



skb.se

SKB P-22-02

ISSN 1651-4416

ID 1985143

Oktober 2023

Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2021

Christina Kempe, Lotti Jivall, Rickard Jäderberg
Lantmäteriet

Nyckelord: Permanenta GNSS-stationer, GNSS-beräkning, Tidsserier, Off-grid-stationer, Övervakning av markrörelser.

Denna rapport har gjorts på uppdrag av Svensk Kärnbränslehantering AB (SKB). Slutsatser och framförda åsikter i rapporten är författarnas egna. SKB kan dra andra slutsatser, baserade på flera litteraturkällor och/eller expertsynpunkter.

Data i SKB:s databas kan ändras av olika skäl. Mindre ändringar i SKB:s databas kommer inte nödvändigtvis att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan även presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se.

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2023 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

För att fortlöpande studera eventuella markrörelser i och omkring Forsmarks kärnkraftverksområde har fem permanenta GNSS-stationer etablerats. Från stationerna skickas kontinuerliga observationsdata till Lantmäteriet som beräknar dagliga koordinater för stationerna.

Tidigare års beräkningar har främst varit inriktade på att studera olika alternativ för hantering av jonosfärs- och troposfärsfördröjning. Valet av beräkningsstrategi och modeller har bl.a. grundats på daglig repeterbarhet (precision) för de olika alternativen, liksom jämförelser av L1- och L3-lösningar. Studierna ledde till slutsatsen att L1-lösningen från beräkningsalternativet med regional jonosfärsmodell och skattning av troposfärsparametrar var mest lämplig. Vid årets beräkning har samma typ av GNSS-lösning använts för att beräkna dagliga koordinater för de permanenta GNSS-stationerna i Forsmark.

I sammanhanget är det viktigt att nämna att jonosfärsaktiviteten varit relativt låg under observationsperioden, varför det inte är möjligt att dra några säkra slutsatser om detta alternativ fortfarande kommer att vara det bäst lämpade när jonosfärsaktiviteten ökar inom några år.

De resulterande koordinattidsserierna för SKB-stationerna har tidigare endast studerats visuellt, främst för att se om det förekommer problem på stationerna. Små årstidsvariationer kan ses, liksom enstaka förekomster av snö på GNSS-antennerna. Med drygt tre års GNSS-observationer har nu de första hastigheterna för SKB-stationerna kunnat skattas. Det bör dock poängteras att dataserien ännu är relativt kort – tre år brukar betraktas som en undre gräns för att skatta hastigheter med rimlig säkerhet. De skattade hastigheterna måste därför betraktas som högst preliminära.

Stationshastigheter har skattats relativt stationen Kobben, som har hållits fast vid beräkningen. Det innebär att det inte går att redovisa någon hastighet för Kobben, och att skattningarna för de övriga stationerna avser respektive stations hastighet *relativt* Kobben. Eftersom flera av stationerna uppvisar tydliga årstidsvariationer så är det rimligt att – förutom linjära hastigheter – även skatta årstidsvariationer.

För hastighetsskattningen har programvaran TSview använts, där osäkerhetsskattningen baseras på den s.k. RealSigma-metoden som dock ofta visat sig vara för optimistisk.

De största uppmätta horisontella hastigheterna relativt Kobben är 0.18 mm/år för Storskäret respektive 0.17 mm/år för Norra Biotesten. Osäkerheterna för dessa hastigheter har skattats till 0.09 mm/år med täckningsfaktorn 2. De skattade osäkerheterna misstänks dock vara för låga, varför det inte är säkert att dessa hastigheter verkligen är signifikanta. Den största uppmätta vertikala hastigheten relativt Kobben är 0.80 ± 0.22 mm/år för Storskäret (med täckningsfaktorn 2). Vidare har stationerna Lillkobben, Norra Biotesten och Västra Måsklinten årstidsvariationer i N-komponenten med en amplitud på ca 1 mm i förhållande till Kobben. Det förekommer även årstidsvariationer med amplituder upp till en halv mm i både E och U för några stationer.

Summary

Five permanent GNSS stations have been established around Forsmark nuclear power plant area for continuous monitoring of possible ground movements. GNSS observation data from the stations are continuously sent to Lantmäteriet, the Swedish Mapping, Cadastral and Land Registration Authority, which computes daily coordinates of the stations.

The yearly processing has until now been aimed at studying different options for handling of ionospheric and tropospheric effects. The selection of processing strategy was mainly based on daily repeatability (precision) of the different strategies, as well as on comparisons of the L1 and L3 solutions. The studies led to the conclusion that the L1 solution from the processing alternative that utilizes a regional ionospheric model in combination with estimation of troposphere parameters is the most suitable one. The same processing strategy was used this year, to produce daily coordinates the permanent GNSS stations in Forsmark.

In this context it is important to mention that the ionospheric activity has been relatively low during the observation period. Therefore, it is not possible to tell whether this alternative will be the most suitable when the ionospheric activity will increase within a few years.

Until now, the resulting coordinate time series for the SKB stations have only been examined visually, mainly to find out if there were any problems at the stations. Small annual variations can be seen, as well as occasional occurrences of accumulated snow covering the GNSS antennas. With just more than three years of GNSS observations the first velocities of the SKB stations have now been estimated. It should however be stressed that the data series still is relatively short – three years is considered a minimum time span for estimating velocities with reasonable certainty – and with such a short observation period the seasonal variations will influence the estimated trend, especially considering that the seasonal variation not surely is identical over the years. The estimated velocities must therefore be regarded as highly preliminary.

The TSview software was used for velocity estimation. The uncertainty estimation is based on the so-called RealSigma method, which however has shown to be too optimistic in many cases.

Station velocities have been estimated relative to the Kobben station that was kept fixed throughout the GNSS processing. This implicates that it will not be possible to estimate any velocity for Kobben, and that the velocities for the other stations are their respective velocities *relative to* Kobben. Since some of the stations clearly show seasonal variations it is reasonable to – except from linear velocities – estimate also annual signals.

The largest estimated horizontal velocities, relative to Kobben, are 0.18 mm/yr for Storskäret and 0.17 mm/yr for Norra Biotesten, respectively. The velocity uncertainties have been estimated to 0.09 mm/yr with coverage factor 2. However, since the estimated uncertainties are believed to be too optimistic, these velocities might not be significant. The largest estimated vertical velocity relative to Kobben is 0.80 ± 0.22 mm/yr for Storskäret (with coverage factor 2). Furthermore, there are annual signals present in the N component for the stations Lillkobben, Norra Biotesten and Västra Måsklinten, with an amplitude of approximately 1 mm relative to Kobben. There are also annual variations with amplitudes up to half a mm in both E and U components for a some of the stations.

Innehåll

1	Använda förkortningar och begrepp.....	4
2	Introduktion.....	6
3	GNSS-stationerna i Forsmark.....	8
3.1	Utrustning och service.....	8
3.2	Dataflöde och tillhandahållande av GNSS-data	8
4	Kontinuerliga GNSS-observationer i Forsmark.....	9
4.1	Tillgängliga GNSS-data	9
4.2	Val av observationer.....	9
5	Beräkning av GNSS-data.....	10
5.1	Programvara och beräkningsstrategier	10
5.2	Hantering av jonosfär och troposfär.....	12
5.3	Referenssystemsanslutning	12
6	Resultat – koordinatberäkning	14
6.1	Allmänt om beräkningens kvalitet.....	14
6.2	L1- eller L3-lösning	16
6.3	Koordinattidsserier	16
6.3.1	Anslutning till SWEREF 99 på KOBB.0	16
6.3.2	Anslutning till SWEREF 99 på alla stationer.....	19
6.3.3	Tidsserie för KOBB.0.....	22
6.4	Analys av koordinattidsserierna	23
7	Skattning av hastigheter för SKB-stationerna.....	26
7.1	Editering av indata	26
7.2	Olika alternativ för hastighetsskattning.....	27
7.2.1	Skattning av linjära hastigheter	27
7.2.2	Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för årlig variation.....	30
7.2.3	Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för års- och halvårsvariation.....	32
7.2.4	Kontroll av manuell indataeditering	35
7.3	Skattning av årstidsvariationer	35
7.3.1	Kontroll av manuell indataeditering	37
7.4	Analys av skattade hastigheter och årstidsvariationer.....	37
7.4.1	Hastigheter	37
7.4.2	Årstidsvariationer	38
7.4.3	Sammanfattning.....	38
8	Fortsatta studier	39
8.1	SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv	39
	Referenser	40
	Bilaga 1	42
	Översikt utrustning på GNSS-stationer	42
	Bilaga 2	43
	Urklipp ur aktivitetsdagbok.....	43
	Bilaga 3	44
	Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen.....	44
	Bilaga 4	46
	Beskrivning av leveransen.....	46

1 Använda förkortningar och begrepp

Tabell 1-1 . Förklaring av förkortningar och begrepp som förekommer i dokumentet.

Begrepp	Förklaring
Antennmodell	Modell som beskriver GNSS-antennens elektriska egenskaper; består vanligtvis av en konstant del (relativt en referenspunkt på antennen) och en elevations- och azimutberoende del, för varje GNSS-signal
Baslinje	Rymdvektor mellan två GNSS-mottagare (stationer)
Chi ²	Kvadratsumman av differenserna mellan observationerna och det förväntade värdet, där varje term delas med det förväntade värdet innan summeringen. Sannolikhetsfördelningen för denna kvadratsumma är χ^2 -fördelningen.
CODE	Center for Orbit Determination in Europe
Datascreening	Genomsökning av data för att finna felaktigheter samt åtgärd eller borttagning av felaktiga data.
Dubbeldifferens	Differens mellan två enkeldifferenser relaterade till två olika satelliter
Dynamiskt referenssystem	Referenssystem där koordinaterna för varje punkt varierar med tiden. Positionerna beskrivs med en uppsättning koordinater för en viss epok och deras hastigheter.
Elevationsmask	Vertikalvinkel (vinkel över horisonten) som utgör undre gräns för de GNSS-observationer som ska ingå i beräkningen
Enkeldifferens	Differens mellan samtidiga bärvågsmätningar mot en satellit, gjorda av två olika GNSS-mottagare (stationer)
Frihetsgrader	Frihetsgrader är ett mått på hur många observationer som finns tillgängliga för skattning av varianser; antalet observationer minus antalet skattade parametrar
FTP	File Transfer Protocol; filöverföringsprotokoll
Galileo	Europeiskt satellitnavigeringssystem
Glonass	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema; ryskt satellitnavigeringssystem
GMF	Global Mapping Function
GNSS	Global Navigation Satellite Systems; ett samlingsbegrepp för satellitnavigeringssystem
GPS	Global Positioning System; amerikanskt satellitnavigeringssystem
Helmert-transformation	Likformighetstransformation, här i tre dimensioner; används för transformation mellan två tredimensionella koordinatsystem. Transformationen beskrivs med tre translationer, tre rotationer och en skalförändring (eller ett urval av dessa).
IERS	International Earth Rotation Service
IGb14	Uppdaterad version av IGS14
IGS	International GNSS Service
IGS14	IGS-realiserings av ITRF2014 som är anpassad till aktuella modeller i IGS:s GNSS-beräkningar
IGS20	IGS-realiserings av ITRF2020 som är anpassad till aktuella modeller i IGS:s GNSS-beräkningar
ITRF	International Terrestrial Reference Frame; internationellt dynamiskt referenssystem
L1	En av GPS-systemets bärvågor; L1 har frekvensen 1575.42 MHz
L2	En av GPS-systemets bärvågor; L2 har frekvensen 1227.60 MHz

Begrepp	Förklaring
L3	Jonosfärsfri linjärkombination, $L3 = 2.546 \cdot L1 - 1.546 \cdot L2$; används för att eliminera jonosfärens effekt på GNSS-signalerna
L5	En av GPS-systemets bärvågor; L5 har frekvensen 1176.45 MHz
LTO	Linear Tape-Open; teknologi för lagring av data på magnetband
Multistations- utjämning	Beräkning av koordinatdifferenser, genom gemensam utjämning av GNSS-observationer från fler än två stationer
N, E, U	Betecknar koordinatkomponenterna North, East och Up (norr, öst, upp)
NKG	Nordiska kommissionen för geodesi
Nätverks-RTK	GNSS-teknik för relativ bärvågsmätning i realtid, med flera permanenta referensstationer som samverkar för att optimera hanteringen av felkällor
Periodbortfall	Bortfall av ett antal hela våglängder i den kontinuerliga fasmätningen på GNSS-signalens bärvåg, som beror på att GNSS-mottagaren har tappat signallåsningen
Periodobekant	Obekant antal hela våglängder mellan satellit och GNSS-mottagare (station) vid inledningen av en fasmätning
PPP	Precise Point Positioning
Referenssystem	(inom geodesin) samlingsnamn på system för lägesbestämning och positionsangivelser i en, två eller tre dimensioner
RINEX	Receiver Independent Exchange format; utbytesformat för GNSS-observationer
RMS	Root Mean Square; kvadriskt medelfel
SINEX	Solution Independent Exchange format; utbytesformat för GNSS-lösningar
Standardosäkerhet	Statistiskt spridningsmått. Enligt GUM, Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM, 2008), används detta begrepp istället för det äldre begreppet medelfel. Standardosäkerheten uttrycks vanligen m.h.a. standardavvikelse, grundmedelfel eller annat medelfel.
Statiskt referens- system	Referenssystem där koordinaterna för varje punkt är statiska och inte varierar med tiden
SWEREF 99	Swedish Reference Frame 1999; det svenska nationella referenssystemet. Statiskt referenssystem
Täckningsfaktor	Multipel av standardosäkerheten (JCGM, 2008)
VMF	Vienna Mapping Function
ZPD	Zenith Path Delay

2 Introduktion

Under hösten 2018 etablerades fem permanenta GNSS-stationer med det långsiktiga syftet att studera eventuella lokala – både horisontella och vertikala – rörelser i berggrunden längs de större deformationszonerna i Forsmark.

Nätets utbredning är ungefär 7 km i nord-sydlig riktning och 5 km i öst-västlig riktning; se Figur 2-1.



Figur 2-1. De fem permanenta GNSS-stationerna i Forsmark är Norra Biotesten (NBIO.0), Kobben (KOBB.0), Lillkobben (LKBB.0), Västra Måsklinten (VMAS.0) och Storskäret (SSKA.0).

De permanenta GNSS-stationerna har föregåtts av GNSS-mätningar som genomfördes vid ett fåtal tillfällen per år, så kallade kampanjer (Gustafson och Ljungberg 2010). Man har dock konstaterat att kampanjmätning inte ger den datamängd som krävs, varför Ekman och Ekman (2013) rekommenderat kontinuerliga observationer för vidare studier.

Data från de permanenta GNSS-stationerna analyseras årligen. Detta är den tredje analysen av data från de fem stationerna. I rapporten från det första årets beräkning av GNSS-nätet (Kempe et al. 2020) beskrivs beräkningsprogramvara och strategier utförligt. I rapporten från den andra årliga beräkningen (Kempe et al. 2021) beskrivs de förändringar i beräkningen som då gjordes.

Inför årets beräkning har beräkningsinställningarna inte ändrats, utan vi har fortsatt att använda det beräkningsalternativ som valdes som huvudalternativ vid den första beräkningen, och har därtöver behållit de mindre ändringar av inställningarna som gjordes vid förra årets beräkning.

Kortfattat kan processen beskrivas i ett antal olika steg:

1. Insamling av GNSS-observationer från de fem stationerna i SKB-nätet. Data lagras i standardformatet RINEX. Se även avsnitt 3.2.
2. Beräkning av GNSS-data för att erhålla dagliga koordinater:
 - Baslinjer skapas mellan de stationer som har flest gemensamma satellitobservationer, för att utnyttja observationerna på bästa sätt.
 - Multistationsutjämning ger dagliga koordinater för stationerna. De dagliga koordinaterna ansluts sedan till referenssystemet SWEREF 99.
3. Dagliga koordinater sammanställs till tidsserier, som kan analyseras med syfte att skatta stationshastigheter och eventuella hopp (eng. *discontinuities*).

Den första analysen av SKB-nätet, som gjordes i början av 2020, var inriktad på att testa och jämföra olika beräkningsstrategier; dels lösningar baserade på olika GNSS -signaler eller linjärkombination av dessa, dels olika sätt att hantera jonosfärs- och troposfärsfördröjning. Baserat på bland annat resultaten från den första analysen justerades beräkningsinställningarna något inför den andra årliga analysen.

Vid årets beräkning och analys har endast en av de tidigare testade beräkningsstrategierna räknats; nämligen det alternativ som betraktades som huvudlösning vid de två föregående årliga beräkningarna.

Koordinattidsserierna är nu tillräckligt långa för att preliminära stationshastigheter ska kunna skattas. Förutom visuella studier av tidsserierna för att detektera eventuella problem, har alltså även en första hastighetsskattning gjorts.

3 GNSS-stationerna i Forsmark

Under slutet av 2018 etablerades fem fasta GNSS-referensstationer omkring området i Forsmark för att övervaka markrörelser över tid. Dessa är Kobben, Lillkobben, Norra Biotesten, Storskäret samt Västra Måsklinten. Figur 2-1 visar var stationerna är belägna.

3.1 Utrustning och service

GNSS-stationerna beskrivs utförligt i Kempe et al. (2020). Viss utrustning varierar mellan stationerna, i och med att varje enskild station har olika förutsättningar. Däremot har samtliga referensstationer likadan antenn, radom (antennskydd), antennkabel med tillhörande skydd samt GNSS-mottagare. I bilaga 1 listas den specifika utrustningen på varje station.

Service och tillsyn av stationerna Lillkobben och Storskäret har utförts under år 2021. För stationer som ingår i Swepos realtidstjänst pågår utbyte av samtliga äldre mottagarmodeller varför en ny GNSS-mottagare installerades under april på Storskäret, som ingår i Swepos Nätverks-RTK. I december 2021 byttes all strömförsörjningsutrustning ut på Lillkobben för att i den mån det är möjligt – undvika strömbortfall under den mörkaste tiden på året. Batteribyten är planerade att utföras under 2022 på de övriga stationerna.

Utdrag ur aktivitetsdagbok för åren 2018–2021 finns i bilaga 2.

Det har tydligt framkommit att samtliga stationer som saknar elnätsanslutning (eng. *off grid*) – Lillkobben, Norra Biotesten och Västra Måsklinten – är beroende av så många soltimmar och starka vindar som möjligt, speciellt under de mörkaste månaderna.

Västra Måsklinten hade ett driftstopp som varade från dag 352 (det vill säga, 17 december) år 2020 och 34 dagar (det vill säga 3 februari) in på 2021, vilket också är den station som haft längst driftstopp. Resterande delen av 2021 var det endast Lillkobben som saknade data för två dagar i december, dag 349 och dag 350 (det vill säga, 15–16 december).

