

SKB P-23-20

ISSN 1651-4416

ID 2029843

Juni 2024

Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2022

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

© 2024 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

För att fortlöpande studera eventuella markrörelser i Forsmarksområdet, som har valts ut för slutförvar av radioaktivt avfall, har fem permanenta GNSS-stationer etablerats. Från stationerna skickas kontinuerliga observationsdata till Lantmäteriet som beräknar dagliga koordinater för stationerna.

De inledande årliga beräkningarna var främst 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. Hittills har L1-lösningen från beräkningsalternativet med regional jonosfärsmodell och skattning av troposfärsparametrar varit mest lämplig. Vid årets beräkning blev det dock tydligt att den ökande jonosfärsaktiviteten påverkar L1-lösningen negativt, varför vi valde att istället använda L3-lösningen för analys av tidsserier och hastighetsskattning. Fortfarande har beräkningsalternativet med regional jonosfärsmodell och skattning av troposfärsparametrar använts.

Vid visuell inspektion av de resulterande koordinattidsserierna för SKB-stationerna kan ses att små årstidsvariationer förekommer, liksom enstaka förekomster av snö på GNSS-antennerna. Hastigheter för SKB-stationerna har skattats utifrån drygt fyra års GNSS-observationer. 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, men det finns indikationer på att minst fem års data behövs för att kunna uppnå en standardosäkerhet på 0,5 mm/år vid hastighetsskattning i höjd. De skattade hastigheterna måste därför ännu betraktas som 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 så kallad RealSigma-metoden som dock ofta visat sig vara för optimistisk.

De största uppmätta horisontella hastigheterna relativt Kobben är 0,22 mm/år för Storskäret respektive 0,16 mm/år för Norra Biotesten. Osäkerheterna för dessa hastigheter har skattats till 0,04 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 $0,71 \pm 0,10$ mm/år för Storskäret (med täckningsfaktorn 2). Vidare har stationerna Lillkobben, Norra Biotesten och Västra Måsklinten en årstidsvariation 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 the area in Forsmark that has been chosen for final repository of radioactive waste, 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 initial yearly processings were mainly 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. Until now, the L1 solution from the processing alternative that utilizes a regional ionospheric model in combination with estimation of troposphere parameters has been the most suitable one. However, this year it became obvious that the increasing ionospheric activity has a negative impact on the L1 solution, and therefore the L3 solution was chosen for analysis of time series and velocity estimation. The same processing strategy, utilizing a regional ionospheric model and estimation of troposphere parameters, is still used.

Small annual variations can be seen in the resulting time series of the SKB stations by examining the time series visually, as well as occasional occurrences of accumulated snow covering the GNSS antennas. Velocities of the SKB stations have been estimated from just over four years of observations. It should however be stressed that the data series still are relatively short – three years is considered a minimum time span for estimating velocities with reasonable certainty, but there are indications that at least five years are required to estimate vertical velocities at a standard uncertainty of 0.5 mm/yr. The estimated velocities must therefore be regarded as 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 0,22 mm/yr for Storskäret and 0,16 mm/yr for Norra Biotesten, respectively. The velocity uncertainties have been estimated to 0,04 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 $0,71 \pm 0,10$ 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 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	Observationsdata från GNSS-stationerna	9
4.1	Tillgängliga GNSS-data	9
4.2	Val av observationer för beräkning	10
5	Beräkning av GNSS-data.....	11
5.1	Programvara och beräkningsstrategier	11
5.2	Hantering av jonosfär och troposfär.....	12
5.3	Referenssystemsanslutning	13
6	Resultat – koordinatberäkning	14
6.1	Allmänt om beräkningens kvalitet.....	14
6.2	L1- eller L3-lösning	17
6.3	Koordinattidsserier	18
6.3.1	Anslutning av L1-lösningarna till SWEREF 99 på KOB.B.0	18
6.3.2	Anslutning av L3-lösningarna till SWEREF 99 på KOB.B.0	21
6.3.3	Anslutning av L3-lösningarna till SWEREF 99 på alla stationer.....	24
6.3.4	Tidsserie för KOB.B.0.....	27
6.3.5	Koordinater från beräkning i nära realtid	29
6.4	Analys av koordinattidsserierna	32
7	Skattning av hastigheter för SKB-stationerna.....	35
7.1	Editering av indata	35
7.2	Olika alternativ för hastighetsskattning.....	36
7.2.1	Skattning av linjära hastigheter	36
7.2.2	Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för årlig variation.....	39
7.2.3	Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för års- och halvårsvariation.....	41
7.2.4	Kontroll av manuell indataeditering	44
7.3	Skattning av årstidsvariationer	45
7.3.1	Kontroll av manuell indataeditering	46
7.4	Analys av skattade hastigheter och årstidsvariationer.....	47
7.4.1	Hastigheter	47
7.4.2	Årstidsvariationer	48
7.4.3	Sammanfattning.....	48
8	Fortsatta studier	50
8.1	SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv	50
9	Referenser	51
10	Bilaga 1	53
	Översikt utrustning på GNSS-stationer	53
11	Bilaga 2.....	54
	Urklipp ur aktivitetsdagbok.....	54
12	Bilaga 3.....	56
	Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen.....	56
13	Bilaga 4.....	58
	Beskrivning av leveransen.....	58

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)
χ^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. En senare benämning är GPT1 (Global Pressure Temperature), där siffran skiljer olika versioner åt.
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
NRT	Near real-time; nära realtid
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; kvadratisk 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 referenssystem	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. Kallas ibland VMF1 för att skilja den från senare versioner.
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 Mäsklinten (VMAS.0) och Storskäret (SSKA.0).

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

Data från de permanenta GNSS-stationerna analyseras årligen. Detta är den fjärde 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. Den första analysen av SKB-nätet 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 bl.a. på resultaten från den första analysen justerades beräkningsinställningarna något inför den andra årliga analysen. I rapporten (Kempe et al. 2021) beskrivs de förändringar som gjordes.

Inför årets beräkning har inga beräkningsinställningar ändrats, utan vi har fortsatt att använda det beräkningsalternativ som valdes som huvudalternativ vid den första beräkningen, som vi valde att kalla regIONO_TROP (se vidare avsnitt 6). Utöver det har vi behållit de mindre ändringar av inställningarna som gjordes vid andra årets beräkning.

Koordinattidsserierna har granskats visuellt för att detektera eventuella problem, och baserat på tidsserierna har preliminära stationshastigheter skattats.

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 analyseras med syfte att skatta stationshastigheter och eventuella hopp (eng. *discontinuities*).

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 Kobbén, 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) samt antennkabel med tillhörande skydd. I bilaga 1 listas den specifika utrustningen på varje station.

Service och tillsyn av stationerna Lillkobben, Norra Biotesten och Västra Måsklinten har utförts under år 2022. I november 2022 byttes all strömförsörjningsutrustning ut på Västra Måsklinten och Norra Biotesten för att – i den mån det är möjligt – undvika strömbortfall under den mörkaste tiden på året.

Utdrag ur aktivitetsdagbok för åren 2018–2022 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.

