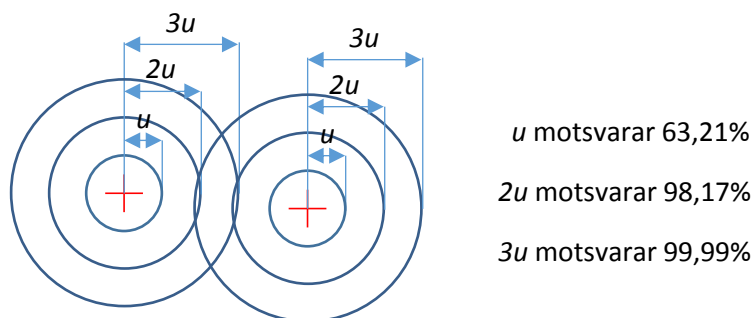
2 Användning av koordinater

Idag resulterar praktiskt taget all mätning i koordinater för inmätta punkter. I huvudsak används två mätmetoder, mätning av längder och vinklar med totalstation och GNSS-teknik (nätverks-RTK).

2.1 Representation av koordinater

Varje mätning innehåller osäkerheter vilket medför att resultaten, koordinaterna, också blir osäkra. En enskild bestämning är enbart en skattning av det ouppnåeliga sanna värdet.

Om vi med hjälp av mätningar bestämmer en punkts koordinater innebär det att med viss sannolikhet ligger den "sanna" punkten inom en cirkel vars radie är en funktion av den skattade osäkerheten. En förnyad bestämning ger upphov till ett annat läge med sin "osäkerhetscirkel". Överlappar cirklarna varandra kan med viss sannolikhet antas att de olika bestämningarna avser "samma" punkt trots att koordinaterna är olika, jfr figur 1.



Figur 1: Punktösäkerhet

Vilken av bestämningarna som är "mest" rätt går inte att avgöra, däremot kan osäkerheten i bestämningen reduceras genom upprepade bestämningar och medeltalsbildning.

I förlängningen betyder det att vid översättning av den matematiska modellen till verkligheten ersätts punkter av cirkelytor och räta linjer av rektangelytor inom vilka de "sanna" storheterna sannolikt ligger.

Vi kan således inte entydigt utvisa en gränspunkts läge i terrängen, osäkerheten är betydligt större än diametern hos dagens gränsrör.

Om vi utgår från ett gränsrör med diametern 25 mm skulle punktbestämningen behöva ha en standardosäkerhet på högst 4,2 mm för att osäkerheten i koordinaterna för punktens läge skulle motsvara gränsrörets diameter.

2.2 Olika realiseringar ger olika koordinater

I Sverige har vi valt att definiera vårt referenssystem, SWEREF 99, genom de 20 s.k. fundamentalpunkterna. Som en konsekvens därav har vi också ett aktivt referensnät, dvs. vi har inga markerade punkter, förutom de 20 fundamentalpunkterna som bär upp, realiserar, SWEREF 99. Alla markerade punkter, SWEREF-punkter, RIX 95-punkter, kommunala stompunkter etc., har därför en osäkerhet knuten till koordinaterna i SWEREF 99.

3 Rörelser jordskorpan

Jordskorpan är inte statisk den förändras kontinuerligt i större eller mindre grad.

3.1 Landhöjning och landtöjning

För landhöjning och landtöjning tar vi fram bättre och bättre modeller baserad på data insamlad under längre och längre tid. Det medför att koordinaterna för en godtycklig punkt kan förändras över tiden på grund av att den underliggande rörelsen är bättre modellerad.

3.2 Kontinentalplattornas rörelser

Det internationella referenssystemet ITRS realiseras återkommande genom successiva ITRF baserade på en ökande mängd observationer. På grund av kontinentalplattornas rörelser genereras nya koordinater för punkter ingående i ITRF-nätet.

Alla satellitnavigationssystem (GNSS) har sina respektive referenssystem knutna till ITRS, ofta den senaste ITRF-lösningen. SWEREF är en realisering av det europeiska systemet ETRS 89, som i sin tur är knutet till ITRF. En lägesbestämning med hjälp av ett eller flera satellitnavigationssystem men utan anknytning till det nationella referensstationsnätet ger primärt inte koordinater i SWEREF 99 utan måste kompletteras med en transformation. Denna transformation korrigerar i huvudsak för de kontinentalrörelser som skett sedan 1989.

Den europeiska plattan, med ETRS 89 och SWEREF 99 rör sig i nordostlig riktning med drygt 2 cm/år, vilket ger att skillnaden idag uppgår till nästan 0,5 m.

Man kan inte säkert anta att kommersiella programvaror/tjänster utför denna transformation med transformationsalgoritmer/parametervärden som ger överensstämmelse med SWEREF 99, dvs. vår realisering av ETRS 89.

3.3 Lokala rörelser

Lyckligtvis har vi i Sverige historiskt varit förskonade från förkastningar, däremot har vi haft flera jordskred och ras där marken och därpå uppförda byggnader flyttats flera tiotals meter.

Den vanligast förekommande markrörelsen är sättningar till följd av grundvattensänkning.

Genom att det aktiva referensätet inte är beroende av markeringar förblir den geodetiska infrastrukturen intakt beträffande planläget. För höjdläget får man, åtminstone i akutläget, använda GNSS-teknik i kombination med geoidmodellen.