3.2 Dataflöde och tillhandahållande av GNSS-data

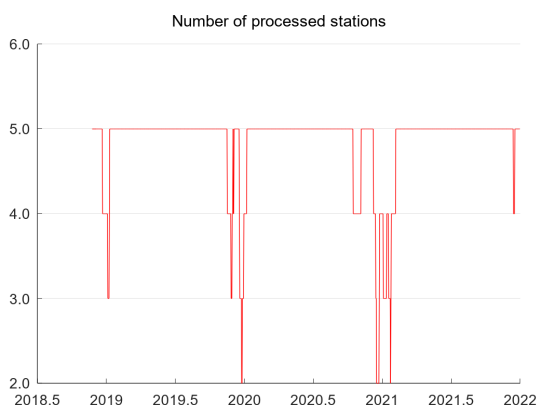
GNSS-rådata för varje referensstation lagras dels internt i respektive mottagare i tillverkarspecifikt format upp till 12 månader, dels på Swepos FTP-server i RINEX-format. Dessutom säkerhetskopieras RINEX-data till två olika LTO5-band för långtidslagring. LTO5-banden lagras sedan på två skilda platser då de är fyllda. I Kempe et al. (2020) finns en mer detaljerad beskrivning av dataflöde och tillhandahållande av GNSS-data för stationerna.

4 Kontinuerliga GNSS-observationer i Forsmark

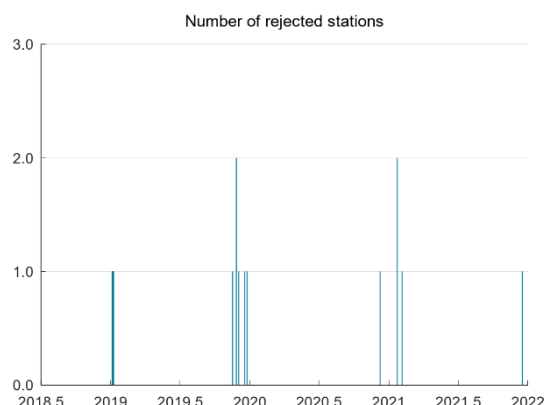
4.1 Tillgängliga GNSS-data

GNSS-data för perioden 24 november 2018 till 31 december 2021 har beräknats.

För fyra dygn i slutet av 2018 fanns observationsdata endast från KOB.B.0, varför det inte gick att genomföra beräkning av nätet dessa dagar. Utöver detta är det 130 dygn där observationsfiler från en eller flera stationer saknas; se Figur 4-1. För 14 dygn har observationsfilen för en, eller i enstaka fall två, av stationerna förkastats på grund av för kort observationstid; se Figur 4-2.



Figur 4-1. Antal indatafiler i GNSS-beräkningen varje dygn. För 130 dygn saknas data från en eller flera stationer. Skalan på den horisontella axeln är decimala år.



Figur 4-2. Antal stationer per dygn som har förkastats p.g.a. för kort observationsfil.

Totalt är det 138 av 1130 dygnslösningar som saknar resultat – det vill säga dagliga koordinater – för en eller flera stationer.

4.2 Val av observationer

För den här typen av GNSS-tillämpningar används observationer av bärvågen på GNSS - satelliternas signaler L1 och L2. Man kan också använda olika kombinationer av L1 och L2, till exempel jonosfärsfri linjärkombination L3 som används främst vid långa baslinjer för att eliminera den effekt som jonosfären har på GNSS -signalerna. Användning av L3 förstärker dock bruset, bland annat från lokala effekter, ungefär tre gånger, vilket gör att L3 normalt inte är ett förstahandsalternativ vid korta baslinjer (upp till ca 10 km).

För beräkningen av SKB-nätet har endast GPS- och Glonass-data använts – det vill säga inga Galileo-observationer. Det motiveras främst av att många antenmodeller, för mottagarantenner, ännu saknar ”äkta” värden för Galileo. Vanligtvis används därför GPS L2-värdena även för Galileo L5, vilket kan ge systematiska effekter. Dessutom förväntas inget signifikant tillskott av Galileo i det här fallet när stationerna har bra sikt, mättiderna är långa och stationsavstånden korta.

I nuläget är bedömningen att det är rimligt att börja använda Galileo i SKB-beräkningen när nästa version av ITRF har lanserats. När en ny ITRF-realisering lanseras, så tar IGS fram en ny lista med antenmodeller, där äldre antenmodeller kan ersättas av uppdaterade modeller; till exempel kan man då införa ”äkta” värden för Galileo.

En preliminärversion av nästa ITRF-realisering släpptes i slutet av 2021 och den slutliga versionen kommer troligen under våren 2022. När ITRF-realiseringen väl är lanserad så behöver IGS ta fram sin egen version av referenssystemsrealiseringen, liksom en uppdaterad lista över antenmodeller, innan den nya realiseringen kan börja användas i praktiken. Man planerar nu för att ITRF2020 ska tas i bruk inom IGS under sommaren 2022 (IGS 2022).

5 Beräkning av GNSS-data

Rapporten från den första av de årliga beräkningarna av GNSS-nätet (Kempe et al. 2020) beskriver beräkningsprogramvara och -strategier utförligt, liksom de olika alternativen för modellering av jonosfärens och troposfärens effekter på GNSS -signalerna.

I rapporten från föregående års beräkning (Kempe et al. 2021) beskrivs de förändringar av beräkningsinställningar som gjordes inför beräkningen. Vid årets beräkning av GNSS-nätet i Forsmark har samma beräkningsinställningar använts.

Detta år har dock endast en beräkningsstrategi använts, till skillnad från de tidigare beräkningarna – nämligen den strategi som valts till huvudalternativ tidigare år, det vill säga med regional jonosfärsmodell och skattning av troposfärsparametrar.

5.1 Programvara och beräkningsstrategier

För beräkning av GNSS-observationerna har Bernese GNSS Software version 5.2 (release 2021-03-27) använts. Programvaran, som är utvecklad vid universitet i Bern (Dach et al. 2015), bygger på sofistikerade, vetenskapliga algoritmer och modeller. De viktigaste parametrarna och modellerna redovisas i Tabell 5-1.

Dagliga koordinater i skattas i en minsta-kvadratutjämning av respektive dygns GNSS-observationer som har omformats till s k dubbeldifferenser. Utjämningen resulterar i dagliga koordinatfiler och dagliga filer med normalekvationer i standardformatet SINEX. Innan skattning av koordinaterna har avvikande observationer filterats bort och periodobekanta – antal hela våglängder mellan satellit och mottagare – har bestämts till heltal.

För att reducera osäkerheten i satelliternas position används efterberäknade satellitbanor; i detta fall så kallade final-produkter från CODE (Dach et al. 2020). Den 17 maj 2020 började man använda den uppdaterade referenssystemsrealiseringen IGB14 i stället för den tidigare IGS14. Enligt Rebischung (2020, personal communication) Switch to IGB14 reference frame. IGS-mail no 7921. Tillgänglig: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html>) förväntades inte bytet påverka kontinuiteten i produktserien.

Tabell 5-1 . Huvudsakliga parametrar och modeller som använts i GNSS-beräkningen.

Indata	
GNSS-observationer	GPS/Glonass-data i RINEX-format, 30 sek-intervall
Banddata	CODE:s final-produkter
Referenssystem	IGS14/IGb14 (GNSS-beräkning) SWEREF 99 18 00 ellh (koordinatlösningar)
Antennmodeller	Absoluta antennmodeller igs14.atx, inkl. typmodell för TPSCR.G5 NONE (används även för TPSCR.G5 OSPS)
Parametrar och modeller	
Observabler	Dubbeldifferenser av bärvågsobservationer Elevationsmask 3° Elevationsberoende viktning L1 och jonsfärfri linjärkombination L3 (L2 för kontroll)
Mottagarklockfel	Skattas ur kod-observationer för resp. mottagare; elimineras genom dubbeldifferenser
Satellitklockfel	Elimineras genom dubbeldifferenser
Kriterier för förkastande av data	Låg kvalitet på RINEX-data, t ex för få observationer Screening av dubbeldifferensresidualer; gränsvärde 6 mm för residualer
Lösning av periodobekanta	SIGMA-algoritm
Jonosfär	a) Regional jonosfärmodell b) L3 eliminerar jonosfäreffekten
Troposfär	A priori-modell GMF (Böhm et al. 2007) för datascreening, preliminära (flyt-) lösningar och för lösning av periodobekanta. A priori-modell VMF (Böhm et al. 2006) för de slutliga lösningarna där ZPD skattas varje timme.
Tidjord	Hantering av tidjord i Bernese GNSS Software 5.2 görs enligt IERS conventions 2010. (Petit och Luzum 2010)
Ocean tidal loading	FES2004 (Letellier 2004)
Atmospheric tidal loading	Ray-Ponte (Ray och Ponte 2003)
Referenssystemsrealisering	Nätet ansluts till ungefärligt IGS14 i observationsepoken, på KOB.B.0 (sigma 0.0001 m). Nätet ansluts till SWEREF 99 genom translation på KOB.B.0.

En sammanfattning av beräkningsgången finns i bilaga 3.

I bilaga 4 redovisas strukturen för leverans av beräkning och resultat, så som de levererats till SKB:

- Indata (rådata, modeller m m).
- Beräkningsinställningar.
- Resultat från Bernese GNSS Software.
- Jämförelser och analyser av beräkningsresultat.

Varje dygn har räknats separat och resulterat i dagliga koordinatuppsättningar. KOB.B.0 har fixerats i beräkningarna och de andra stationerna har bestämts relativt denna.

De två huvudsakliga anledningarna till att KOB.B.0 valts som referensstation vid beräkning av SKB-nätet är att stationen ligger centralt i nätet och är en av de stationer som har mest observationsdata.

Inför kommande beräkningar kan såväl beräkningsstrategier som andra ställningstaganden omprövas, men tanken är nu att hålla fast vid det valda lösningsalternativet under de närmaste åren. När jonosfärsaktiviteten ökar kan det antagligen bli aktuellt att återigen genomföra tester och utvärdera möjliga beräkningsalternativ.

5.2 Hantering av jonosfär och troposfär

Jonosfären är ett av de atmosfärslager som har störst påverkan på GNSS -signalerna på väg mellan satellit och GNSS-mottagare. Jonosfäreffekten varierar med jordens rotation och solens aktivitet, och kan bland annat orsaka skalfel i GNSS-baslinjerna.

Regionala jonosfärmodeller baserade på data från SKB-nätet har använts för hantering av jonosfäreffekten, vid beräkning av L1- och L2-lösningarna. Vid beräkning av L3-lösningarna används jonosfärmodellen endast för lösning av periodobekanta och för beräkning av högre ordningens jonosfärkorrektioner.

För att de regionala jonosfärmodellerna ska modellera jonosfärens förändring över dygnet med rimlig upplösning skattades jonosfärparametrar var fjärde timme enligt förebild från Nyberg et al. (2013).

Troposfären är den lägsta delen av atmosfären och dess påverkan på GNSS -signalerna kan delas in i en hydrostatisk och en våt del. Dess effekt är densamma för alla GNSS -signaler och kan därför inte elimineras genom att bilda kombinationer av GNSS -signalerna. Troposfäreffekten måste i stället modelleras eller skattas ur observationsdata.

GMF (Global Mapping Function) har använts som a priori-modell och mappningsfunktion vid skattning av troposfärparametrar (ZPD) i datascreening och de preliminära lösningarna, såväl som vid lösning av periodobekanta. Troposfärparametrar har skattats varannan timme. För skattning av troposfärgradients användes Chen-Herrings modell (Chen och Herring, 1997).

För de slutliga lösningarna användes VMF (Vienna Mapping Function) som a priori-modell och mappningsfunktion vid skattning av ZPD. Troposfärparametrar har skattats varje timme. För skattning av troposfärgradients användes Chen-Herrings modell.

För små GNSS-nät, som SKB-nätet, går det inte att skatta troposfärparametrar för alla stationer eftersom korrelationen mellan dem blir för hög. På grund av detta har troposfärparametrarna skattats relativt en referensstation; i detta fall KOB.B.0.

5.3 Referenssystemsanslutning

Genom att använda ”kända” koordinater i ett väldefinierat referenssystem, för en eller flera referensstationer, kan GNSS-lösningarna anslutas till referenssystemet. Om koordinaterna för endast en referensstation fixeras så kommer nätets geometri från GNSS-beräkningen att bevaras, vilket är lämpligt i detta fall.

För GNSS-beräkningen används referenssystemet IGS14/IGb14, vilket är referenssystemet för satellitbanorna. A priori-koordinater i IGS14, epok 2010.0, för alla stationer har tagits fram genom en tidigare PPP-beräkning, som i stora drag följer rekommendationerna i Dach et al. (2015). Eftersom inga skattade hastigheter i IGS14 finns för SKB-stationerna, så används hastighetsmodellen NNR-NUVEL 1A (DeMets et al. 1994) för att extrapolera IGS14-koordinaterna till observationsepoken. Osäkerheten i PPP-lösningen och att det endast finns så kallad. NUVEL-hastigheter gör att IGS14-koordinaterna ska betraktas som ungefärliga i sitt absolutläge. För analyserna av SKB-nätet används med fördel ett statistiskt referenssystem som inte förändras med den europeiska plattans rörelse. SKB har också önskat att resultaten skulle redovisas i SWEREF 99 18 00, med ellipsoidhöjder.

SWEREF 99 har internepok 1999.5 (d.v.s. referenssystemet representerar landets form sommaren 1999). Normalt görs därför en landhöjningskorrektion av IGS14/IGb14-koordinaterna mellan observationsepoken och epok 1999.5 innan lösningen ansluts till SWEREF 99. Eftersom SKB är intresserat av att även detektera relativa rörelser mellan stationerna, som bland annat orsakas av landhöjningen, så har ingen landhöjningskorrektion applicerats i detta fall.

För att ändå få ungefärliga koordinater i SWEREF 99 för stationerna, kan nätet passas in på SWEREF 99, på en av stationerna. Man får då inte ”bästa möjliga” koordinater i SWEREF 99 (det vill säga i epok 1999.5) på de andra stationerna, men den relativa skillnaden i landhöjning kommer att synas som rörelser (utom för den station som hållits fast i inpassningen).

De slutliga lösningarna har transformerats till SWEREF 99 genom att göra en translation på KOB0 till de så kallade. definitiva SWEREF 99-koordinaterna (Alfredsson et al. 2019).

6 Resultat – koordinatberäkning

Vid de tidigare årliga beräkningarna av SKB-nätet i Forsmark har flera olika beräkningsalternativ utvärderats bland annat med hjälp av parametrarna i avsnitt 6.1. Som huvudlösning valdes då alternativet med regional jonofärsmodell för att hantera jonofärsfördröjningen och skattning av tropofärsparametrar för att hantera tropofärsfördröjningen. Vid årets beräkning har endast detta alternativ använts; i rapporten kallad regIONO_TROP.

6.1 Allmänt om beräkningens kvalitet

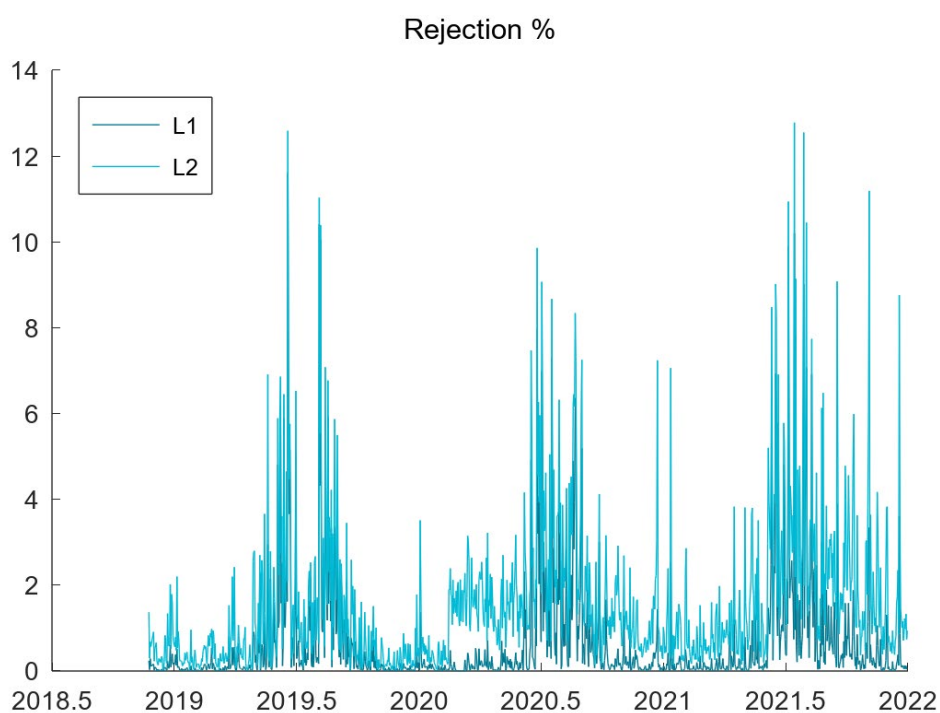
Beräkningens interna kvalitet kan bedömas genom bl.a. andelen observationer som förkastats i datascreeningen (se Tabell 6-1 och Figur 6-1), andelen lösta periodobekanta (Tabell 6-2 och Figur 6-2) och RMS för de dagliga lösningarna (Tabell 6-3).

Tabell 6-1 . Andel förkastade observationer i de dagliga GNSS-lösningarna.
Enhet: %

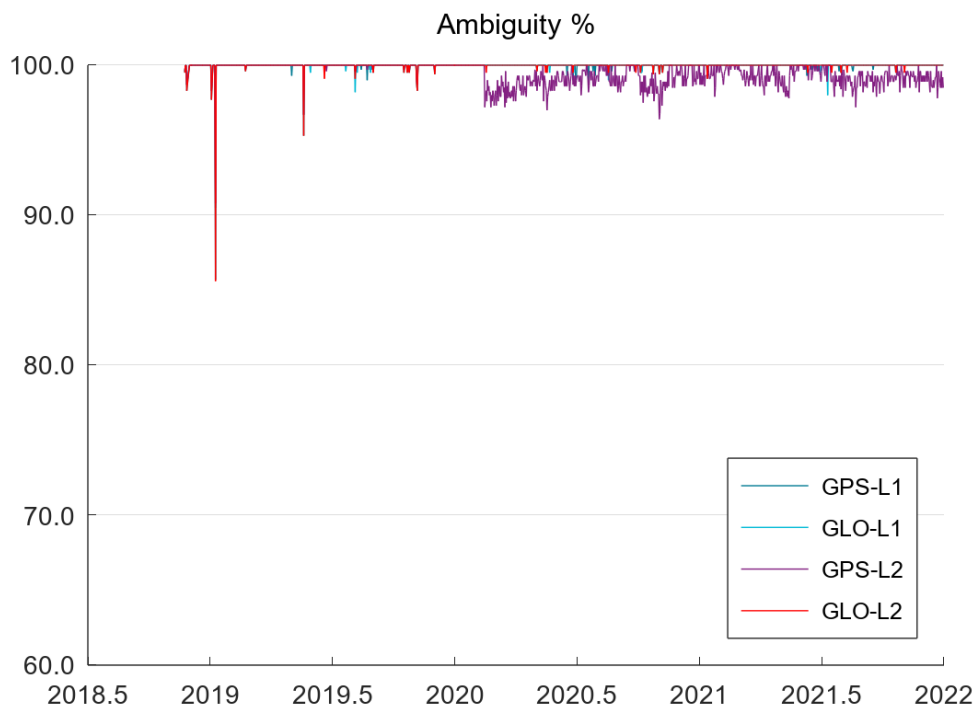
		regIONO_TROP
	medel	0.66
L1	max	11.61
	min	0.00
	medel	1.61
L2	max	12.78
	min	0.03

Tabell 6-2. Andel lösta periodobekanta i de dagliga GNSS-lösningarna.
Enhet: %

		regIONO_TROP
	medel	99.96
L1	max	100.00
	min	88.10
	medel	99.66
L2	max	100.00
	min	88.30



Figur 6-1. Andelen förkastade observationer varierar över året, men ligger i allmänhet under 7-8 % per dag.