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 Observationsdata från GNSS-stationerna

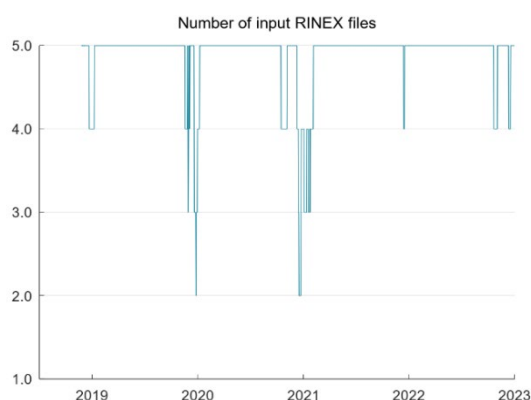
4.1 Tillgängliga GNSS-data

Här redovisas vilka data som funnits tillgängliga för analys, för hela perioden 2018–2022.

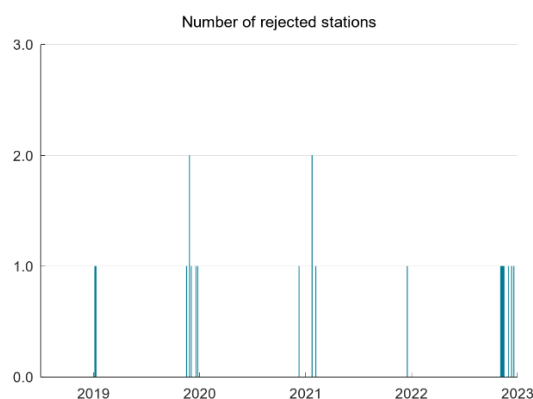
För fyra dygn i slutet av 2018 fanns observationsdata endast från KOB.B.0, varför det inte gick att genomföra beräkning av nätet dessa dagar. Utöver detta är det 150 dygn där observationsfiler från en eller flera stationer saknas; se Figur 4-1. För 30 dygn har observationsfilen för en, eller i enstaka fall två, av stationerna förkastats; se Figur 4-2. Den främsta anledningen till att en station förkastas är att observationstiden är för kort.

För LKBB.0 togs observationsfilerna för perioden 4–15 november 2022 bort. Stationens trasiga GNSS-mottagare byttes ut den 3 november, och den nya mottagaren hade dessvärre felaktiga inställningar så observationsdata var inte användbara förrän inställningarna korrigerades den 15 november.

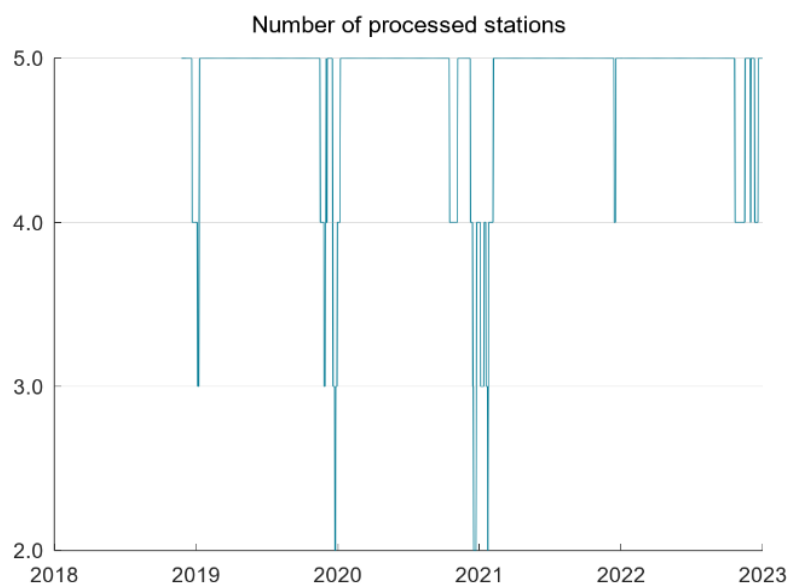
Totalt är det 174 av 1495 dygnslösningar som saknar resultat – det vill säga dagliga koordinater – för en eller flera stationer; se Figur 4-3.



Figur 4-1. Antal tillgängliga indatafiler varje dygn. För 150 dygn saknas data från en eller flera stationer.



Figur 4-2. Antal stationer per dygn som har förkastats, främst p.g.a. för korta observationsfiler. För 24 dygn har observationsfilen för en, eller i enstaka fall två, av stationerna förkastats.



Figur 4-3. Antal stationer som ingått i GNSS-beräkningen varje dygn.

4.2 Val av observationer för beräkning

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 jonosfärfri 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 från bl.a. 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 antennmodeller, för mottagarantennerna, hittills har saknat ”äkta” värden för Galileo. Vanligtvis har därför GPS L2-värdena använts 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.

Det är rimligt att börja använda Galileo när den nya versionen av ITRF (det vill säga ITRF2020) börjar användas. När en ny ITRF-realisering lanseras, så tar IGS fram en ny lista med antennmodeller, där äldre antennmodeller kan ersättas av uppdaterade modeller; till exempel har man nu infört ”äkta” värden för Galileo.

ITRF2020 lanserades våren 2022 och International GNSS Service (IGS) har nu tagit fram sin egen version av referenssystemsrealiseringen – IGS20 – liksom en uppdaterad lista över antennmodeller. IGS20 började användas för produktion av efterberäknade satellitbanor i slutet av 2022 (Masoumi 2022).

Lantmäteriet har påbörjat övergången till IGS20 för alla sina GNSS-beräkningar, men det är ett omfattande arbete som sannolikt kommer att slutföras först under 2024. Samtidigt som man går över till IGS20 är det dessutom en fördel att införa en ny version av beräkningsprogramvaran Bernese GNSS Software. SKB-beräkningen har därför ännu inte satts upp i IGS20 och den nya programversionen.

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 Kempe et al. (2021) beskrivs de förändringar av beräkningsinställningar som gjordes inför den andra beräkningen.

Vid förra beräkningen (Kempe et al. 2023) och vid denna beräkning av GNSS-nätet i Forsmark har samma beräkningsinställningar använts. Den beräkningsstrategi som inledningsvis valdes som huvudalternativ, det vill säga med regional jonosfärsmodell och skattning av troposfärsparametrar, har fortsatt att användas.

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 så kallad dubbeldifferenser. Utjämningen resulterar i dagliga koordinatfiler och dagliga filer med normalekvationer i standardformatet SINEX. Innan skattning av koordinaterna har avvikande observationer filtrerats 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 kallad final-produkter från CODE (Dach et al. 2023). Den 17 maj 2020 började man använda den uppdaterade referenssystemsrealiseringen IGB14 i stället för den tidigare IGS14. Enligt Rebischung (2020) förväntades inte bytet påverka kontinuiteten i produktserien. Beräkningen som nu gjorts berörs även av att de efterberäknade satellitbanorna började produceras i IGS20 den 27 november 2022 (Masoumi 2022). Detta referenssystemsbyte bedöms få minimal påverkan på resultatet av SKB-beräkningen, eftersom det slutliga beräkningsresultatet är anslutet till SWEREF 99 genom inpassning, baslinjerna i nätet är korta, och det dessutom endast är en kort period som berörs.

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

Indata	
GNSS-observationer	GPS/Glonass-data i RINEX-format, 30 sek-intervall
Bandata	CODE:s final-produkter
Referenssystem	IGS14/IGB14/IGS20 (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 jonsfärsfri 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

Tabell 5-1. forts.

Parametrar och modeller	
Jonosfär	a) Regional jonosfärmodell b) L3 eliminerar jonosfäreffekten
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 nätets och är en av de stationer som har mest observationsdata.