Figur 6-2. Andel lösta periodobekanta per satellitsystem och bärvåg.

I Figur 6-2 ses tydligt att andelen lösta periodobekanta för GPS L2 sjunker något i början av 2020, närmare bestämt den 14 februari. I Figur 6-1 syns även en ökning av andelen förkastade L2-data vid samma tidpunkt. Det sammanfaller med tidpunkten för en förändring av signalstyrkan från nyare generationers GPS-satelliter (Steigenberger et al. 2020). Mottagartypen som används på GNSS-stationerna i Forsmark – Trimble NetR9 – har sedan dess ett ökat antal så kallat periodbortfall (eng. *cycle slips*), vilket i sin tur leder till att det blir fler periodobekanta att lösa. Därmed ökar risken att inte alla periodobekanta kan lösas. Om signalavsnitten mellan periodbortfallen är mycket korta kommer å andra sidan en större andel data att förkastas eftersom allt för korta signalavsnitt inte är användbara.

Sannolikt har den större andelen förkastade data och den något minskade andelen lösta periodobekanta – som fortfarande kan betraktas som hög – för GPS L2 ingen påverkan på slutresultatet – de dagliga koordinaterna – eftersom mättiderna är långa.

I Figur 6-1 ses att andelen förkastade observationer generellt har ökat något under den senare delen av perioden. Det kan möjligen vara orsakat av att jonosfärsaktiviteten har börjat öka i och med att solens aktivitet har tilltagit efter den senaste minimiperioden.

Repetierbarheten för de dagliga lösningarna, som visas i Tabell 6-4, anger vilken precision lösningarna håller. Den är i stort sett densamma som vid de tidigare beräkningarna, vilket tyder på att varken förändringen av signalstyrkan på L2-signalen eller den eventuellt ökade jonosfärsaktiviteten märkbart har påverkat slutresultatets kvalitet.

Tabell 6-3. RMS i slutlösningarna.

Enhet: mm

		regIONO_TROP
	medel	1.34
L1	max	2.4
	min	0.9
	medel	1.64
L2	max	2.9
	min	1.0
	medel	0.76
L3	max	1.2
	min	0.6

Tabell 6-4. Daglig repeterbarhet, uttryckt som RMS.

Enhet: mm

		regIONO_TROP
	N	0.70
L1	E	0.35
	U	0.94
	N	0.82
L2	E	0.38
	U	1.07
	N	0.65
L3	E	0.42
	U	1.11

6.2 L1- eller L3-lösning

SKB-nätet är uppbyggt endast av korta baslinjer – som mest ca 7,5 km mellan NBIO.0 och SSKA.0 – vilket talar för att använda L1-lösningar.

L3 är en linjärkombination som eliminerar jonosfäreffekten och används vanligtvis för baslinjer som är längre än ca 10 km. Att använda L3 förstärker bruset men här är försämringen mindre än förväntat, vilket kan bero på att hela nätet har identiska antenninstallationer (antenn- och radomtyp TPSCR.G5 OSPS) och snarlika monument.

Eftersom precisionen i L1-lösningarna är något bättre än L3-lösningarna (se Tabell 6-4) så betraktas L1 som huvudlösning för beräkningen av SKB-nätet.

Med tanke på att precisionen i L3-lösningarna är bättre än förväntat, så kan det bli aktuellt att överväga L3 som slutlösning – efter förnyad analys – när observationer från perioder med högre jonosfäraktivitet kommer att ingå.

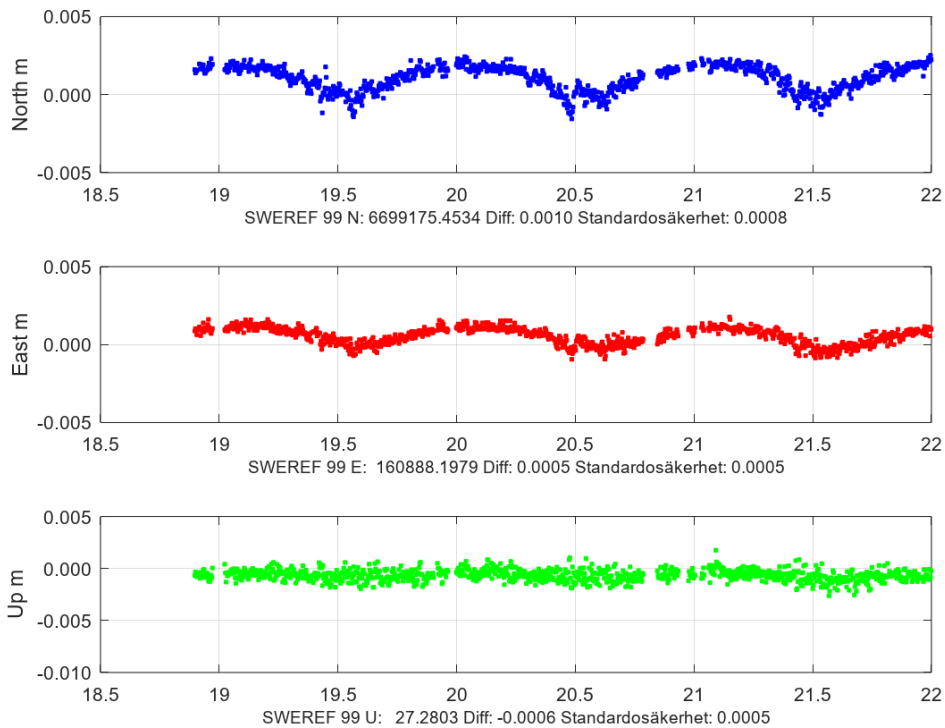
6.3 Koordinattidsserier

De dagliga koordinatlösningarna från GNSS-beräkningen har transformerats från geocentriska kartesiska koordinater i SWEREF 99, till plana koordinater i SWEREF 99 18 00 samt ellipsoidhöjd, för att sedan sammanfogas till stationsvisa tidsserier.

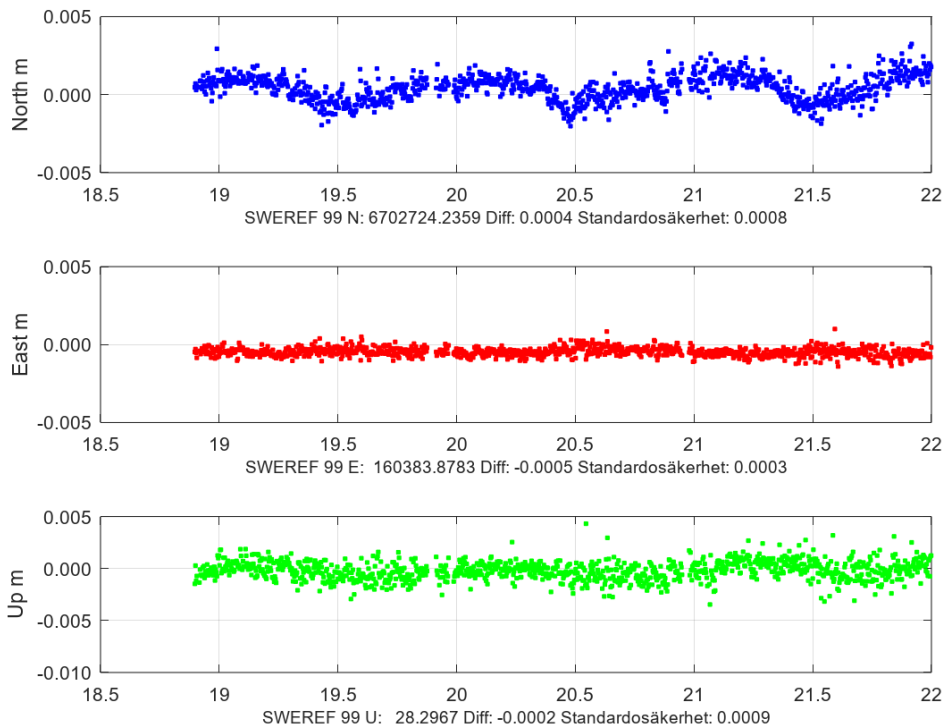
Tidsserierna i Figur 6-3 till Figur 6-12 visar variationerna i de dagliga koordinatlösningarna, i förhållande till stationernas s.k. definitiva SWEREF 99-koordinater (Alfredsson et al. 2019). Eftersom de definitiva koordinaterna är beräknade med delvis andra beräkningsstrategier – till exempel, används L3-lösning och beräkningen är ansluten till SWEREF 99 på annat sätt – så kommer tidsserierna inte att vara centrerade kring noll.

6.3.1 Anslutning till SWEREF 99 på KOBB.0

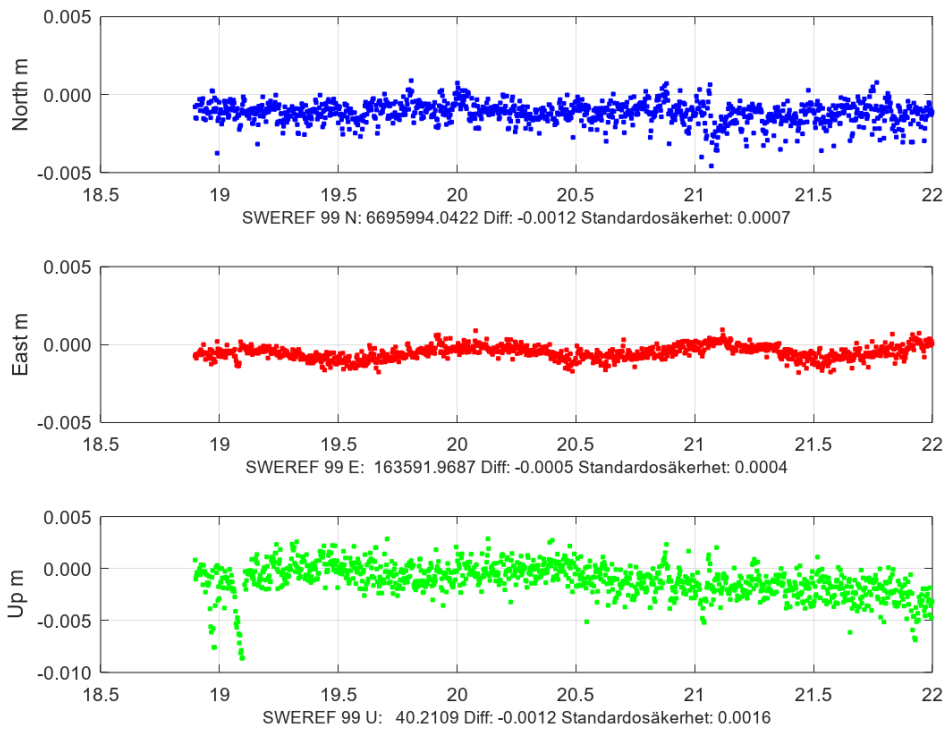
Koordinatlösningarna är anslutna till SWEREF 99 genom translation – det vill säga Helmert-transformation där tre translationer lösts – på KOBB.0 för att så småningom kunna analysera eventuella relativa rörelser mellan stationerna. Det innebär att koordinattidsserien för KOBB.0 inte är relevant att redovisa eftersom stationen i praktiken har hållits fast i anslutningen. Koordinattidsserier för de övriga stationerna visas i Figur 6-3 till Figur 6-7.



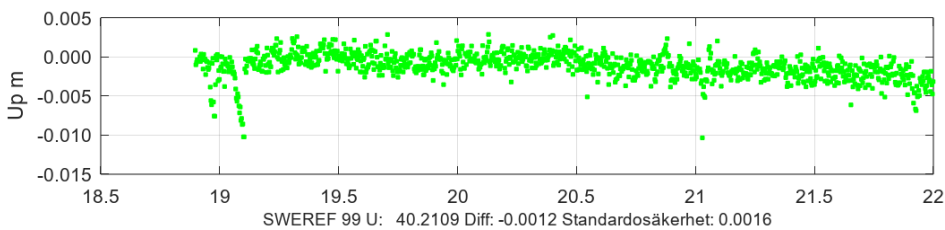
Figur 6-3. Koordinattidsserie för LKBB.0 relativt KOBB.0, baserad på koordinater från L1-lösningen. Skalan på de horisontella axlarna är decimala år från år 2000. Skalan på de vertikala axlarna är vald så att samma skala kan användas för alla stationer (utom SSKA.0 som har avvikande värden i U-komponenten) för att underlätta jämförelser mellan stationerna. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOBB.0.



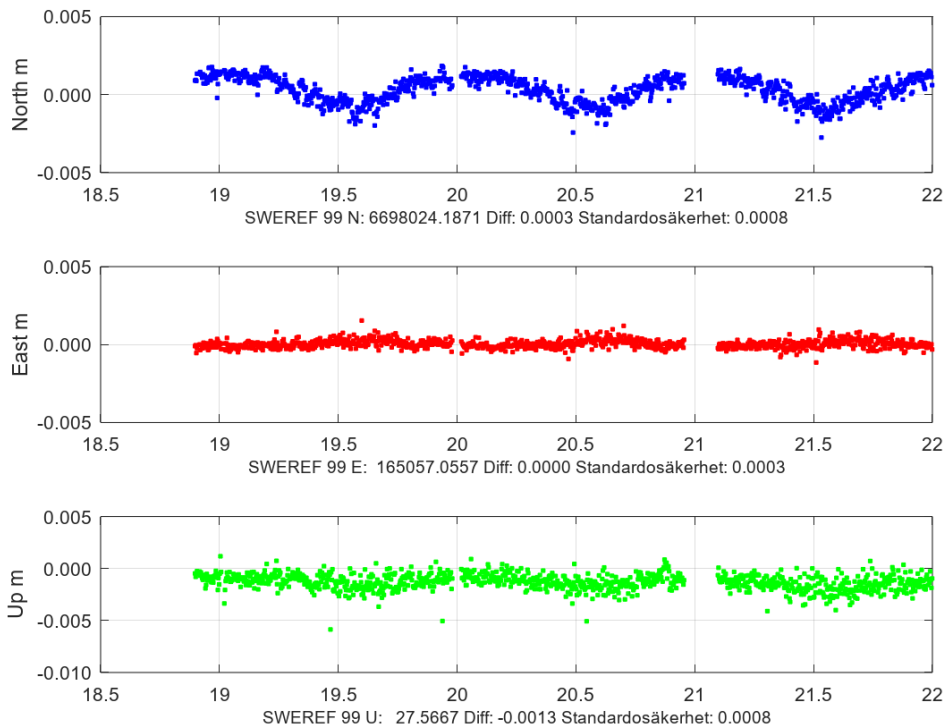
Figur 6-4. Koordinattidsserie för NBIO.0 relativt KOBB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOBB.0.



Figur 6-5. Koordinattidsserie för SSKA.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0. Omkring årsskiftet 2018-2019 samlades snö på antennen, vilket gav avvikande koordinater i U-komponenten. P.g.a. den valda vertikala skalan syns inte alla avvikande positioner här; se även Figur 6-6.



Figur 6-6. Koordinattidsserie för U-komponenten för SSKA.0, där den vertikala skalan är vald så att alla koordinatlösningar i tidsserien visas.



Figur 6-7. Koordinattidsserie för VMAS.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0.

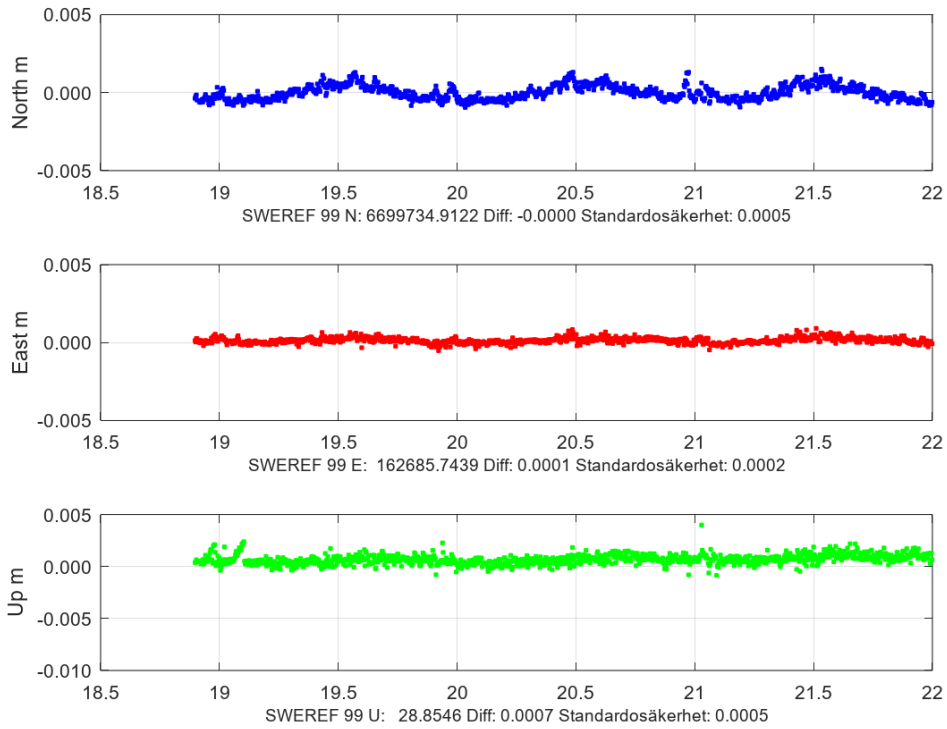
6.3.2 Anslutning till SWEREF 99 på alla stationer

För att få information om KOB.0 gjordes även en alternativ anslutning av de dagliga lösningarna till SWEREF 99, baserad på alla tillgängliga stationer. Även denna anslutning är en Helmert-transformation med tre translationer. Koordinattidsserier för alla stationerna visas i Figur 6-8 till Figur 6-12.

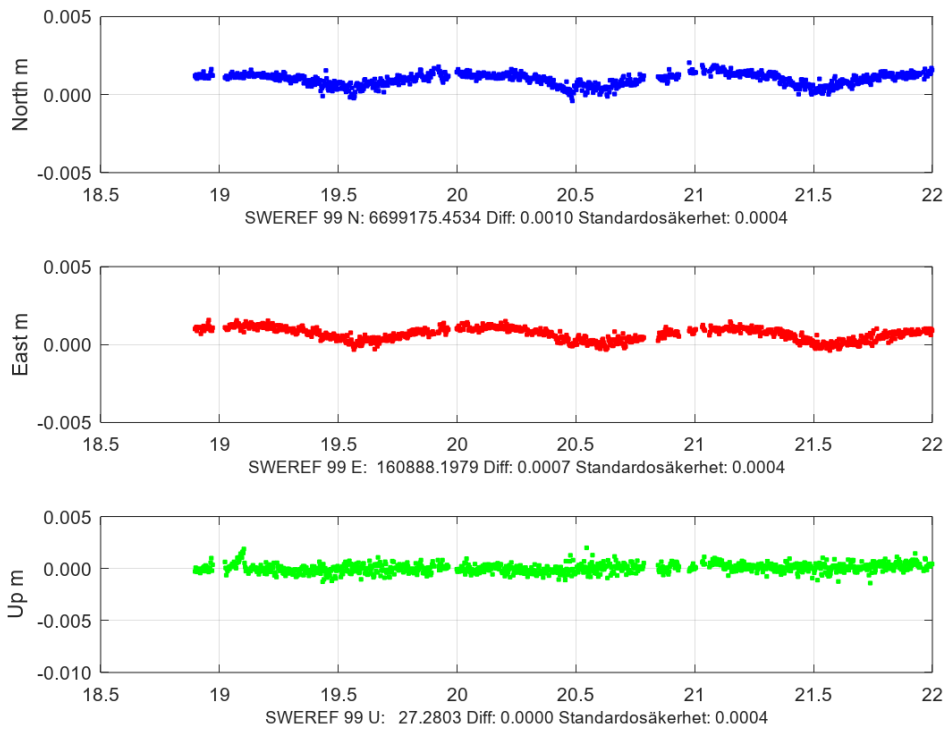
En nackdel med detta angreppssätt är när så få stationer ingår i nätet är att avvikelser i enskilda stationer som ska fördelas över nätet, ger relativt stor effekt på övriga stationer. Effekten på de övriga stationerna blir dock mindre än den ursprungliga avvikelsen, och har motsatt riktning.

Särskilt i Figur 6-8 och Figur 6-9 ses att effekten av den ackumulerade snön på SSKA.0 har fördelats ut mellan stationerna i nätet och ger påverkan även på tidsserierna för KOB.0 och LKBB.0.

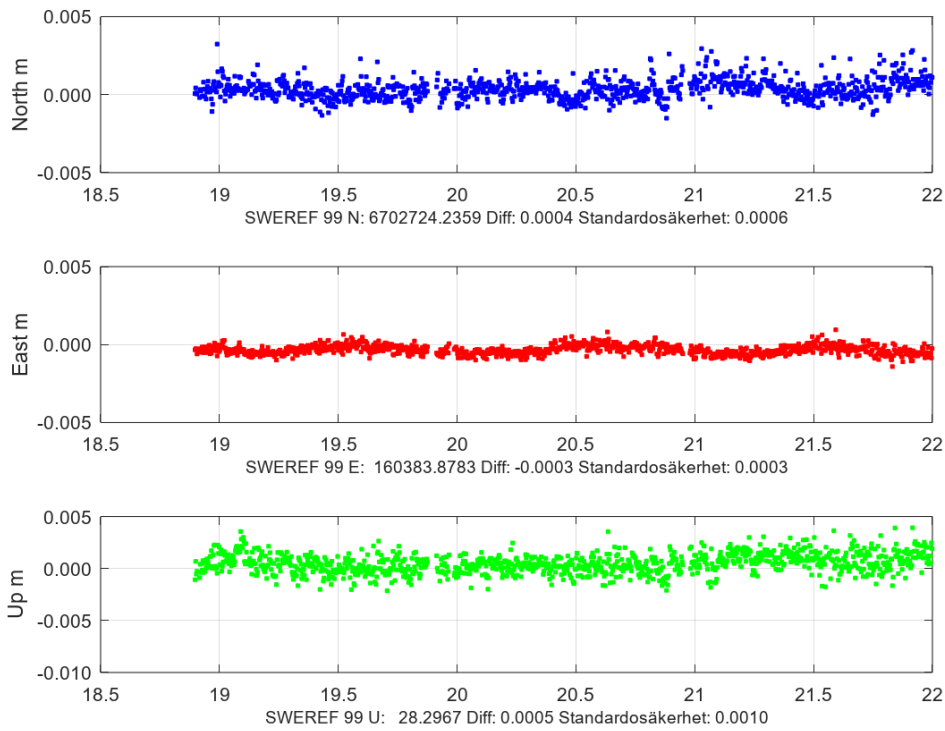
I Figur 6-8 ser N-komponenten för KOB.0 ut att kunna vara påverkad av snö i slutet av 2020. En annan tänkbar orsak till avvikelsen skulle kunna vara att anslutningen till SWEREF 99 påverkas av att i första hand LKBB.0 och VMAS.0 saknar många dagliga koordinater under samma period. Dessa båda stationer har en årstidsvariation med annan fasförskjutning (se avsnitt 7.3) än KOB.0, vilket kan göra att SWEREF 99-anslutningen blir annorlunda när de saknas.



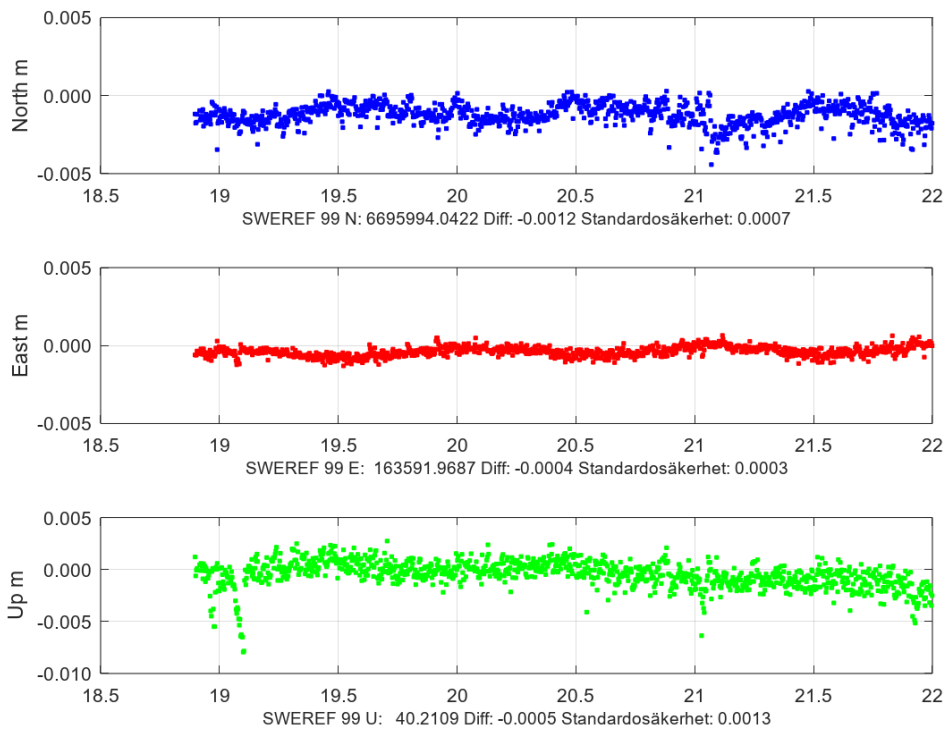
Figur 6-8. Koordinattidsserie för KOBB.0, baserad på koordinater från L1-lösningen. Skalan på de horisontella axlarna är decimala år från år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.



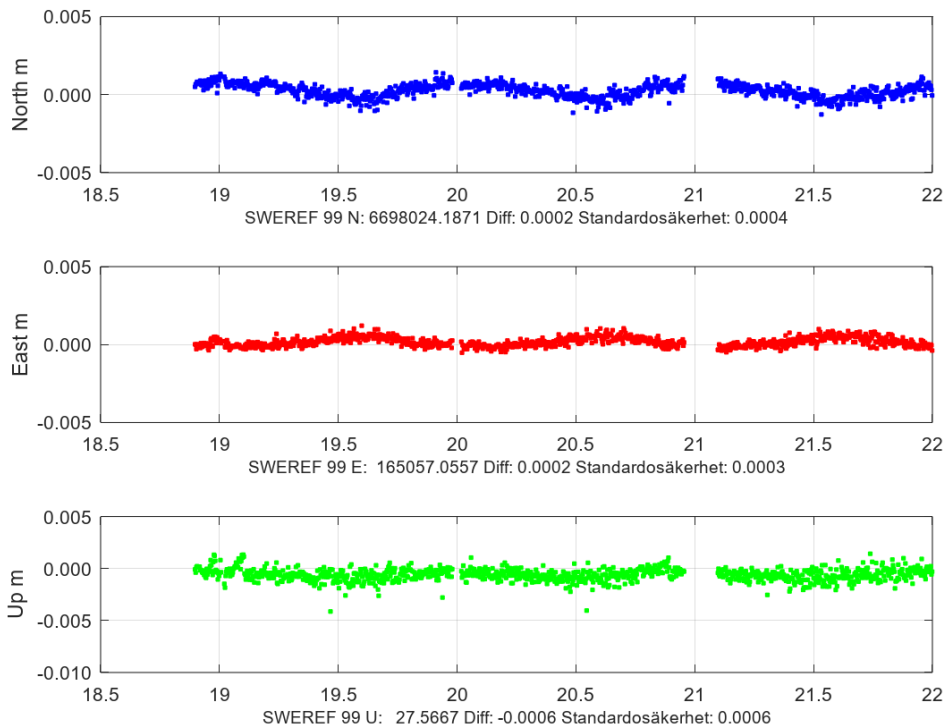
Figur 6-9. Koordinattidsserie för LKBB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.



Figur 6-10. Koordinattidsserie för NBIO.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.



Figur 6-11. Koordinattidsserien för SSKA.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer. Omkring årsskiftet 2018-2019 samlades snö på antennen, vilket gav avvikande koordinater i U-komponenten.



Figur 6-12. Koordinattidsserie för VMAS.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.

6.3.3 Tidsserie för KOBB.0

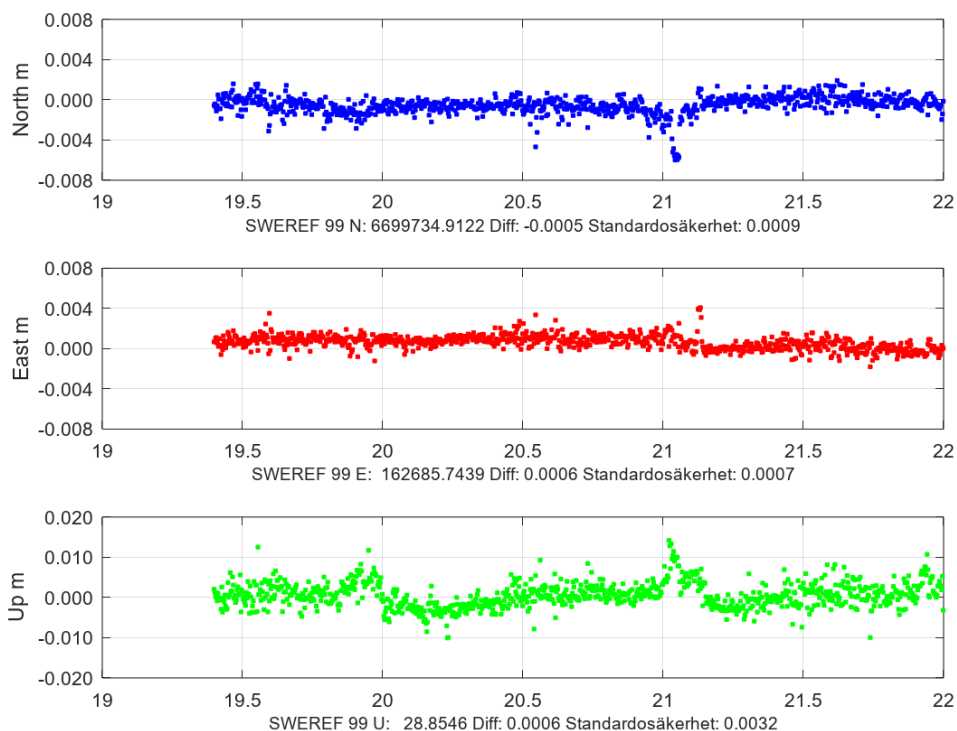
Ytterligare information om stabiliteten för KOBB.0 kan fås från andra beräkningar av Swepos-nätet, som Lantmäteriet löpande gör. På sikt kommer motsvarande information om KOBB.0 att kunna hämtas från det GNSS-nät som beräknas och analyseras av Nordiska kommissionen för geodesi (NKG); se vidare avsnitt 8.1. Hittills har dock inte någon hastighetslösning tagit fram för KOBB.0.

För att redan nu få en ungefärlig, motsvarande bild av KOBB.0, har vi använt dagliga lösningar från den så kallade Swepos veckoberäkning (Alfredsson et al. 2019). Dagliga koordinater i IGS14/IGb14 har, efter landhöjningsreduktion, anslutits till SWEREF 99 på de närmaste klass A-stationerna i Swepos-nätet. Anslutningen har gjorts som en Helmert-transformation med sju parametrar, det vill säga tre translationer, tre rotationer och en skala. SKB-nätet ligger dock långt österut i Sverige, och det finns inga närliggande Swepos-stationer öster om nätet. Därför har vi valt att använda även några Swepos-stationer längre västerut – som ”motvikt” till extrapolationen i öster – trots att de ligger relativt långt från Forsmark.

Dagliga koordinater i IGS14/IGb14 från Swepos veckoberäkning finns tillgängliga först fr. 26 år och med maj 2019, och den tillgängliga tidsserien omfattar därför drygt två och ett halvt år, till slutet av 2021.

Eftersom L3-lösning används i Swepos veckoberäkning så kan vi förvänta oss att tidsserien för KOBB.0 är brusigare än de tidsserier för SKB-nätet som presenterats i avsnitt 6.3.1-6.3.2. I Figur 6-13 ser vi också att det stämmer, eftersom de vertikala skalorna har behövt anpassas något (jämfört med tidsserierna i avsnitt 6.3.1-6.3.2) för att kunna redovisa alla data.

Tidsserien indikerar att KOBB.0 är stabil i SWEREF 99. Vi ser att snö sannolikt samlades på antennen i slutet av 2019 och i början av 2021. Man kan också ana att bruset i tidsserien, särskilt i U-komponenten, något högre sommardag än övriga delar av året.



Figur 6-13. Koordinattidsserie för KOB.B.0, baserad på dagliga koordinater från Swepos veckoberäkning. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på Swepos klass A-stationer Mårtsbo (utanför Gävle), Uppsala, Lovö (utanför Stockholm), Norrköping, Leksand och Karlstad. (Observera att de vertikala skalorna inte är desamma som i de figurer som visar tidsserier från beräkningen av SKB-nätet, för att alla data ska synas i diagrammen.)

6.4 Analys av koordinattidsserierna

I koordinattidsserierna för SSKA.0 ses en snöeffekt i U-komponenten. Omkring årsskiftet 2018-2019 samlades snö på antennen, vilket ger upphov till avvikande koordinater. Effekten syns tydligt när anslutningen till SWEREF 99 görs enbart på KOB.B.0 (se Figur 6-5 och Figur 6-6).

När alla tillgängliga stationer används för anslutningen till SWEREF 99 fördelas koordinatavvikelse som orsakas av snön på SSKA.0 ut på de andra stationerna, och kvar i tidsserien för SSKA.0 blir en mindre del av snöeffekten (se Figur 6-11). I tidsserierna för de övriga stationerna (se Figur 6-8 till Figur 6-10 samt Figur 6-12) kan man i stället se spår av denna snöeffekt, men mindre till beloppet och riktad åt motsatt håll.

I koordinattidsserien för KOB.B.0 (se Figur 6-8) förekommer avvikande positioner i N-komponenten i slutet av 2020, och möjligen även kring årsskiftet 2019–2020, vilket skulle kunna bero på att snö ackumulerats på radomen. Om snö ackumuleras symmetriskt på radomen påverkar det främst U-komponenten, men om snön snedfördelas på radomen – till exempel på grund av blåst – så kan även plankomponenterna påverkas.

Genom att ansluta de dagliga lösningarna till SWEREF 99 på alla stationer som ingår i respektive lösning så kan man bättre jämföra stationernas stabilitet. Utifrån detta kan man i stort sett säga att alla stationer är likvärdiga ur stabilitetssynvinkel. NBIO.0 och SSKA.0 uppvisar något mindre årstidsvariation än KOB.B.0, LKBB.0 och VMAS.0, men är å andra sidan aningen brusigare i N- och U-komponenterna.

Om man jämför tidsserierna från de båda SWEREF 99-anslutningarna, så kan man ana att KOB.B.0:s årstidsvariation påverkar de övriga stationerna – främst LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 – när nätet ansluts till SWEREF 99 endast på KOB.B.0. När nätet ansluts till SWEREF 99 på alla stationer så ses mindre årstidsvariation i tidsserierna för LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0.

Eftersom det i detta fall främst är relativa rörelser mellan GNSS-stationerna som är av intresse, så är ändå anslutning till SWEREF 99 endast på en station att föredra. Förutom att den valda referensstationen bör vara stabil är det även viktigt att den ingår i så många dagliga lösningar som möjligt, det vill säga, att tillgången på observationsdata är god. Utifrån dessa kriterier skulle även SSKA.0 kunna vara möjlig att använda för anslutning till SWEREF 99, men eftersom det ser ut att finnas en trend i tidsserien för U-komponenten, oavsett om anslutning till SWEREF 99 görs på enbart KOBB.0 eller på alla stationer i nätet, så står KOBB.0 fast som förstahandsval för anslutningen till referenssystemet.

SKB har framfört idéer om att ansluta nätet till SWEREF 99 baserat på omkringliggande Swepos-stationer, men om man inkluderar omkringliggande Swepos-stationer kommer man att behöva använda den brusigare L3-lösningen för de längre baslinjerna, vilket kommer att fortplanta sig till de stationsvisa tidsserierna för SKB-nätet. Residualerna kommer då att bli i samma storleksordning som i Figur 6-13.

Vidare måste ställning tas till vilka SWEPOS-stationer som i så fall ska användas för anslutningen. En del av de omkringliggande Swepos-stationerna av klass B har också små årstidsvariationer. Swepos klass A-stationer ligger ännu längre bort (Mårtsbo utanför Gävle, Uppsala, Lovö utanför Stockholm) och så vidare.