5.2 Hantering av jonosfär och troposfär

Jonosfären är ett av de atmosfärlager som har störst påverkan på GNSS-signalerna på väg mellan satellit och GNSS-mottagare. Jonosfäreffekten varierar med jordens rotation och solens aktivitet, och kan bl.a. 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) (Böhm et al. 2007) 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) (Böhm et al. 2006) 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. P.g.a. detta har troposfärparametrarna skattats relativt en referensstation; i detta fall KOB0.0.

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/IGS20, eftersom det är referenssystemet som satellitbanorna levereras i. 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 (det vill säga referenssystemet representerar landets form sommaren 1999). Normalt görs därför en landhöjningskorrektur av IGS14/IGb14/IGS20-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 bl.a. orsakas av landhöjningen, så har ingen landhöjningskorrektur 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 (se Tabell 5-2) kommer att synas som rörelser.

De slutliga lösningarna har transformerats till SWEREF 99 genom att göra en translation på KOB0.0 till de så kallad definitiva SWEREF 99-koordinaterna (Alfredsson et al. 2019).

Tabell 5-2. Hastigheter för SKB-stationerna, ur hastighetsmodellen NKG_RF17vel, relativt KOB0.0.

Enhet: mm/år.

Station	vN	vE	vU
LKBB.0	0,00	0,00	0,00
NBIO.0	0,00	-0,01	0,05
SSKA.0	-0,01	0,01	-0,05
VMAS.0	-0,01	0,01	-0,02

6 Resultat – koordinatberäkning

Vid de första årliga beräkningarna av SKB-nätet i Forsmark utvärderades flera olika beräkningsalternativ med hjälp av bl.a. parametrarna i avsnitt 6.1. Som huvudlösning valdes då alternativet med regional jonosfärsmodell för att hantera jonosfärsfördröjningen och skattning av troposfärsparametrar för att hantera troposfärsfördröjningen. Vid följande beräkningar har valet av lösning stått fast; i rapporten kallad regIONO_TROP.

Vid den beräkning som nu har genomförts, har endast 2022 års GNSS-observationer beräknats. De har räknats med samma beräkningsinställningar som tidigare års data, varför data från åren 2018–2021 inte har behövt räknas om på nytt. Här redovisas dock de sammantagna beräkningsresultaten för hela perioden 2018–2022.

6.1 Allmänt om beräkningens kvalitet

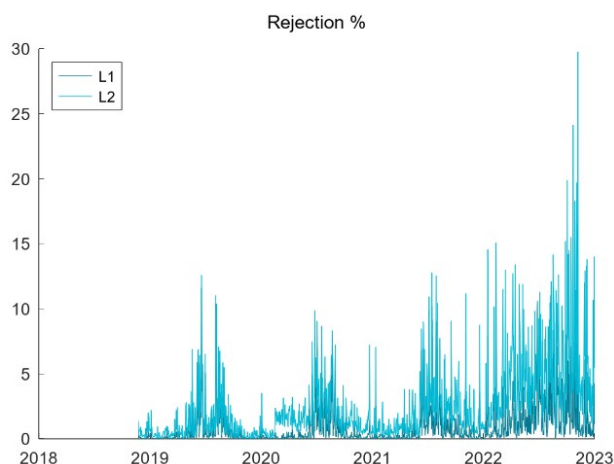
Beräkningens interna kvalitet kan bedömas genom bl.a. andelen observationer som förkastats i datascreeningen, andelen lösta periodobekanta, RMS för de dagliga lösningarna och repeterbarheten för de dagliga lösningarna.

Andelen förkastade observationer i de dagliga beräkningarna varierar över året, men är överlag liten; i genomsnitt mindre än 1 % för L1 och 3 % för L2; se Tabell 6-1. Figur 6-1 visar att andelen förkastade observationer oftast är under 7-8 % per dag i början av perioden. Under 2021, men framför allt under 2022, ses tydligt att andelen förkastade observationer ökat. Det beror med stor sannolikhet på att jonosfärsaktiviteten ökat i och med att solfläckscykeln går mot sitt maximum. När nästa solfläcksmaximum kommer att inträffa är något osäkert, men beräknas av NOAA (2023) till omkring 2025.

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

Enhet: %

regIONO_TROP		
	medel	0.96
L1	max	16.46
	min	0.00
	medel	2.53
L2	max	29.78
	min	0.03



Figur 6-1. Andelen förkastade observationer varierar över året och ökar dessutom generellt i slutet av den analyserade perioden.

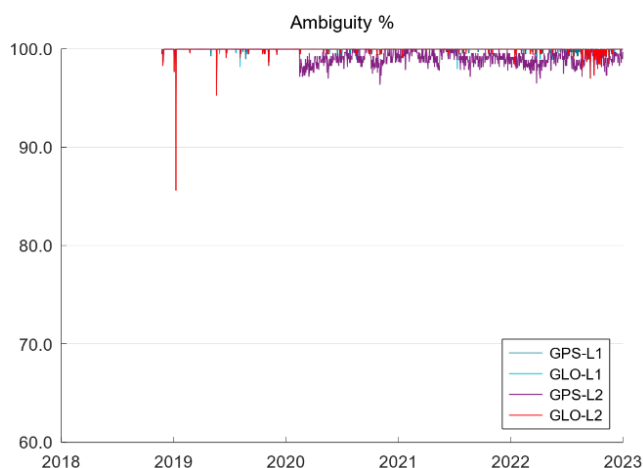
Tabell 6-2 redovisar genomsnittlig, högsta och lägsta andel lösta periodobekanta i de dagliga lösningarna. I Figur 6-2 ses att andelen lösta periodobekanta för GPS L2 sjunker något i början av 2020, närmare bestämt den 14 februari. I Figur 6-1 syns en ökning av andelen förkastade L2-data vid samma tidpunkt. Det sammanfaller med tidpunkten för en förändring av signalstyrkan från nyare generationers GPS-satelliter (Steigenberger et al. 2020). Mottagartypen som då användes på alla GNSS-stationer i Forsmark – Trimble NetR9 – har sedan dess ett ökat antal så kallad 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 denna förändring av GPS L2 ingen påverkan på slutresultatet – de dagliga koordinaterna – eftersom mättiderna är långa och andelen lösta periodobekanta fortfarande kan betraktas som hög efter förändringen.

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

Enhet: %

regIONO_TROP		
	medel	99.94
L1	max	100.0
	min	88.1
	medel	99.58
L2	max	100.0
	min	88.3



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

Tabell 6-3 visar att de genomsnittliga RMS-värdena i slutlösningarna har ökat något sedan den föregående beräkningen (Kempe et al. 2023). I Figur 6-3 syns att nivån på RMS-värdena för L1- och L2-lösningarna har ökat särskilt under 2022, och har större spridning än tidigare under den analyserade perioden. L3-lösningarnas RMS-värden ligger kvar på samma nivå som tidigare, vilket talar för att det är den ökade jonosfärsaktiviteten som påverkar L1- och L2-lösningarnas kvalitet.

Repeterbarheten för de dagliga lösningarna, som visas i Figur 6-4, anger vilken precision lösningarna håller. För L1- och L2-lösningarna är den något sämre för N- och E-komponenterna än tidigare år, vilket också tyder på att den ökade jonosfärsaktiviteten har påverkat slutresultatets kvalitet.

Repeterbarheten för U-komponenten i alla lösningar – även L3-lösningen – är också lägre än tidigare år. En bidragande orsak till detta är att det troligen samlades snö på flera av antennerna i slutet av 2022, vilket kan ses i tidsserierna i avsnitt 6.3.1 till 6.3.3.

Tabell 6-3. RMS i slutlösningarna. I högra kolumnen visas motsvarande värden från föregående årlig beräkning.

Enhet: mm

		2022	2021
L1	medel	1,44	1,34
	max	3,0	2,4
	min	0,9	0,9
L2	medel	1,78	1,64
	max	3,3	2,9
	min	1,0	1,0
L3	medel	0,77	0,76
	max	1,2	1,2
	min	0,6	0,6

Tabell 6-4. Daglig repeterbarhet, uttryckt som RMS. Till höger visas motsvarande värden från föregående årlig beräkning.

Enhet: mm

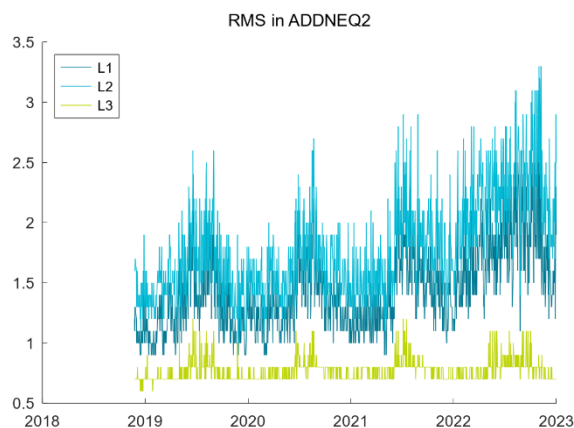
		2022	2021
	N	0,77	0,70
L1	E	0,38	0,35
	U	1,25	0,94
	N	0,95	0,82
L2	E	0,44	0,38
	U	1,45	1,07
	N	0,66	0,65
L3	E	0,44	0,42
	U	1,29	1,11

6.2 L1- eller L3-lösning

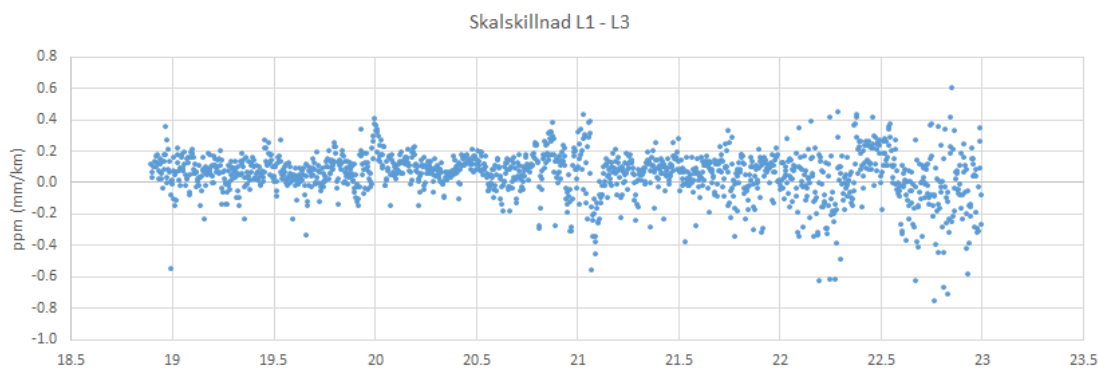
SKB-nätet är uppbyggt endast av korta baslinjer – som mest ca 7,5 km mellan NBIO.0 och SSKA.0 – vilket normalt talar för att använda L1-lösningar.

L3 är en linjärkombination som eliminerar jonosfäreffekten och vanligtvis används 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. Precisionen för L1- och L3-lösningarna är alltså fortfarande i stort sett likvärdig totalt sett (se Figur 6-4), men eftersom L1-lösningen har degraderats något sedan förra årets beräkning och det dessutom är tydligt att bruset är högre i den senare delen av koordinattidsserierna (se avsnitt 6.3.1), så blir det intressant att titta närmare på L3-lösningen.

De dagliga L1- och L3-lösningarna jämfördes genom Helmert-transformationer där fyra parametrar – tre translationer och skala – löstes. Den genomsnittliga skalskillnaden är liten – 0,05 ppm – men Figur 6-4 visar att skalskillnaden varierar betydligt mer i slutet än i början av perioden. Orsaken till de ökade skalskillnaderna är sannolikt den ökade jonosfärsaktiviteten som ger varierande skalfel i L1-lösningen.



Figur 6-3. RMS, uttryckt i mm, för L1-, L2- respektive L3-lösningarna i de dagliga beräkningarna.



Figur 6-4. Jämförelse av nätets skala i de dagliga L1- och L3-lösningarna (L1 minus L3) genom Helmert-transformationer där fyra parametrar lösts. Skalan på den horisontella axeln är decimala år efter år 2000.

Motsvarande jämförelse för den inledande perioden, t.o.m. 2020, gjordes i Kempe et al. (2021) och den genomsnittliga skalskillnaden var då 0,07 ppm.

Vi har alltså flera faktorer som tillsammans talar för att L3-lösningen bör betraktas som huvudlösning från denna årliga beräkning:

- Ökat brus i den senare delen av koordinattidsserierna som bygger på L1-lösningen; se avsnitt 6.3.1.
- Skalskillnaden mellan L1- och L3-lösningen varierar mer i den senare delen av perioden.
- Precisionen – repeterbarheten – för L1-lösningen har totalt sett försämrats något i plan, och är nu jämförbar med L3-lösningens repeterbarhet, som fortfarande är jämförbar med tidigare årliga beräkningar.

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.

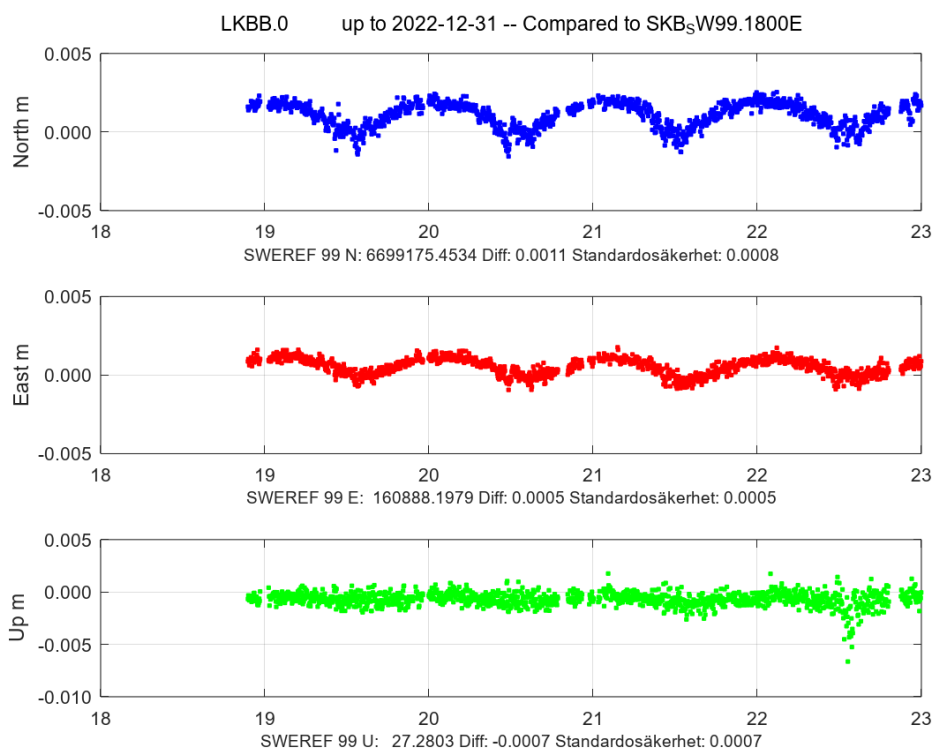
Tidsserierna i avsnitt 6.3 visar variationerna i de dagliga koordinatlösningarna, i förhållande till stationernas så kallade definitiva SWEREF 99-koordinater (Alfredsson et al. 2019). Eftersom de definitiva koordinaterna är beräknade med delvis andra beräkningsstrategier – till exempel är beräkningen ansluten till SWEREF 99 på annat sätt – så kommer tidsserierna inte alltid att vara centrerade kring noll. Tidsserierna från L3-lösningarna är överlag centrerade närmare noll än vad L1-lösningarna är. Det beror på att beräkningen av de definitiva SWEREF 99-koordinaterna också görs med L3-lösning, och koordinaterna från L3-lösningarna vid beräkningen av SKB-nätet är därför mer lik de definitiva koordinaterna.