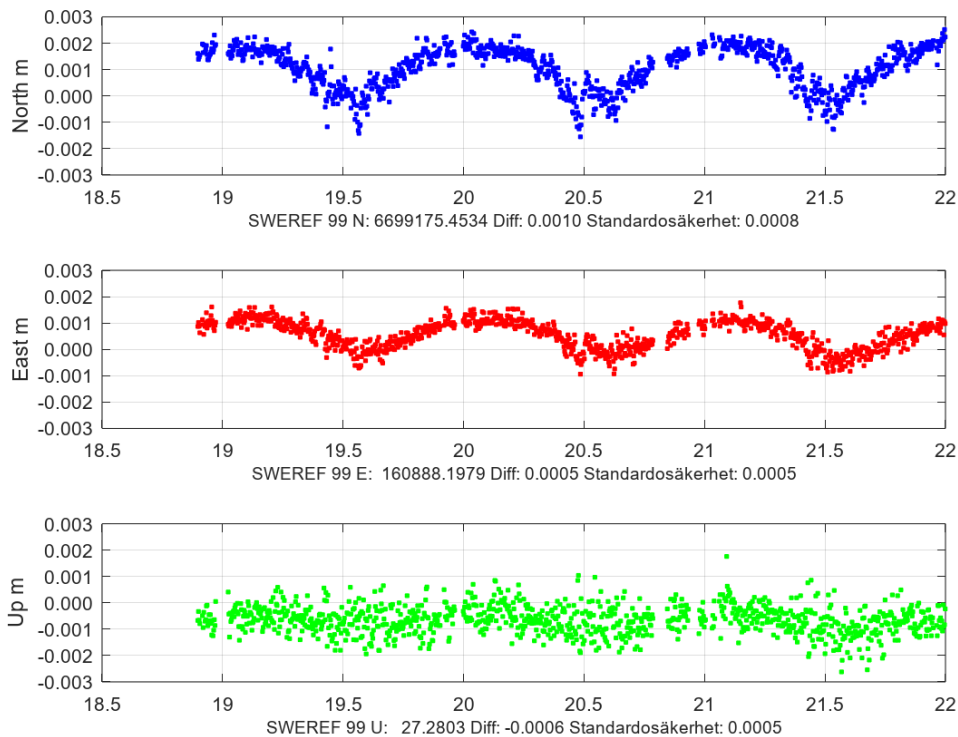
De små årstidsrelaterade variationer som ses i tidsserierna – och främst i de horisontella komponenterna – kan i princip vara orsakade av en eller flera av följande faktorer

- rörelser i berggrunden
- rörelser mellan berggrunden och monumenten, det vill säga monumentens infästning i berggrunden
- deformation av monumenten
- beräkningstekniska effekter.

Vi misstänker att årstidsvariationerna snarare beror på monumentens egenskaper än på beräkningstekniska effekter. Monumenten skulle kunna påverkas olika av uppvärmning på grund av solbelysning under sommaren, till exempel beroende på monumenthöjd, om monumentet skuggas av objekt i sin omgivning, hur monumenten med triangelformad bas är orienterade o.s.v. Om monumentet värms upp och därmed expanderar ojämnt skulle det kunna ge en horisontell rörelse. Masterna på KOBB.0, LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 har dock målats vita för att minska risken för ojämn uppvärmning.

Johansson (2023) visar på liknande årstidsvariationer i de tidsserier som baseras på PPP-beräkning av GNSS-data, det vill säga en metod där man inte använder sig av baslinjer mellan stationerna utan bestämmer koordinater oberoende för varje station. Det talar för att årstidsvariationerna inte är direkt relaterade till beräkningstekniken som använts här, så kallade dubbeldifferenser.

Utöver några mindre avvikelser som tyder på förekomst av snö på radomerna, så går det att se ett något högre brus i koordinattidsserierna under sommaren. Det varierar mellan stationerna i vilken grad bruset ökar sommartid. Figur 6-14 visar LKBB.0 med anpassad skala i vertikalled.



Figur 6-14. Med anpassad skala går det att se att bruset i koordinattidsserien är något högre under sommaren. Figuren visar tidsserien för LKBB.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0.

Vår erfarenhet är att det är vanligt med högre brus i GNSS-beräkningar sommartid, bland annat beroende på att luftfuktigheten som ger en del av fördröjningen i troposfären är högre än under vintern. Det syns också genom att andelen förkastade observationer är större under sommaren (Figur 6-1). Dessutom finns också risk att fåglar, till exempel. måsar, sätter sig på den högsta punkten i sitt revir för att bevaka det – och eftersom GNSS -stationer gärna placeras med fri sikt så kan de ofta vara den högsta punkten i sin omgivning. SKB-stationerna har dock en radomttyp (OSPS) som ska förhindra måsar att sätta sig på dem, se Figur 6-15.



Figur 6-15. Den så kallade radomen – skyddshuven på antennen har en pigg på toppen, som ska göra att måsar och andra fåglar inte ska vilja sitta på radomen och därmed skymma antennerna.

7 Skattning av hastigheter för SKB-stationerna

Hittills har tidsserierna för SKB-stationerna endast studerats visuellt, främst för att se om det förekommer några problem på stationerna.

Enligt Blewitt och Lavallée (2002) bör hel- och halvårsvariationer skattas vid hastighetsbestämning ur GNSS-tidsserier, annars införs ett fel i hastighetsbestämningen. De har visat att detta fel blir försumbart om tidsserien överstiger 4,5 år. Vid korta tidsserier blir korrelationen mellan hastighet och årstidsvariationer stor vilket leder till en instabil lösning. För att undvika detta rekommenderar de en generell minimilängd för GNSS-tidsserier på 2,5 år. Kierulf et al. (2021) har i samband med studier av den fennoskandiska landhöjningen visat att dataserien bör vara minst fem år för att kunna nå en standardosäkerhet på 0,5 mm/år vid hastighetsskattning i höjd.

Nu finns något mer än tre års observationer från SKB-stationerna, från senhösten 2018 till slutet av 2021, och en första hastighetsskattning har gjorts. Hastigheterna måste dock betraktas som preliminära eftersom observationsperioden ännu är relativt kort. Därför kommer också tidsseriernas årstidsvariationer att kunna påverka hastighetsskattningarna.

För skattning av hastigheterna har den lösning använts, där anslutning av SWEREF 99 gjorts på enbart KOB.B.0, vilket motiveras i avsnitt 6.4. Detta anslutningsalternativ innebär att koordinaterna för KOB.B.0 varit fixerade och därmed kan ingen hastighet skattas för stationen. Skattningarna för de övriga stationerna kommer att avse respektive stations hastighet *relativt* KOB.B.0.

Innan hastigheter skattas behöver man filtrera bort dåliga eller avvikande koordinatlösningar, orsakade av till exempel. snö som samlats på antennen. Eventuellt. byte av utrustning på stationerna främst GNSS-antennen kan orsaka hopp i koordinattidsserierna som man behöver ta hänsyn till vid hastighetsskattningen. Av den anledningen är det bra att i möjligaste mån hålla GNSS-utrustningen oförändrad.

Den programvara som har använts för skattning av stationshastigheter är TSview version 2.04 (Herring 2003). En fördel med TSview är att programmet har grafiskt stöd för filtrering av data och utvärdering av tidsserierna. En alternativ programvara kan vara Hector (Bos et al. 2013) där det finns möjlighet till mer realistiska osäkerhetsskattningar men saknar grafiskt stöd. På sikt kan det kan därför vara lämpligt att kombinera användningen av de båda programvarorna för att skatta hastigheter och deras osäkerheter.

7.1 Editering av indata

Indata till hastighetsskattningen, det vill säga koordinattidsserier från de dagliga GNSS-lösningarna, editerades manuellt, baserat på visuell inspektion av tidsserien från respektive station. Avvikande värden markerades och sparades i en textfil. Vid de olika skattningarna av hastigheter med olika inställningar användes denna textfil för att borttagningen av avvikelser skulle vara densamma i alla skattningalternativ.

För NBIO.0, SSKA.0 och VMAS.0 har 30-40 dagliga koordinater tagits bort i den manuella editeringen, på grund av avvikelser orsakade av snö eller mer enstaka avvikelser under sommartid. För LKBB.0 togs färre observationer bort.

Om stationerna har kända förändringar under observationsperioden, t.ex. antennbyten, så kan så kallade brytpunkter (eng. *breaks*) manuellt läggas till vid dessa tidpunkter. Vid hastighetsskattningen löses då hopp (eng. *discontinuities*) för att minimera förändringarnas påverkan på hastighetsskattningen. Eftersom SKB-stationerna inte har några kända förändringar eller synliga hopp i tidsserierna, så har inga brytpunkter lagts till.

7.2 Olika alternativ för hastighetsskattning

Vid hastighetsskattningen har tre olika regressionsmodeller använts i utvärderingssyfte.

Dessa innebär skattning av

1. endast linjär hastighet
2. linjär hastighet i kombination med parametrar för en helårsvariation
3. linjär hastighet i kombination med parametrar för en helårs- och en halvårsvariation

för var och en av de tre koordinatkomponenterna N, E och U.

Med tanke på de årstidsvariationer som ses i koordinattidsserierna och även baserat på rekommendationen i Blewitt och Lavallée (2002) – är det rimligt att lösa någon form av parametrar för dessa variationer, och vi ser därför alternativ 1 i första hand som en testlösning.

I alla dessa fall har programvarans funktion för automatisk borttagning av avvikande observationer använts. Observationer, vars residualer i förhållande till regressionsmodellen är mer än tre gånger större än den skattade standardosäkerheten för en enskild mätning, tas bort.

Hastigheternas osäkerheter har skattats med den så kallade RealSigma-metoden, som ger mer realistiska osäkerhetsskattningar än om man antar att dataserien enbart karakteriseras av vitt brus. Trots detta tenderar ändå osäkerhetsskattningen att vara något optimistisk. (Kall et al. 2019, Mazzotti et al. 2020)

RealSigma-algoritmen antar att dataseriens brus kan beskrivas som en första ordningens Gauss-Markov-process. För att skatta korrelationstiden för processen används följande metod, vilken är mer utförligt beskriven i Herring och McClusky (2009). Dataseriens residualer medelvärdesbildas först över ett antal olika långa tidsintervaller. Osäkerheterna för dessa medelvärden beräknas också, under antagandet att residualerna är vitt brus. För varje tidsintervall beräknas sedan χ^2 -värdet per frihetsgrad (χ^2/f). Om residualerna skulle vara vitt brus så skulle χ^2/f vara oberoende av integrationstiden, men normalt sett finner man att värdet ökar med ökande integrationstid, vilket tyder på att residualerna har en tidskorrelation (som vi antar kan beskrivas med en första ordningens Gauss-Markov-process). Korrelationstiden för Gauss-Markov-processen kan då bestämmas utifrån ökningstakten för χ^2/f i förhållande till ökningen av integrationstiden. Denna används sedan för att beräkna mer realistiska osäkerheter.

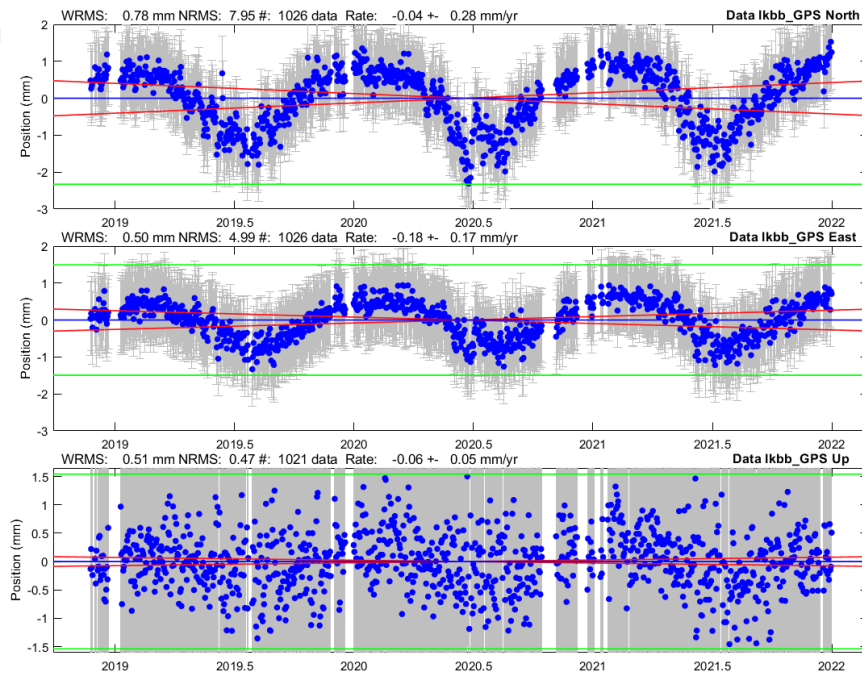
7.2.1 Skattning av linjära hastigheter

Tabell 7-1 samt Figur 7-1 till Figur 7-4 visar resultatet från hastighetsskattningen enligt alternativ 1.

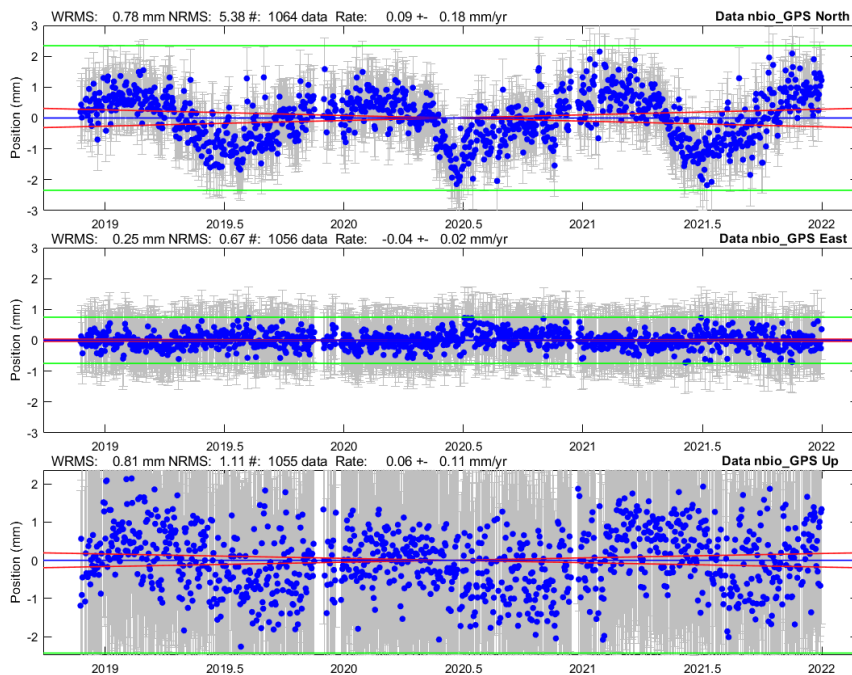
Tabell 7-1. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Endast linjära hastigheter har skattats (alternativ 1).

Enhet: mm/år.

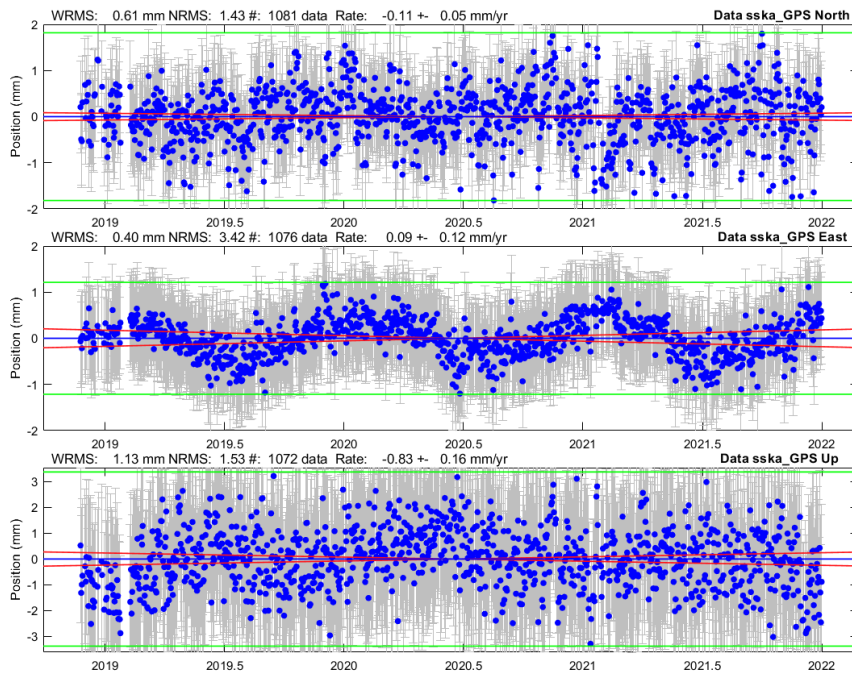
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	-0.04	-0.18	-0.06	0.28	0.17	0.05
NBIO.0	0.09	-0.04	0.06	0.18	0.02	0.11
SSKA.0	-0.11	0.09	-0.83	0.05	0.12	0.16
VMAS.0	-0.16	0.02	-0.18	0.21	0.03	0.09



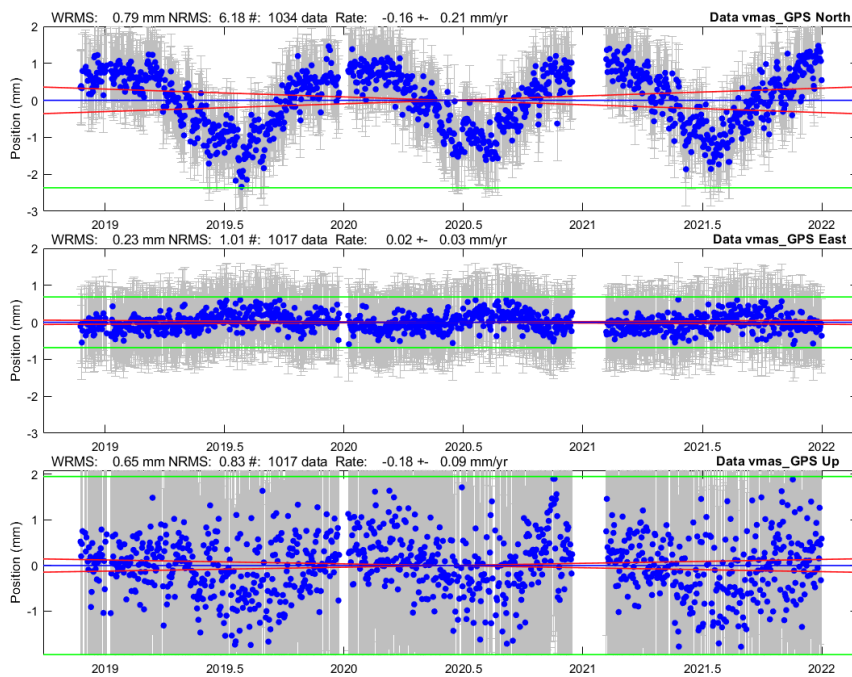
Figur 7-1. Resultat av hastighetsskattning för LKBB.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 1. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten, med täckningsfaktorn 3, för residualerna. De röda linjerna visar standardosäkerheten (med täckningsfaktorn 1) för den skattade hastigheten.



Figur 7-2. Resultat av hastighetsskattning för NBIO.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 1.



Figur 7-3. Resultat av hastighetsskattning för SSKA.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 1.



Figur 7-4. Resultat av hastighetsskattning för VMAS.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 1.