6.3.1 Anslutning av L1-lösningarna till SWEREF 99 på KOB.B.0

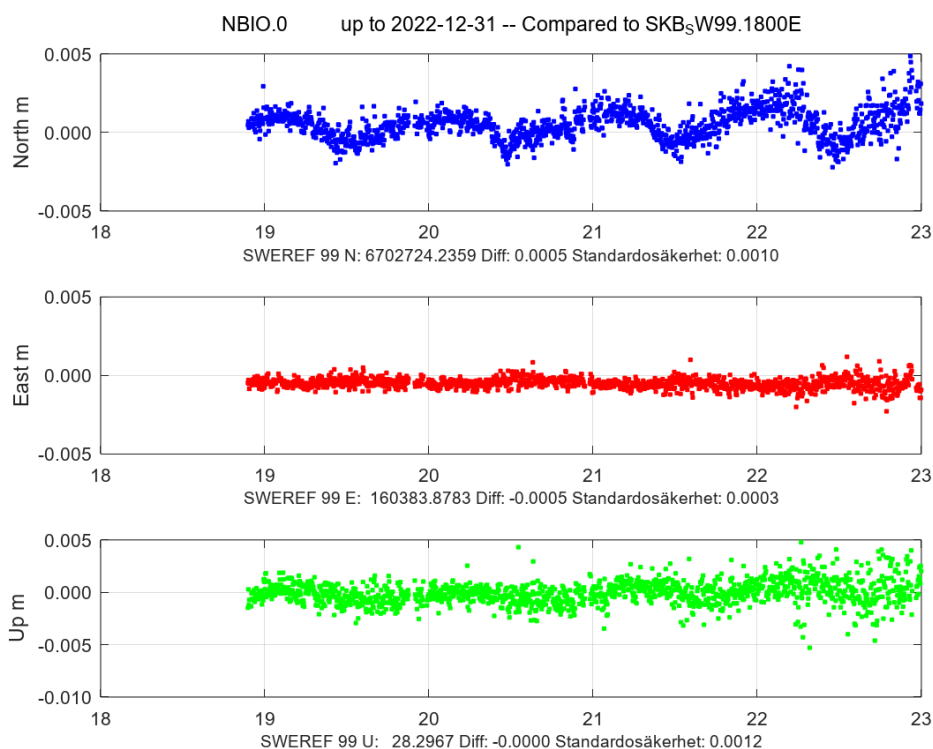
Eftersom L1-lösningen hittills har betraktats som huvudlösning vid de årliga beräkningarna av SKB-nätet så var det naturligt att även vid årets beräkning börja med att plotta koordinattidsserier baserade på L1-lösningen.

Koordinatlösningarna är anslutna till SWEREF 99 genom translation – det vill säga Helmert-transformation där tre translationer lösts – på KOB.B.0. Det innebär att koordinattidsserien för KOB.B.0 inte är relevant att redovisa eftersom stationen i praktiken har hållits fast i anslutningen. Koordinattidsserier för de övriga stationerna visas i Figur 6-5 till Figur 6-9.

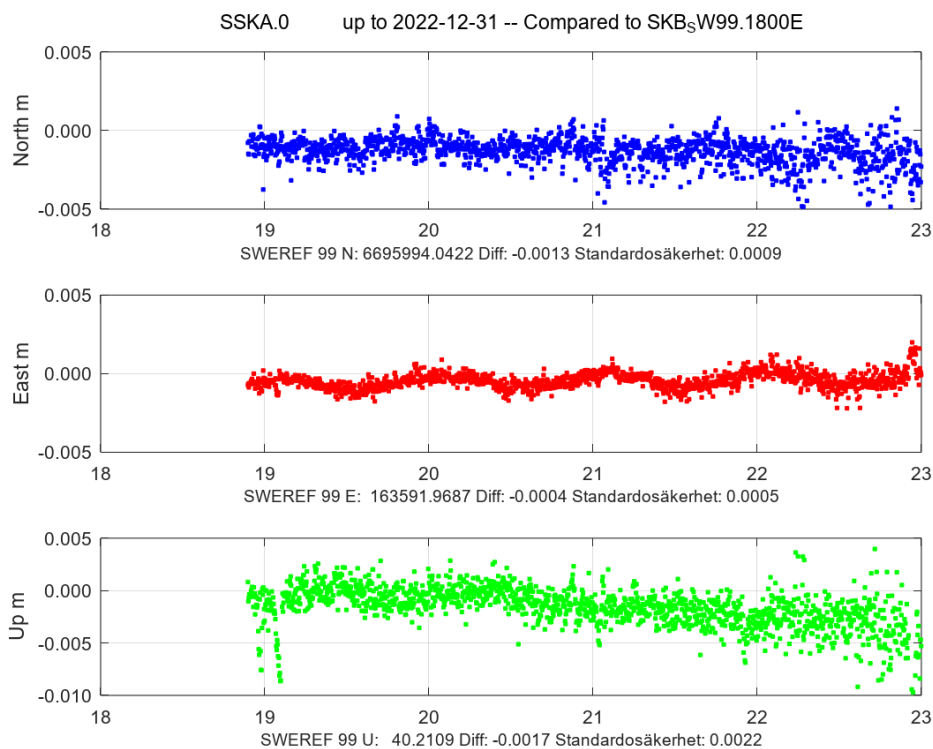
De vertikala skalorna i diagrammen är valda som en kompromiss mellan att redovisa alla enskilda dagliga lösningar och att tydligt redovisa de företeelser och avvikelser som behöver beskrivas. Det innebär att ett fåtal större avvikelser inte redovisas i diagrammen; se resp. figurtext.



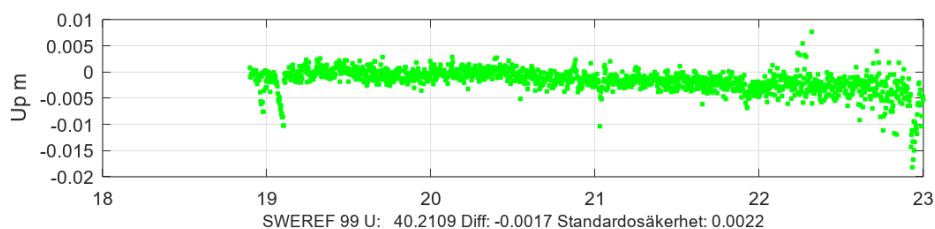
Figur 6-5. Koordinattidsserie för LKBB.0 relativt KOB.0, baserad på koordinater från L1-lösningen. Skalan på de horisontella axlarna är år efter år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0.