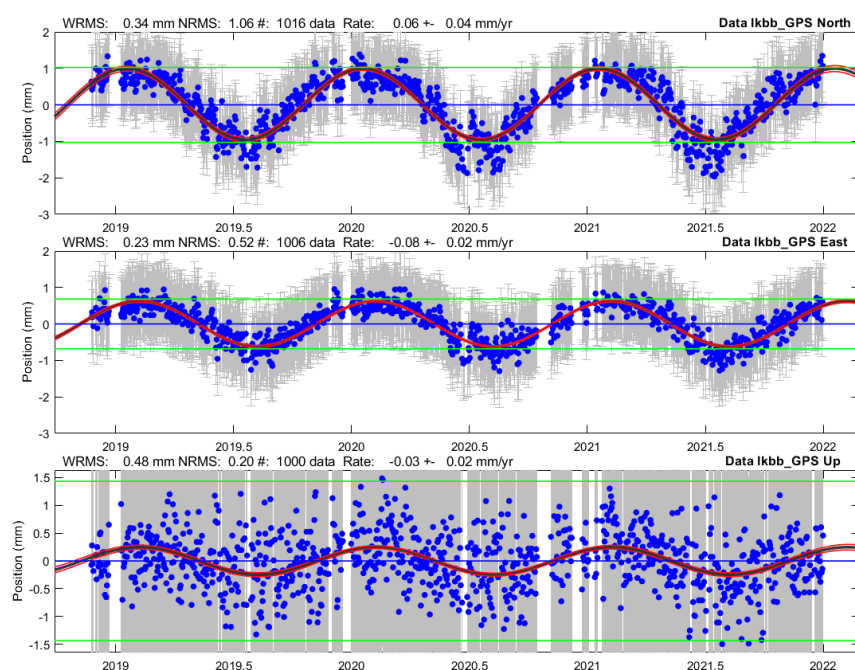
7.2.2 Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för årlig variation

Tabell 7-2 samt Figur 7-5 till Figur 7-8 visar resultatet från hastighetsskattningen enligt alternativ 2.

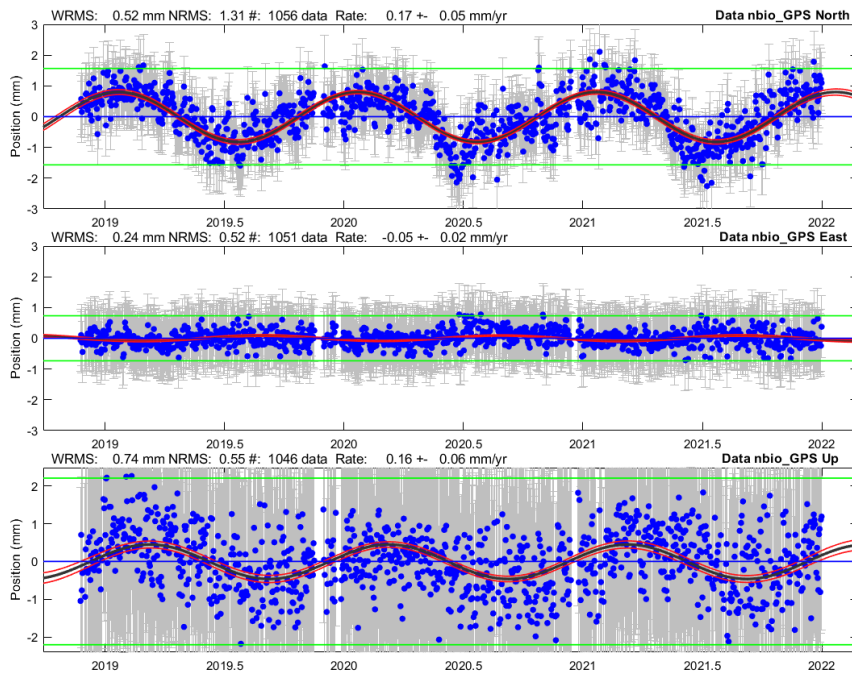
Tabell 7-2. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Linjär hastighet har skattats i kombination med årlig variation (alternativ 2).

Enhet: mm/år.

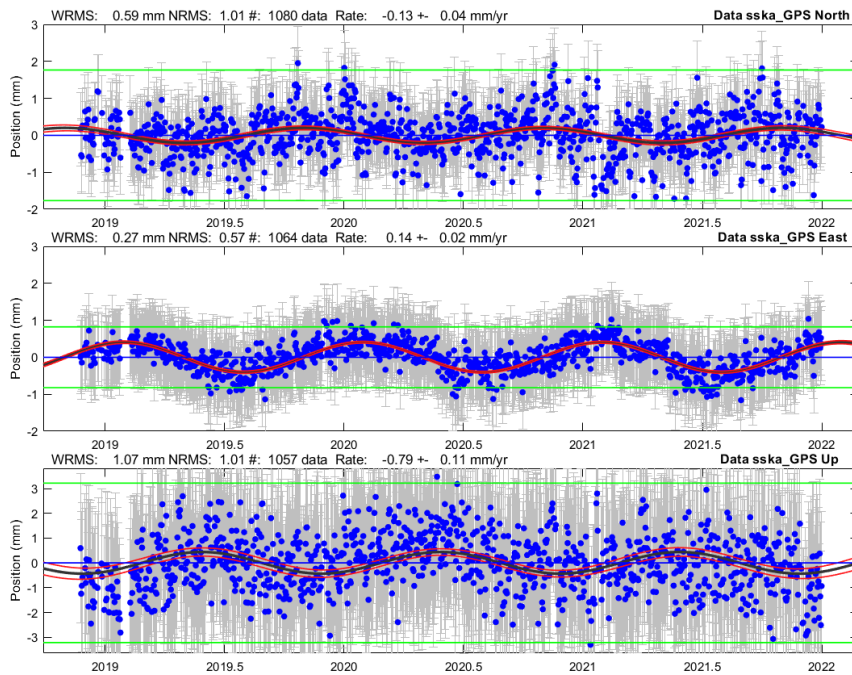
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	0.06	-0.08	-0.03	0.04	0.02	0.02
NBIO.0	0.17	-0.05	0.16	0.05	0.02	0.06
SSKA.0	-0.13	0.14	-0.79	0.04	0.02	0.11
VMAS.0	-0.03	-0.01	-0.13	0.03	0.01	0.03



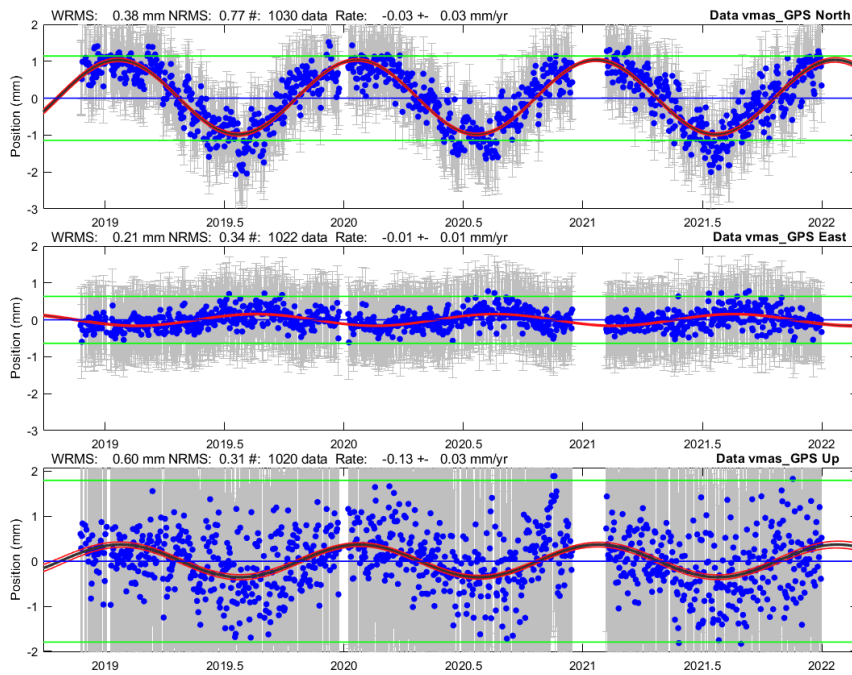
Figur 7-5. Resultat av hastighetsskattning för LKBB.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 2. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade årstidsvariationerna är plottade på tidsserien. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten, med täckningsfaktorn 3, för residualerna. De röda linjerna visar standardosäkerheten (täckningsfaktorn 1) för den skattade funktionen.



Figur 7-6. Resultat av hastighetsskattning för NBIO.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 2. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade årstidsvariationerna är plottade på tidsserien.



Figur 7-7. Resultat av hastighetsskattning för SSKA.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 2. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade årstidsvariationerna är plottade på tidsserien.



Figur 7-8. Resultat av hastighetsskattning för VMAS.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 2. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade årstidsvariationerna är plottade på tidsserien.

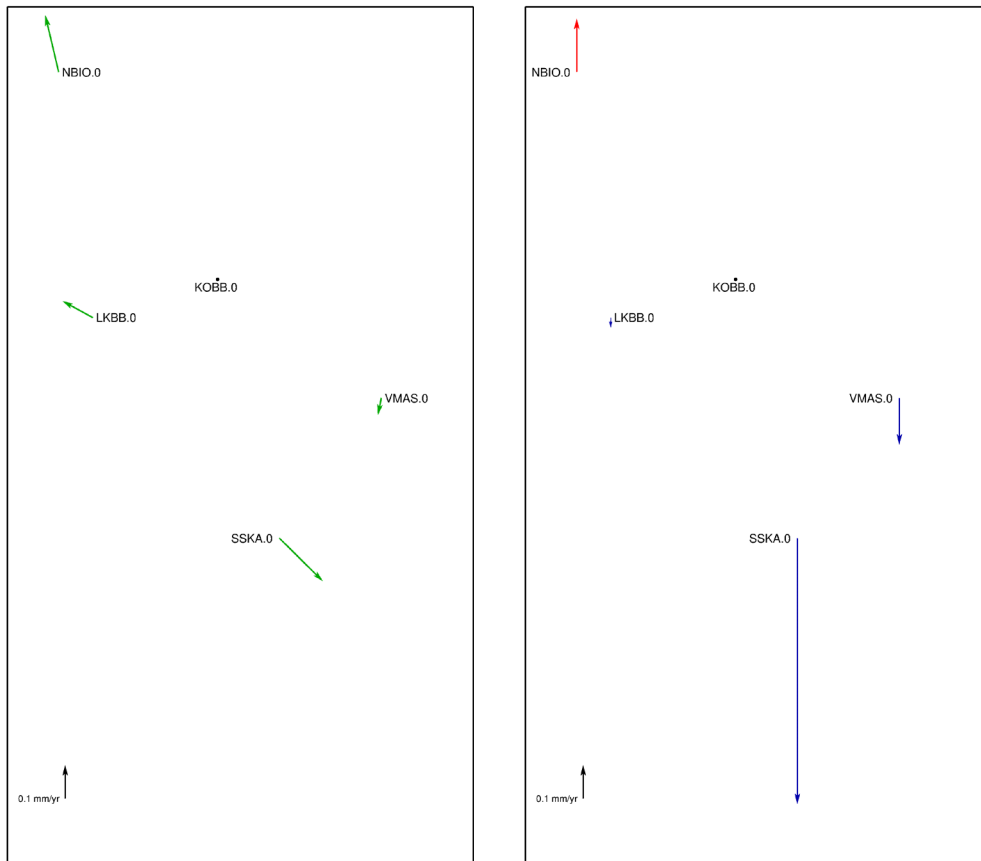
7.2.3 Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för års- och halvårsvariation

Tabell 7-3 samt Figur 7-9 till Figur 7-13 visar resultatet från hastighetsskattningen enligt alternativ 3.

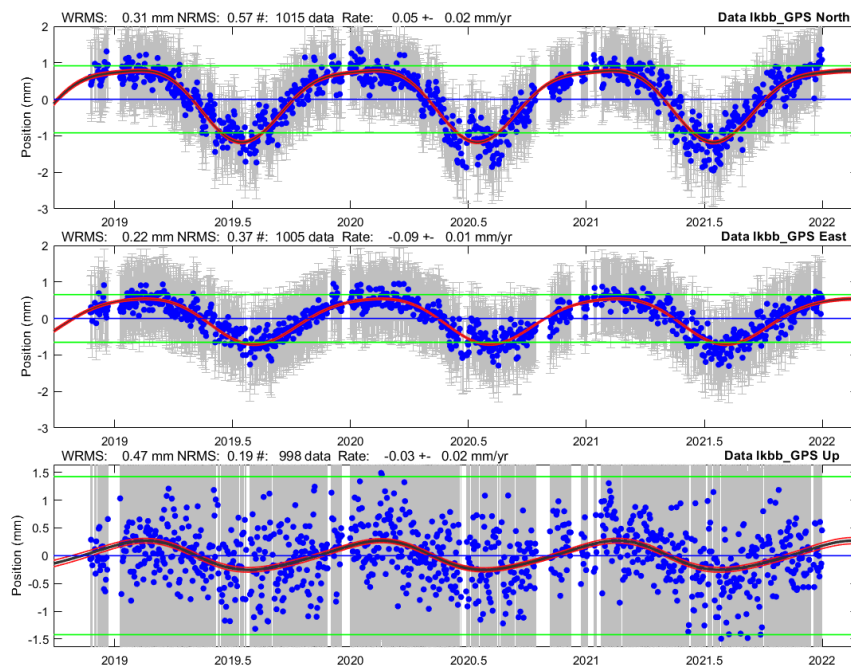
Tabell 7-3. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Linjär hastighet har skattats i kombination med helårs- och halvårsvariation (alternativ 3).

Enhet: mm/år.

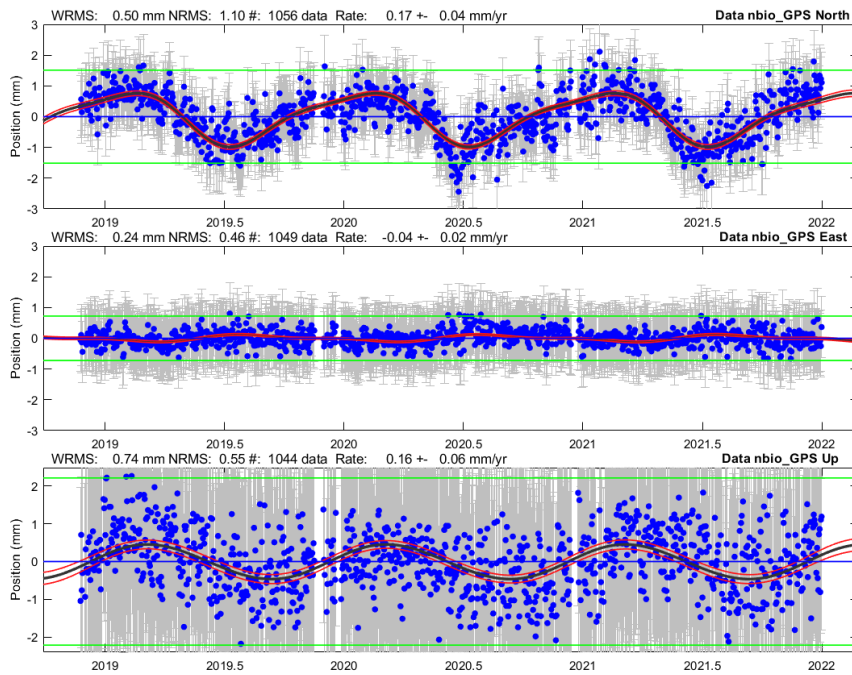
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	0.05	-0.09	-0.03	0.02	0.01	0.02
NBIO.0	0.17	-0.04	0.16	0.04	0.02	0.06
SSKA.0	-0.13	0.13	-0.80	0.04	0.02	0.11
VMAS.0	-0.05	-0.01	-0.14	0.01	0.01	0.03



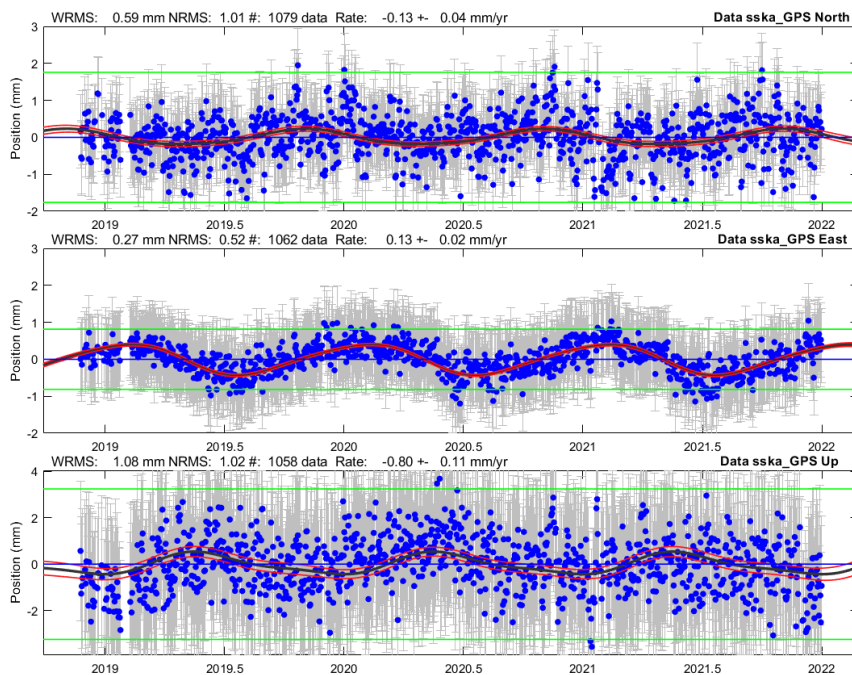
Figur 7-9. Skisserna visar de skattade linjära stationshastigheterna relativt KOBB.0, från Tabell 7-3, med horisontella hastigheter (v_N , v_E) till vänster, och vertikala hastigheter (v_U) till höger.



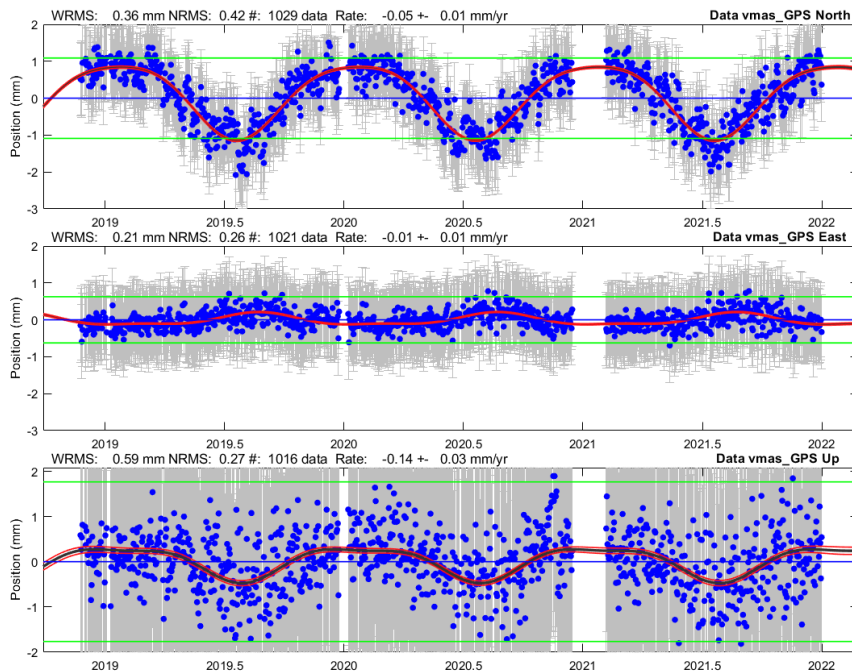
Figur 7-10. Resultat av hastighets-skattning för LKBB.0 relativt KOBB.0, enligt alternativ 3. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade helårs- och halvårsvariationerna är plottade på tidsserien. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten (med täckningsfaktorn 3) för residualerna. De röda linjerna visar standardosäkerheten (täckningsfaktorn 1) för den skattade funktionen.



Figur 7-11. Resultat av hastighetsskattning för NBIO.0 relativt KOB0.0, enligt alternativ 3. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade helårs- och halvårsvariationerna är plottade på tidsserien.



Figur 7-12. Resultat av hastighetsskattning för SSKA.0 relativt KOB0.0, enligt alternativ 3. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade helårs- och halvårsvariationerna är plottade på tidsserien.



Figur 7-13. Resultat av hastighetsskattning för VMAS.0 relativt KOB.B.0, enligt alternativ 3. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade helårs- och halvårsvariationerna är plottade på tidsserien.

7.2.4 Kontroll av manuell indataeditering

För att få någon form av kontroll av den manuella indataediteringen, gjordes också motsvarande hastighetsskattningar baserat på en testlösning där SSKA.0 använts för anslutning till referenssystemet i stället för KOB.B.0. De dagliga koordinaterna i SWEREF 99 är alltså framtagna på samma sätt som beskrivs i avsnitt 6.3.1, men med den skillnaden att KOB.B.0 bytts ut mot SSKA.0 vid referenssystemsanslutningen.

Även för denna koordinatlösning gjordes en manuell editering av indata, baserad på visuell inspektion av tidsserierna, för att utesluta avvikande dagliga koordinatvärden. Samma editering användes sedan för alla tre skattningalternativ.

De skattade hastigheterna för SSKA.0 relativt KOB.B.0 – det vill säga baserat på huvudlösningen som är ansluten till SWEREF 99 på KOB.B.0 – och hastigheterna för KOB.B.0 relativt SSKA.0 – som alltså baseras på testlösningen där SSKA.0 använts för anslutning till SWEREF 99 – stämmer väl överens.

Skillnaden i skattad hastighet (enligt alternativ 3) – beroende på om skattningen görs relativt KOB.B.0 eller SSKA.0 – är störst för LKBB.0, men skillnaden är inte signifikant i förhållande till den skattade osäkerheten.

7.3 Skattning av årstidsvariationer

Vid hastighetsskattningarna enligt alternativ 2 och 3 (se avsnitt 7.2) löser TSview en sinus- och en cosinus-funktion per koordinatkomponent, för den eller de periodlängder som valts. Dessa funktioner kan räknas om till en enda fäsförskjutna cosinusfunktion per koordinatkomponent för att underlätta förståelsen. Omräkningen ger en total amplitud för den nya funktionen samt funktionens fäsförskjutning i förhållande till årets början.

I Tabell 7-4 redovisas de totala amplituderna för den årliga variationen i varje koordinatkomponent, när hastigheter skattats enligt alternativ 2. I Tabell 7-5 redovisas de totala amplituderna för års- och halvårsvariation i varje koordinatkomponent, när hastigheter har skattats enligt alternativ 3.

Tabell 7-4. Beräknade totala amplituder för den årliga variationen per koordinatkomponent (N_1 , E_1 , U_1), med respektive standardosäkerheter ($stdN_1$, $stdE_1$, $stdU_1$) från hastighetsskattning enligt alternativ 2.

Enhet: mm.

Station	N_1	E_1	U_1	$stdN_1$	$stdE_1$	$stdU_1$
LKBB.0	0.97	0.62	0.25	0.05	0.02	0.03
NBIO.0	0.81	0.09	0.46	0.06	0.02	0.07
SSKA.0	0.21	0.41	0.44	0.04	0.02	0.13
VMAS.0	1.01	0.16	0.36	0.03	0.02	0.04

Tabell 7-5. Beräknade totala amplituder för årsvariation per koordinatkomponent (N_1 , E_1 , U_1) med standardosäkerheter ($stdN_1$, $stdE_1$, $stdU_1$) och totalamplituder för halvårsvariation per koordinatkomponent ($N_{0,5}$, $E_{0,5}$, $U_{0,5}$) med standardosäkerheter ($stdN_{0,5}$, $stdE_{0,5}$, $stdU_{0,5}$) från hastighetsskattning enligt alternativ 3.

Enhet: mm.

Station	Årsvariation						Halvårsvariation					
	N_1	E_1	U_1	$stdN_1$	$stdE_1$	$stdU_1$	$N_{0,5}$	$E_{0,5}$	$U_{0,5}$	$stdN_{0,5}$	$stdE_{0,5}$	$stdU_{0,5}$
LKBB.0	0.97	0.62	0.25	0.03	0.02	0.03	0.22	0.09	0.03	0.03	0.02	0.03
NBIO.0	0.81	0.09	0.46	0.05	0.02	0.07	0.20	0.05	0.01	0.05	0.02	0.07
SSKA.0	0.21	0.41	0.44	0.04	0.02	0.13	0.03	0.05	0.13	0.04	0.02	0.13
VMAS.0	1.00	0.16	0.36	0.02	0.01	0.04	0.17	0.06	0.11	0.02	0.01	0.04

Tabell 7-6. Beräknade fasförskjutningar för den årliga variationen, per koordinatkomponent (φN_1 , φE_1 , φU_1), från hastighetsskattning enligt alternativ 2.

Enhet: dagar (efter årsskifte).

Station	φN_1	φE_1	φU_1
LKBB.0	18	37	37
NBIO.0	21	238	68
SSKA.0	303	28	147
VMAS.0	20	231	23

Tabell 7-7. Beräknade fasförskjutningar för års- och halvårsvariation per koordinatkomponent (φN_1 , φE_1 , φU_1 resp. ($\varphi N_{0,5}$, $\varphi E_{0,5}$, $\varphi U_{0,5}$), från hastighetsskattning enligt alternativ 3.

Enhet: dagar (efter årsskifte).

Station	Årsvariation			Halvårsvariation		
	φN_1	φE_1	φU_1	$\varphi N_{0,5}$	$\varphi E_{0,5}$	$\varphi U_{0,5}$
LKBB.0	17	36	37	102	121	68
NBIO.0	21	233	68	87	6	23
SSKA.0	303	28	150	128	86	125
VMAS.0	20	233	23	108	55	118

7.3.1 Kontroll av manuell indataeditering

På samma sätt som beskrivs i avsnitt 7.2.4, kontrollerades effekten av den manuella indataediteringen även vid skattningen av årstidsvariationer. Även här användes testlösningen som nyttjade SSKA.0 för anslutning till referenssystemet, i stället för KOBB.0.

De skattade årstidsvariationerna för SSKA.0 *relativt* KOBB.0 – det vill säga baserat på huvudlösningen som är ansluten till SWEREF 99 på KOBB.0 – och årstidsvariationerna för KOBB.0 *relativt* SSKA.0 – som alltså baseras på testlösningen där SSKA.0 använts för anslutning till SWEREF 99 – stämmer väl överens.

Vid denna jämförelse kan man se att årstidsvariationerna i KOBB.0 (relativt SSKA.0) och SSKA.0 (relativt KOBB.0) har ungefär samma totala amplituder, men fasförskjutningarna skiljer, som förväntat, ett halvt år.

I Tabell 7-4 och Tabell 7-5 ses att NBIO.0 och VMAS.0 har ungefär samma totala amplituder för årstidsvariationerna.

7.4 Analys av skattade hastigheter och årstidsvariationer

7.4.1 Hastigheter

Om de skattade hastigheterna enligt alternativ 1 (Tabell 7-1) sätts i relation till sina respektive standardosäkerheter är det endast SSKA.0 som har en signifikant hastighet; i U-komponenten. Stationens hastighet i N-komponenten är på gränsen till signifikant.

Vid skattning enligt alternativ 2 (Tabell 7-2) blir standardosäkerheterna i allmänhet lägre än för alternativ 1, vilket är rimligt eftersom residualerna blir mindre när parametrar för årstidsvariationer löses i alternativ 2.

Vid skattning enligt alternativ 2 är de flesta hastigheterna signifikanta på 2-sigmanivån jämfört med sina standardosäkerheter men standardosäkerheterna är troligen för optimistiska trots att RealSigma-metoden använts (se avsnitt 7.2).

Vid en jämförelse av alternativ 2 med alternativ 3 (Tabell 7-3) så är skillnaderna i de skattade hastigheterna inte signifikanta i förhållande till respektive standardosäkerheter.

Det är knappt heller några signifikanta skillnader i hastigheterna mellan alternativ 1 och alternativ 3 i relation till respektive standardosäkerheter. Differenserna är dock av nästan samma storleksordning som hastigheterna själva, bortsett från SSKA.0 som har betydligt större hastigheter än differenser, framför allt i höjd. Att hastighetsskillnaderna är små trots årstidsvariationer beror nog på att tidsspannet är nära ett helt antal år (34 dagar mer) och därmed medelvärdesbildas årstidsvariationerna bort även vid skattning av endast en linjär trend.

Att hastigheterna som skattats enligt alternativ 1 skiljer mycket lite från de hastigheter som skattas enligt alternativ 2 och 3, ses som en indikation på att de 34 ”extra” dagarna som ingår i skattningen utöver de tre hela åren inte har så stor påverkan på de skattade hastigheterna. Eftersom huvudsyftet med att skatta hastigheter enligt alternativ 1 var denna jämförelse, så ville vi använda samma dataset det vill säga alla tillgängliga data som vid skattningarna enligt alternativ 2 och 3. Om alternativ 1 hade betraktats som huvudlösning så hade det haft större betydelse att skattningen baserats på ett antal hela år.

7.4.2 Årstidsvariationer

Alla amplituder för årsvariationerna (N_1 , E_1 , U_1) är signifikanta i jämförelse med sina standard-osäkerheter; däremot är i allmänhet halvårsvariationernas amplituder i höjd ($U_{0,5}$) inte signifikanta. Halvårsamplituderna är generellt mycket mindre och mindre signifikanta än helårsamplituderna.

Vid en jämförelse av amplituderna för helårsvariation (se Tabell 7-4 och Tabell 7-5) så är de mycket lika, oavsett om parametrar för halvårsvariation har lösts eller inte.

På motsvarande vis är fasförskjutningen för helårsvariationen (se Tabell 7-6 och Tabell 7-7) mycket lika, oavsett om halvårsvariation har skattats eller inte. Skillnaden är som mest tre dagar utom i E-komponenten för NBIO.0 där fasförskjutningen skiljer 5 dagar, men där är å andra sidan amplituden väldigt liten.

I Tabell 7-4 och Tabell 7-5 ses att NBIO.0 och VMAS.0 har ungefär samma årstidsvariation, avseende både totala amplituder och fasförskjutningar; särskilt i N- och E-komponenterna.

7.4.3 Sammanfattning

Baserat på hastighetsskattningarna och de tillhörande osäkerhetsskattningarna så har det i detta fall ingen större betydelse om hastighetsskattning görs enligt alternativ 2 eller 3. Med tanke på de årstidsvariationer som ses i koordinattidsserierna är det rimligt att lösa någon form av parametrar för dessa variationer och vi följer rekommendationen från Blewitt och Lavallée (2002) och betraktar lösningen med både hel- och halvårsvariationer som huvudlösning.

De största uppmätta horisontella hastigheterna relativt KOB.B.0 är 0.18 mm/år för SSKA.0 respektive 0.17 mm/år för NBIO.0; se Figur 7-9. Osäkerheterna för dessa hastigheter är skattade till 0.09 mm/år med täckningsfaktorn 2. Vi misstänker dock att de skattade osäkerheterna är för låga, varför det inte är säkert att dessa hastigheter verkligen är signifikanta. Den största uppmätta vertikala hastigheten relativt KOB.B.0 är 0.80 ± 0.22 mm/år för SSKA.0 (med täckningsfaktorn 2). Vidare har stationerna LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 en årstidsvariation i N-komponenten med en amplitud på ca 1 mm i förhållande till KOB.B.0. Det finns även årstidsvariationer med en amplitud upp till en halv mm i både E och U för några stationer.

Det bör dock poängteras att dataserien ännu är relativt kort och bara precis har uppnått den undre gränsen – tre år – för när hastigheter generellt sett kan skattas med rimlig säkerhet. Som nämnts i avsnitt 7 så visar Kierulf et al. (2021) att den undre gränsen snarare ligger omkring fem år, om man söker hastigheter liknande den storlek som är aktuell för SKB-nätet i Forsmark.

Resultaten visar att vi för närvarande kan detektera hastigheter på knappt 1 mm/år, men med längre observationstid bör osäkerheterna minska och även mindre (linjära) hastigheter kunna detekteras.

8 Fortsatta studier

Planen är att fortsätta med det valda lösningsalternativet under en period, för att studera olika beräkningsinställningar igen när jonosfärsaktiviteten ökar. Det kan då till exempel bli aktuellt att återigen jämföra regional och global jonosfärsmodell, samt att jämföra L1-lösning med L3-lösning, för att se om nya ställningstaganden behöver göras för att få bästa möjliga koordinattidsserie. Vid eventuellt byte av beräkningsstrategi måste alla data räknas om på nytt för att få dagliga koordinater som ger en konsistent tidsserie.

Även om beräkningsstrategin inte byts ut så är tanken att varje år räkna om alla data, bland annat eftersom programvaran Bernese GNSS Software regelbundet uppdateras och man vill dra nytta av eventuella felrättningar och förbättringar. Dessutom kan till exempel modeller som används vid beräkningen förbättras och bytas ut.

På sikt är det lämpligt att även använda t.ex. programvaran Hector för hastighetsskattningar. Med Hector kan fler brusmodeller testas för att försöka få mer realistiska osäkerhetsskattningar. Det grafiska stödet i TSview kan användas vid bland annat filtrering av data och utvärdering av tids-serierna.

8.1 SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv

Sedan oktober 2019 ingår KOB0.0 i det GNSS-nät som beräknas och analyseras av Nordiska kommissionen för geodesi (NKG) (Lahtinen et al. 2019). Huvudsyftet är att producera konsistenta koordinat- och hastighetslösningar för Norden och Baltikum, bland annat till grund för förvaltning av referenssystemen och geodynamiska studier i området, t ex av landhöjningen. Det innebär att man så småningom kan få information om stabiliteten för KOB0.0 i förhållande till ett större område.

I den senaste kumulativa (flerårs-)lösningen för NKG publicerades inga hastigheter för KOB0.0 (KOB0 10467M001) eftersom den då hade mindre än tre års data. (Lahtinen et al. 2021)

Vid framtida omberäkningar av NKG-nätet kommer KOB0.0 att ingå med alla tillgängliga data, dvs från hösten 2018. NKG-lösningarna produceras för närvarande i IGS14/IGb14 (ITRF2014), aktuell epok. Nästa omberäkning är planerad att börja hösten 2023 och kommer att beräknas i IGS20 (ITRF2020).

SWEREF 99 redovisar läget för den eurasiska plattans läge år 1989 och landets form så som det såg ut vid epoken 1999.5 (Jivall 2001). För att kunna studera globala eller regionala geodynamiska rörelser är det ofta mer lämpligt att redovisa beräkningsresultatet i ett dynamiskt referenssystem, t.ex. ITRF. Tidsserier som bygger på koordinater i ITRF ger möjlighet att studera såväl landhöjning som plattetektonik. För studier av lokala rörelser är dock SWEREF 99 – eller möjligen ett helt lokalt system – mer användbart.

Referenser

Publikationer utgivna av SKB (Svensk Kärnbränslehantering AB) kan hämtas på www.skb.se/publikationer.

Alfredsson A, Alm L, Dahlström F, Jivall L, Kempe C, Wiklund P, 2019. Förvaltning av de nationella geodetiska referensnäten. Lantmäterirapport 2019:1, Lantmäteriet, Sverige.

Blewitt G, Lavallée D, 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity, *Journal of Geophysical Research*, 107 (B7). <https://doi.org/10.1029/2001JB000570>

Bos M S, Fernandes R M S, Williams S D P, Bastos L, 2013. Fast Error Analysis of Continuous GNSS Observations with Missing Data. *Journal of Geodesy*, Vol 87(4), 351–360. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0605-0>

Böhm J, Werl B, Schuh H, 2006. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data. *Journal of Geophysical Research* 111, B02406. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>

Böhm J, Heinkelmann R, Schuh H, 2007. Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy*, 81, 679–683. <https://doi.org/10.1007/s00190-007-0135-3>

Chen G, Herring T A, 1997. Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research* 102, 20489–20502. <https://doi.org/10.1029/97JB01739>

Dach R, Lutz S, Walser P, Fridez P (red), 2015. Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual. Bern: Bern Open Publishing.

Dach D, Schaer S, Arnold D, Kalarus M S, Prange L, Stebler P, Villiger A, Jäggi A, 2020. CODE final product series for the IGS. Bern: University of Bern. Tillgänglig: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE> [31 januari 2022].

DeMets C, Gordon R G, Argus D F, Stein S, 1994. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophysical Research Letters* 21, 2191–2194.

Ekman L, Ekman M, 2013. Quality control of GPS deformation data from Forsmark and analysis of crustal deformation in the local scale. SKB R-13-11, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Gustafson L, Ljungberg A, 2010. Forsmark site investigation. A deformation analysis of the Forsmark GPS monitoring network from 2005 to 2009. SKB P-10-29, Svensk Kärnbränslehantering AB.

Herring T, 2003. MATLAB tools for viewing GPS velocities and time series. *GPS Solutions* vol. 7, 194–199. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0068-0>

Herring T, McClusky S, 2009. GAMIT/GLOBK MATLAB tools. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology. Tillgänglig: http://www-gpsg.mit.edu/~tah/GGMatlab/#_tsview [8 februari 2022].

IGS (International GNSS Service), 2022. Draft minutes – IGS Analysis Centers Meeting, 19 January 2022. Tillgänglig: https://docs.google.com/document/d/1RVZO7EC9PlfIq4W5Za30NJUZP_u2GICIGSUv9XNTJfg/edit [2022-01-31].

JCGM, Joint Committee for Guides in Metrology, 2008. Evaluation of measurement – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM 1995 with minor corrections). JCGM 100:2008, Bureau International des Poids et Mesures, Sèvres, Frankrike.

Jivall L, 2001. SWEREF 99 – new ETRS 89 coordinates in Sweden. LMV-rapport 2001:6, Lantmäteriet, Sverige.