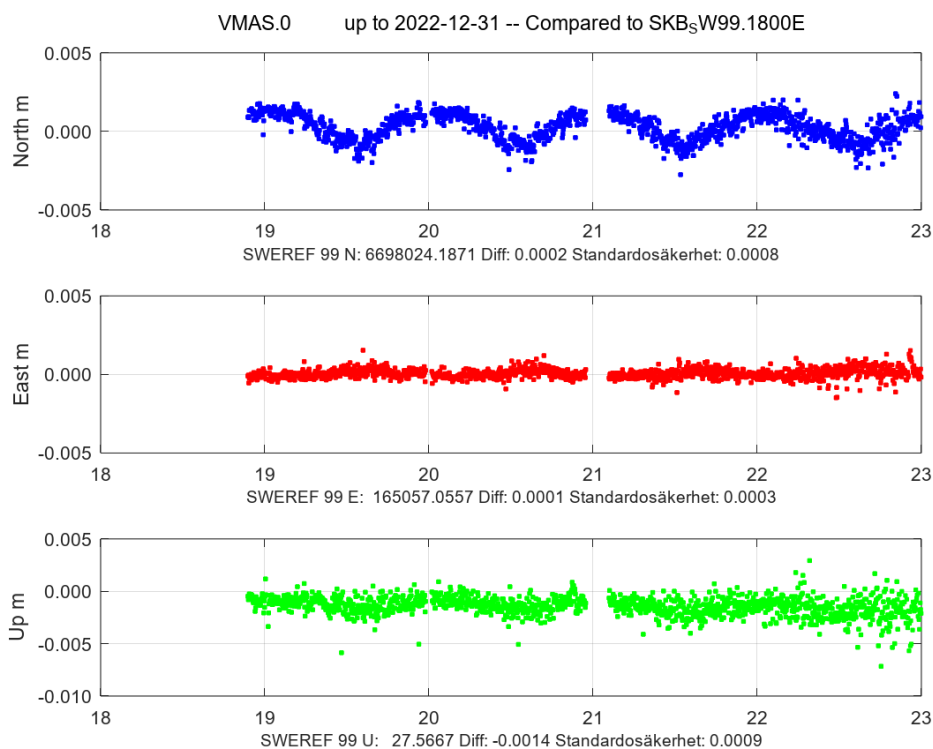
Figur 6-6. Koordinattidsserie för NBIO.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB. Det är någon enstaka daglig lösning som inte visas i diagrammet för N-komponenten eftersom värdet ligger mellan 0,005 och 0,006 m. På samma sätt är det några få lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,008 m.



Figur 6-7. Koordinattidsserie för SSKA.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0. Det är någon enstaka daglig lösning som inte visas i diagrammet för N-komponenten eftersom värdet ligger mellan -0,005 och -0,006 m. På samma sätt är det några få lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,010 m. Omkring årsskiftet 2018–2019 och i slutet av 2022 samlades snö på antennen, vilket gav ett antal avvikande dagliga koordinater i främst U-komponenten. Se vidare Figur 6-8 för redovisning av alla lösningar; även de som har värden mellan -0,010 och -0,025 m.



Figur 6-8. I diagrammet för U-komponenten för SSKA.0 i Figur 6-7 ryms inte alla dagliga koordinatlösningar med den skala som valts. Här redovisas tidsserien i U-komponenten med anpassad vertikal skala för att redovisa även de avvikande värdena i samband med att snö samlades på antennen omkring årsskiftet 2018–2019 och i slutet av 2022.



Figur 6-9. Koordinattidsserie för VMAS.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0.

Under sommaren 2022 är tidsserien för LKBB.0 brusigare i U-komponenten än tidigare somrar; se Figur 6-5. Vi har inte kunnat hitta någon orsak till detta.

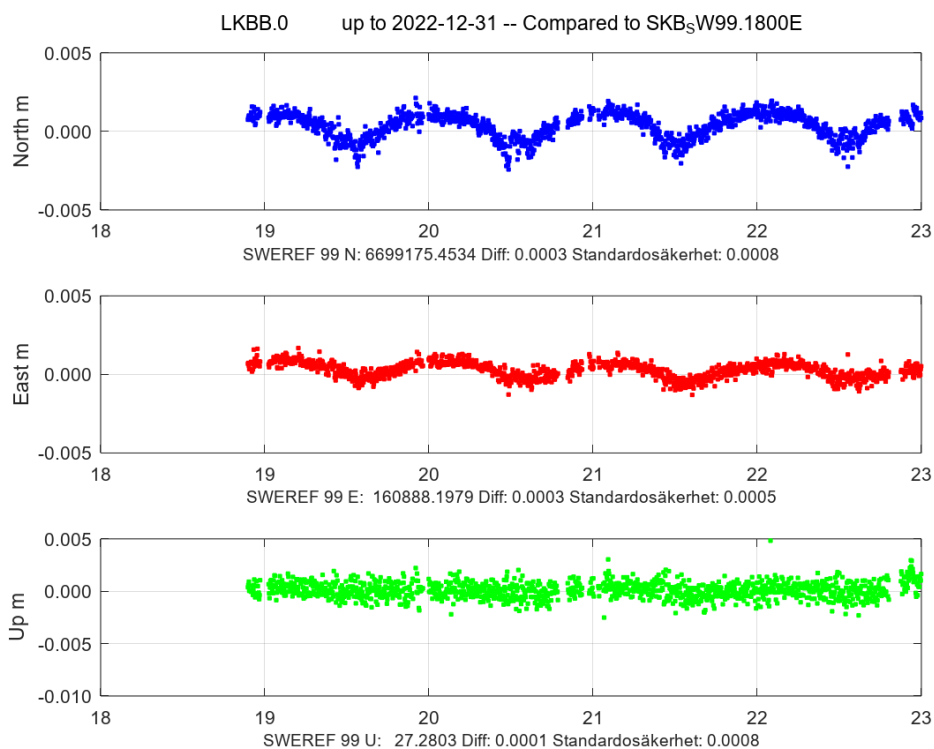
Under december 2022 samlades troligen snö på flera av antennerna, vilket ger effekter i form av mindre eller större koordinatavvikelse, beroende på hur mycket snö som samlats och om den är symmetriskt formad eller inte. Den ökade jonofärsaktiviteten kan också ha bidragit till koordinatavvikelse. Framför allt i Figur 6-6 till Figur 6-9 ser man att bruset i koordinattidsserierna ökar mot slutet av den analyserade perioden.

Med stöd av dessa koordinattidsserier, och de kvalitetsmått som presenterats i avsnitt 6.1 och 6.2 beslutade vi att istället använda L3-lösningen som huvudlösning, med anledning av den ökade jonofärsaktiviteten.

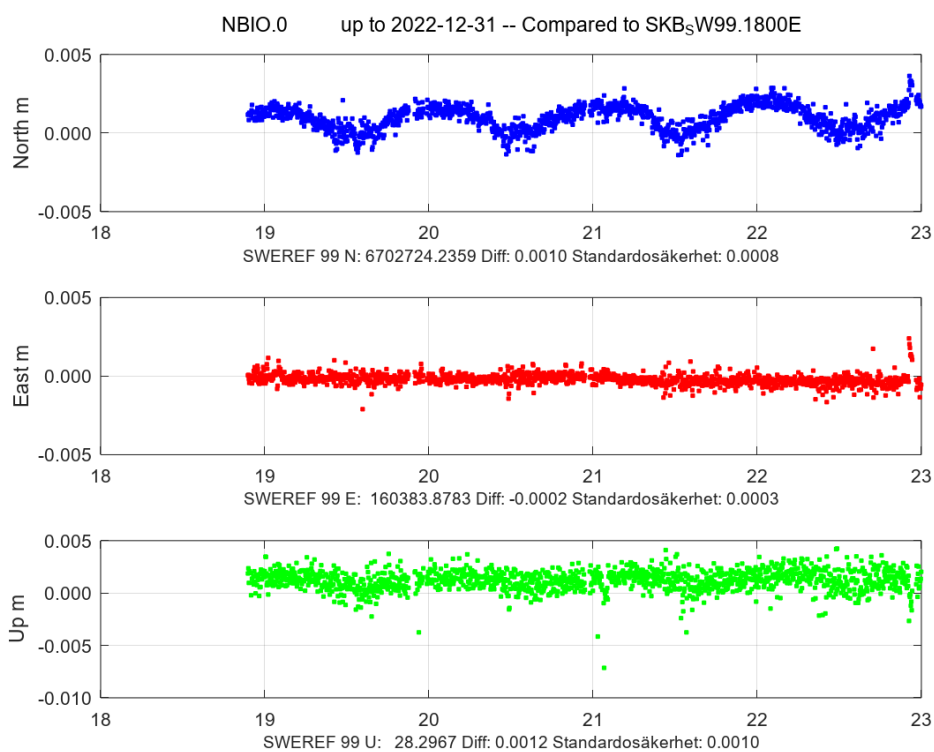
6.3.2 Anslutning av L3-lösningarna till SWEREF 99 på KOB.0

Från årets beräkning kommer L3-lösningen att betraktas som huvudlösning, och det är alltså den som ligger till grund för de skattade hastigheterna för SKB-stationerna; se vidare avsnitt 7.

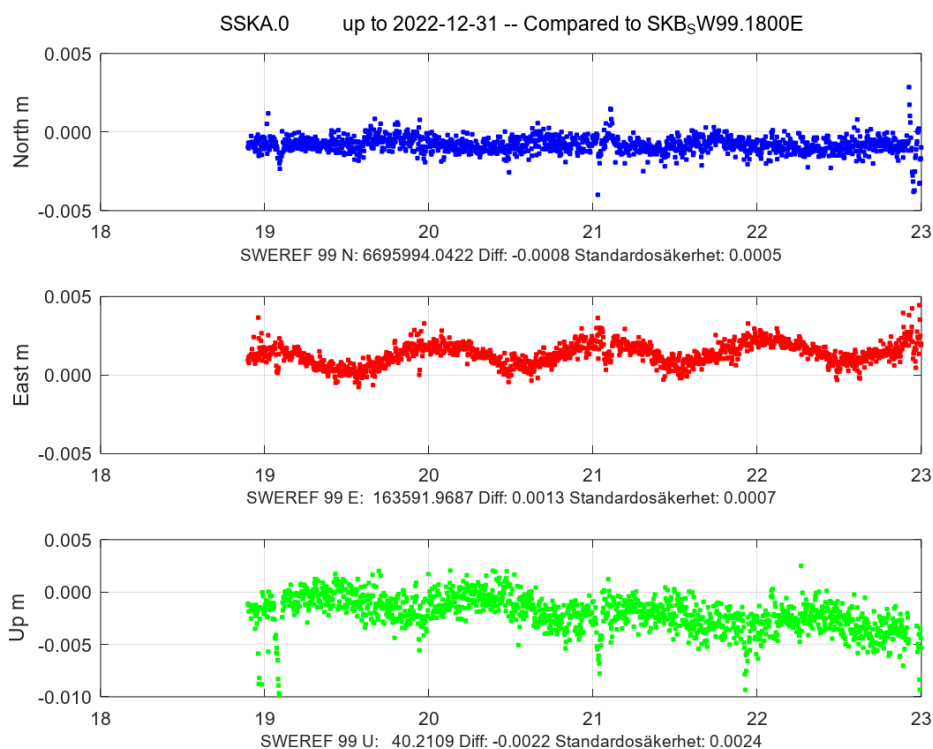
L3-lösningarna är anslutna till SWEREF 99 på samma sätt som L1-lösningarna, det vill säga genom translation på KOB.0. Koordinattidsserier för SKB-stationerna – utom KOB.0 – visas i Figur 6-10 till Figur 6-14.



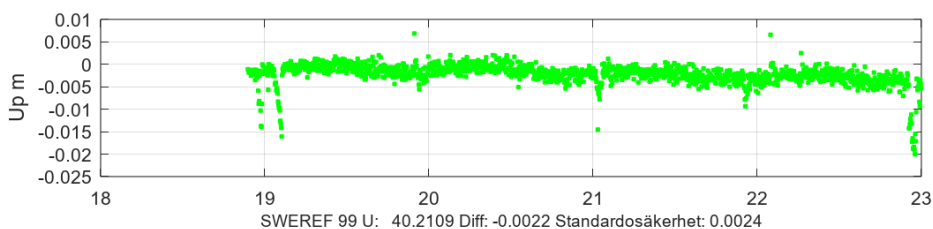
Figur 6-10. Koordinattidsserie för LKBB.0 relativt KOB.0, baserad på koordinater från L3-lösningen. Skalan på de horisontella axlarna är år efter år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0.



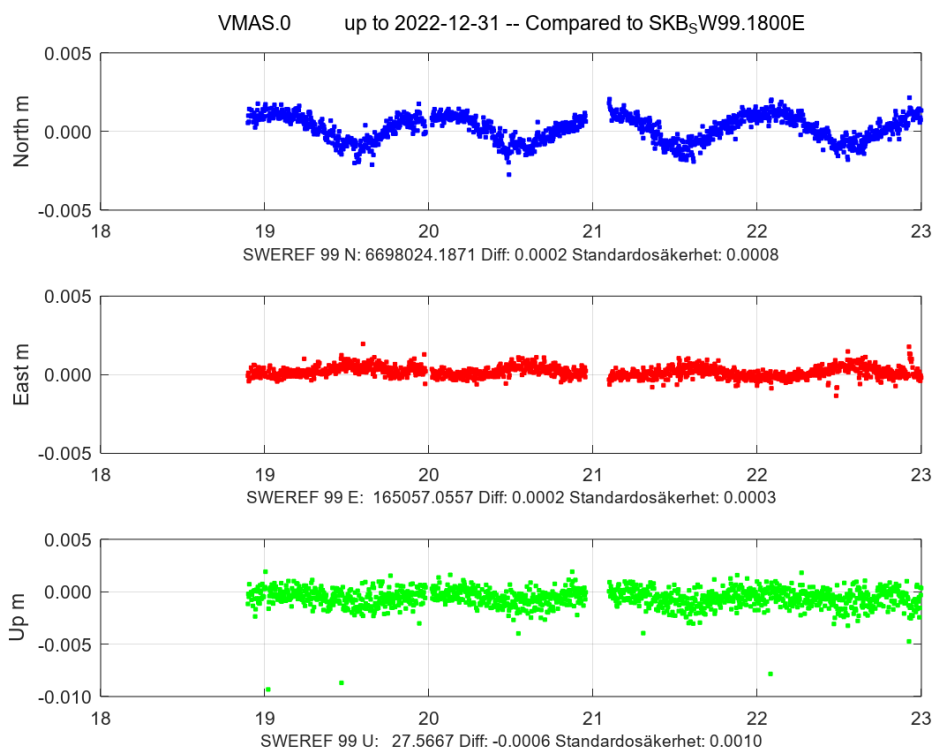
Figur 6-11. Koordinattidsserie för NBIO.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB. Det är några få dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,010 m.