- Johansson J, 2023.** Analysis of Continuous GNSS Measurements in Forsmark 2019–2021. SKB P-21-18, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kall T, Oja T, Kollo K, Liibus A, 2019.** The Noise Properties and Velocities from a Time-Series of Estonian Permanent GNSS Stations. *Geosciences* 9:5, 233. <https://doi.org/10.3390/geosciences9050233>
- Kempe C, Jäderberg R, Jivall L, 2020.** Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2019. SKB P-20-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kempe C, Jäderberg R, Jivall L, 2021.** Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2020. SKB P-21-10, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- Kierulf H P, Stefen H, Barletta V R, Lidberg M, Johansson J, Kristiansen O, Tarasov L, 2021.** A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics*, Volume 146, 101845. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2021.101845>
- Lahtinen S, Jivall L, Häkli P, Kall T, Kollo K, Kosenko K, Galinauskas K, Prizginiene D, Tangen O, Weber M, Nordman M, 2019.** Densification of the ITRF2014 position and velocity solution in the Nordic and Baltic countries. *GPS Solutions* 23, 95. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0886-3>
- Lahtinen S, Jivall L, Häkli P, Nordman M, 2021.** Updated GNSS velocity solution in the Nordic and Baltic countries with a semi-automatic offset detection method. *GPS Solutions* (2022) 26:9. <https://doi.org/10.1007/s10291-021-01194-z>
- Letellier T, 2004.** Étude des ondes de marée sur les plateaux continentaux. Doktorsavh. Université de Toulouse III, Ecole Doctorale des Sciences de l'Univers, de l'Environnement et de l'Espace.
- Mazzotti S, Déprez A, Henrion E, Masson C, Masson F, Menut J-L, Métois M, Nocquet J M, Rolland L, Sakic P, Socquet A, Santamaria-Gomez A, Valty P, Vergnolle M, Vernant P, 2020.** Comparative analysis of synthetic GNSS time series – Bias and precision of velocity estimations. RESIF Research Report, Réseau sismologique et géodésique français, Frankrike.
- Nyberg S, Kallio U, Häkli P, Jokela J, Koivula H, Saaranen V, Rouhiainen P, 2013.** Monitoring the bedrock stability in Olkiluoto – Summary of campaign based GPS measurements in 1996-2011. Posiva Working Report 2013-63, Posiva Oy, Finland.
- Petit G, Luzum B (red), 2010.** IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS). IERS Technical Note 36. Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Mai.
- Ray R D, Ponte R M, 2003.** Barometric tides from ECMWF operational analyses. *Annales Geophysicae* 21, 1897–1910. <https://doi.org/10.5194/angeo-21-1897-2003>
- Steigenberger P et al. 2020.** The new flex power mode: from GPS IIR-M and IIF satellites with extended coverage area. *Inside GNSS*, 21 maj. Tillgänglig: <https://insidegnss.com/the-new-flex-power-mode-from-gps-iir-m-and-iif-satellites-with-extended-coverage-area/> [31 januari 2022].

Bilaga 1

Översikt utrustning på GNSS-stationer


Tabell B1-1. Översikt över stationsutrustning.

	Kobben	Lillkobben	Norra Biotesten	Storskäret	Västra Måsklinten
Antenn TopCon CR-G5	X	X	X	X	X
Antennskydd Radom (OSPS)	X	X	X	X	X
Antennkabel Bedea RG214	X	X	X	X	X
GNSS-mottagare Trimble NetR9	X	X	X		X
GNSS-mottagare Trimble Alloy				X	
4G-modem Sierra Wireless	X	X	X		X
4G-modem Telia				X	
Fjärrbrytare Sikom FIXI	X			X	
Fjärrbrytare GSM-START		X	X		X
Solpanel 250W			X		X
Solpanel 330W		X			
Regulator solpanel		X	X		X
Vindsnurra		X	X		X
Regulator vindsnurra		X	X		X
2 st Batteri 100Ah			X		X
2 st Batteri 120Ah		X			

Bilaga 2

Urklipp ur aktivitetsdagbok

Tabell B2-1. Urklipp ur aktivitetsdagbok 2018–2021.

Version 2.2.0
 AKTIVITETSDAGBOK
Sidan av

OMRÅDE Forsmark	PROJEKT Monitorering Forsmark	BESÄTTNING (fullständiga namn) Hans Åke Åström Rickard Jäderberg
UPPDRAGSANSVARIG PÅ PLATS Hans-Åke Åström	ORGANISATION(ER) Lantmäteriet	AL: Gunnar Rauséus, SKB
KRUNGINFORMATION (ej obligatoriskt)		AKTIVITETSPANSNUMMER AP SFK-16-032 Installation av utrustning för GNSS-mätning i Forsmark

Datum (ååmmdd)	Tid		Aktivitet	Sub- activity ID	Objekt (ID- CODE)	Sektions- nummer (i borrhål)	Läge längs med	
	Start (hh:mm)	Stop (hh:mm)					Från (m)	Till (m)
180905	07:30	16:00	Montering offgridssystem med GPS på V.Måsklinten. Montering mast på Kobben.					
180906	08:00	11:00	Installation av GPS-utrustning på Kobben.					
180920	08:00	11:30	Installation av specialtillverkad masttopp och GPS-utrustning på Storskäret					
181115	08:20	17:00	Montering offgridssystem med GPS på Lilla Kobben samt mast på N. Biotesten.					
181116	09:00	12:00	Montering offgridssystem med GPS på Norra Biotesten					
191025	12:00	14:00	Storskäret: Installation av nytt Teliamodem efter kommunikationsavbrott. (Ingen dataförlust)					
191028	12:30	14.15	Återinstallerat sierramodemet samt installerat 4G-riktantenn. (2 NetR9 på platsen.)					
191030	08:00	15:00	Serviceöversyn av Västra Måsklinten, Lillkobben, Norra Biotesten och Kobben med installation av 4G riktantenn!					
191127	08:00	13:00	Utbyte av trasigt vindkraftverk på Norra Biotesten efter lagerhaveri.					
200611	09:00	15:00	Installation av transponder och 4G-router på Kobben.					
201106	09:00	15:00	Utbyte av fäste + vindkraftverk på Västra Måsklinten och Lillkobben, översyn Norra Biotesten					
210423	10:00	11:00	Installation av ny GNSS-mottagarmodell på Storskäret					
211217	08:00	15:00	Installation av ny strömförsörjningsutrustning på Lillkobben					

Bilaga 3

Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen

Tabell B3-1. De viktigaste stegen i beräkningen av SKB-nätet.

Steg	Subrutin	Kommentar
1	COOVEL	Extrapolerar koordinater till observationsepoken
2	POLUPD	Konverterar jordrotationsfil till Bern-format
3	PRETAB	Skapar bandatafil i tabellform
4	ORBGEN	Skapar GNSS-banor i Bern-format
Import av observationsdata		
5	RNXSMT	Konverterar observationsdata RINEX 3-format till RINEX 2-format, inkl. val av observationstyper
6	RNXGRA	Summerar/redovisar RINEX-filernas innehåll; tar bort dåliga observationsfiler
7	RXOBV3	Konverterar RINEX-filer till Bern-format
8	CODSPP	SPP för varje station, inkl. synkronisering av mottagarklockor (använder ban- och klockdata från steg 3)
Skapa baslinjer och screena data		
9	SNGDIF	Skapar baslinjer med OBSMAX-strategi
10	MAUPRP	Screenar bärvågsdata (L1 och L2) innan detektering av periodbortfall. Identifierar data utan periodbortfall. Finner periodbortfall i återstående data och korrigerar dessa om möjligt.
11	GPSEST	Skapar regional jonofärsmodell
12	GPSEDT (L1)	GPSEST beräknar flytlösning med korrigerade periodbortfall från steg 10. Skattar troposfärsfördröjning, sparar normaliserade residualer och normalekvationer. RESRMS och SATMRK screenar och markerar stora residualer i de sparade residualerna. GPSEST: Samma som ovan, men indata har nu markerade observationer.
13	ADDNEQ2 (L1)	Ger preliminära koordinater (och troposfärsskattning (flytlösning))
14	GPSEDT (L2)	Som steg 12, men för L2.
15	ADDNEQ2 (L2)	Som steg 13, men för L2.
16	GPSEDT (L3)	Som steg 12, men för L3.
17	ADDNEQ2 (L3)	Som steg 13, men för L3.

Tabell B3-1 forts.

Lösa periodobekanta

- | | | |
|----|-------------|--------------------------------------------------------|
| 18 | GPSEST (L1) | Fixerar periodobekanta till heltal, med SIGMA-strategi |
| 19 | GPSEST (L2) | Fixerar periodobekanta till heltal, med SIGMA-strategi |
-

Skapa fixlösningar

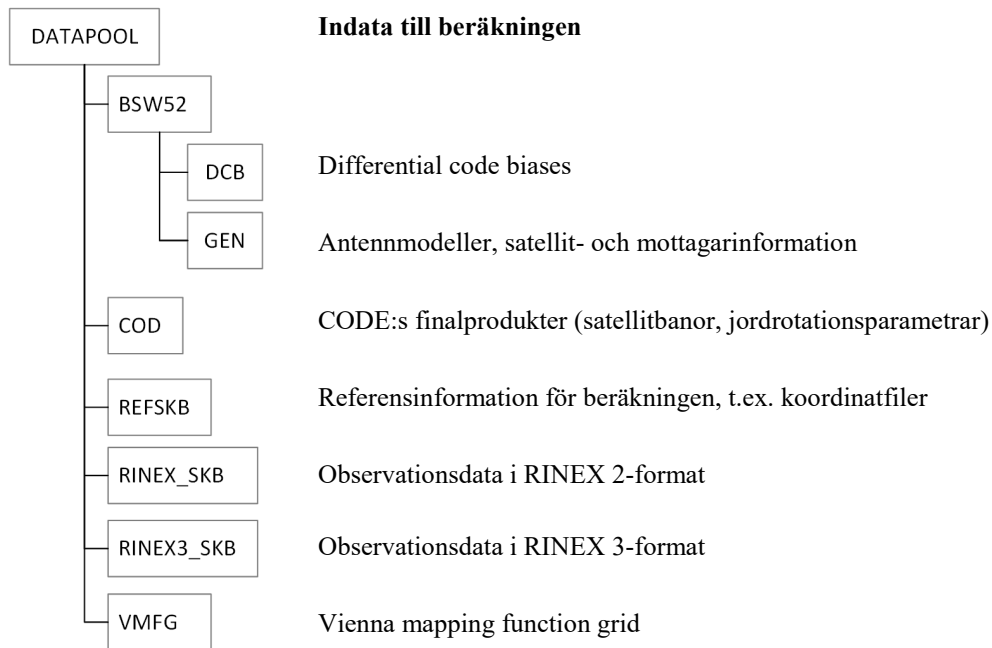
- | | | |
|----|--------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 20 | GPSEST (L1) | Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L1-lösning med fixerade periodobekanta från steg 18; sparar normalekvationer. |
| 21 | ADDNEQ2 (L1) | Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L1-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX från normalekvationerna i steg 20; sparar normalekvationer. |
| 22 | ADDNEQ2 (L1) | Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil |
| 23 | HELMR1 (L1) | Ansluter L1-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0) |
| 24 | GPSEST (L2) | Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L2-lösning med fixerade periodobekanta från steg 19; sparar normalekvationer. |
| 25 | ADDNEQ2 (L2) | Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L2-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX från normalekvationerna i steg 24; sparar normalekvationer. |
| 26 | ADDNEQ2 (L2) | Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil |
| 27 | HELMR1 (L2) | Ansluter L2-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0) |
| 28 | GPSEST (L3) | Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L3-lösning med fixerade periodobekanta från steg 18 och 19; sparar normalekvationer. |
| 29 | ADDNEQ2 (L3) | Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L3-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX från normalekvationerna i steg 28; sparar normalekvationer. |
| 30 | ADDNEQ2 (L3) | Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil |
| 31 | HELMR1 (L3) | Ansluter L3-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0) |
-

Bilaga 4

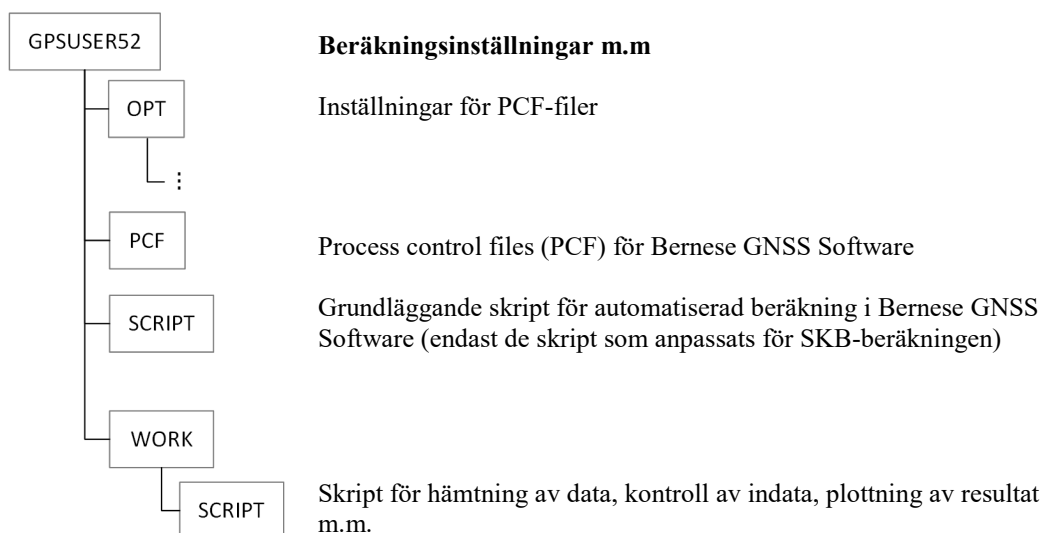
Beskrivning av leveransen

Leveransen till SKB görs helt digitalt och förutom rapporten levereras data enligt nedan.

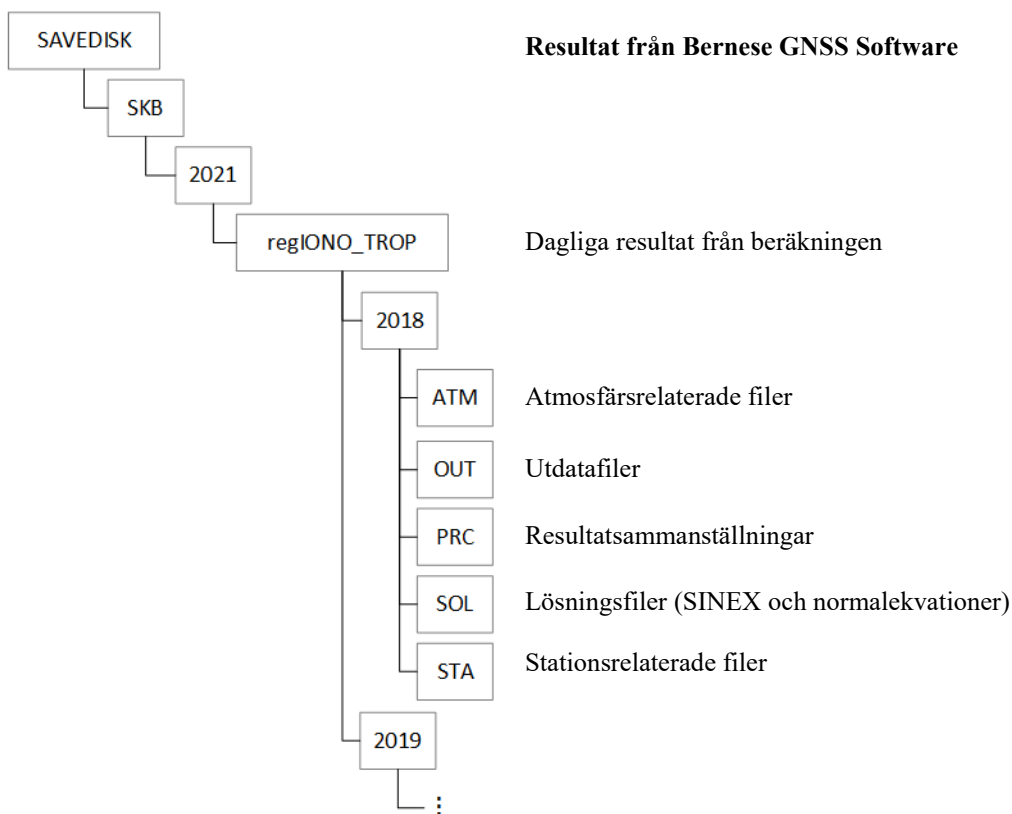
Strukturen följer den standard som brukar användas för beräkningar i Bernese GNSS Software, och innehåller sannolikt mer data än de som SKB primärt är intresserade av. Se Figurför närmare beskrivning av resultaten.



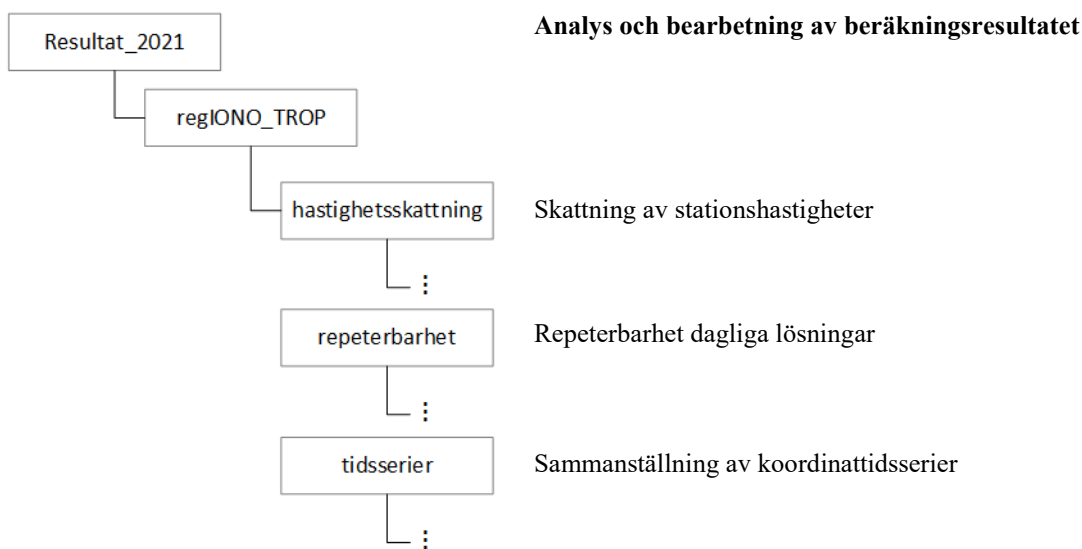
Figur B4-1. Strukturen för indata till GNSS-beräkning med Bernese GNSS Software.



Figur B4-2. Strukturen för inställningar för automatiserad beräkning med Bernese GNSS Software; process control files (PCF) inkl. inställningar och grundläggande skript.



Figur B4-3. Strukturen för dagliga beräkningsresultat från Bernese GNSS Software.



Figur B4-4. Strukturen för redovisning av resultatbearbetningar; daglig repeterbarhet, sammanställning av koordinattidsserier och skattning av stationshastigheter. I tidsserie-mapparna finns dagliga koordinatfiler; både med geocentriska karakteristiska koordinater i SWEREF 99 och med plana koordinater i SWEREF 99 18 00 samt ellipsoidhöjd. Där finns de stationsvisa koordinatfiler som ligger till grund för tidsserieplottarna.