Figur 6-12. Koordinattidsserie för SSKA.0 relativt KOB.B.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.B.0. Det är ett par dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,010 m. Omkring årsskiftet 2018–2019 och i slutet av 2022 samlades snö på antennen, vilket gav avvikande koordinater i främst U-komponenten. Se vidare Figur 6-13 för redovisning av alla lösningar; även de som har värden mellan -0,010 och -0,025 m.



Figur 6-13. I diagrammet för U-komponenten för SSKA.0 i Figur 6-12 ryms inte alla dagliga koordinatlösningar med den skala som valts. Här redovisas tidsserien i U-komponenten med anpassad vertikal skala för att redovisa även de avvikande koordinaterna i samband med att snö samlades på antennen omkring årsskiftet 2018–2019 och i slutet av 2022.



Figur 6-14. Koordinattidsserie för VMAS.0 relativt KOB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.0. Det är ett par dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,010 m respektive mellan -0,010 och -0,015 m.

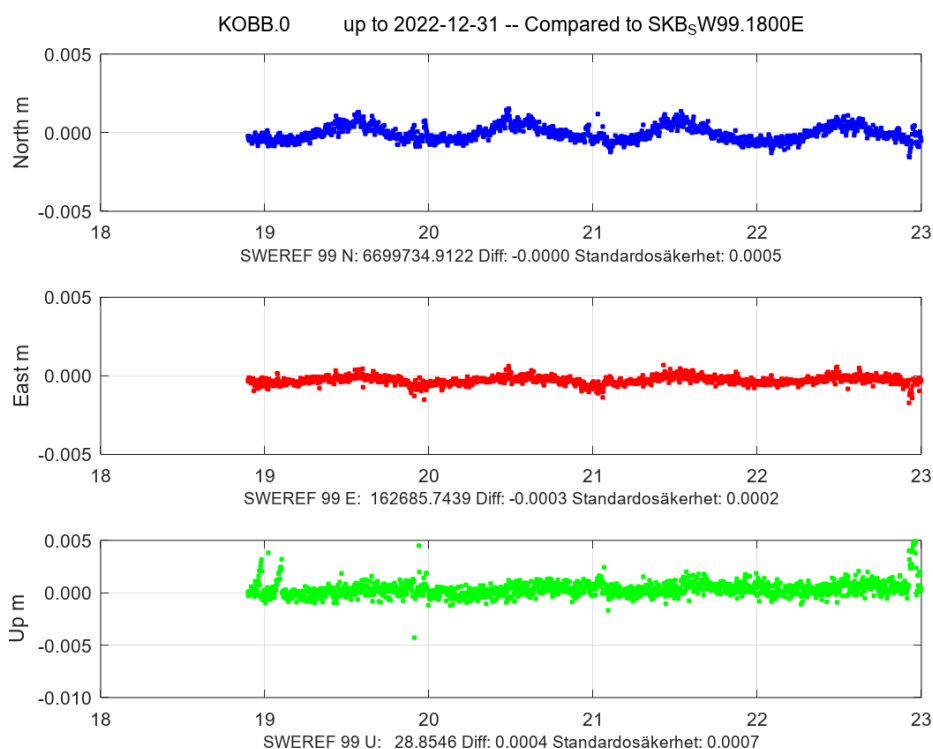
Jonosfärsfördröjningen hanteras bättre i L3-lösningarna än jonosfärsmodellen i L1-lösningen, vilket gör att tidsseriernas senare delar är mindre brusiga än i motsvarande tidsserier från L1-lösningarna. Å andra sidan förstärks vissa avvikelser (störningar) vid användning av L3, så att de framträder tydligare i tidsserierna. Det gäller till exempel den snö som samlades på antennerna under december 2022 och resulterade i koordinatavvikelser.

I något fall är årstidsvariationen i tidsserien tydligare i L3-tidsserien än i L1-tidsserien, till exempel för E-komponenten i tidsserien för SSKA.0. Det bör dock inte spela någon roll för skattningen av stationernas hastigheter över tid, eftersom vi även löser årstidsvariationer.

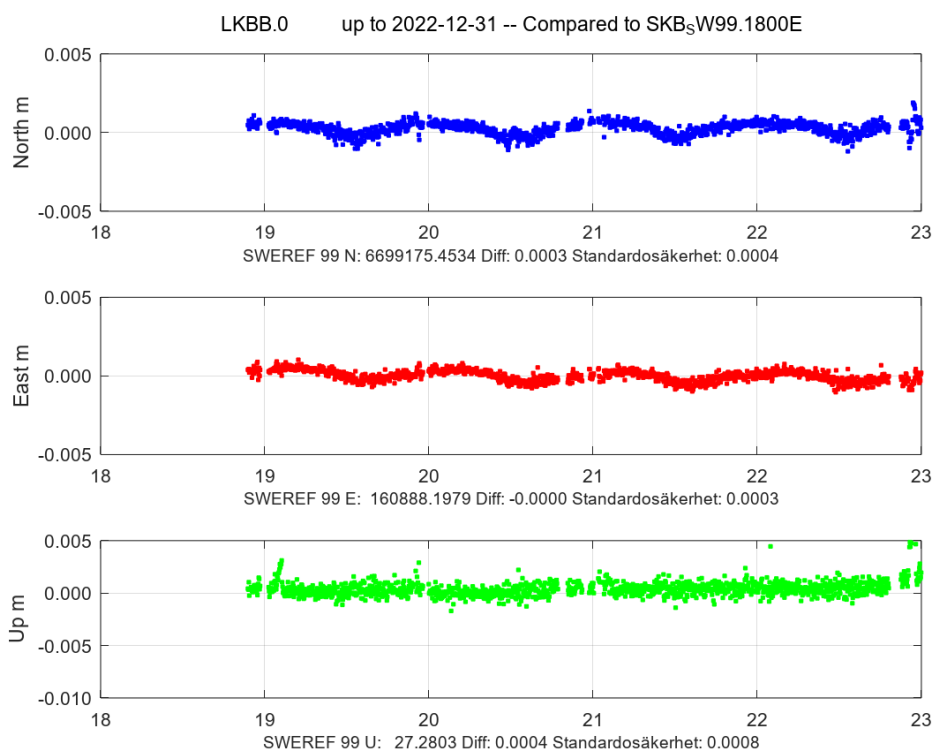
6.3.3 Anslutning av L3-lösningarna till SWEREF 99 på alla stationer

För att få information om KOB.0 gjordes även en alternativ anslutning av de dagliga L3-lösningarna till SWEREF 99, baserad på alla tillgängliga stationer. Även denna anslutning är en Helmert-transformation med tre translationer. Koordinattidsserier för alla stationer visas i Figur 6-15 till Figur 6-20.

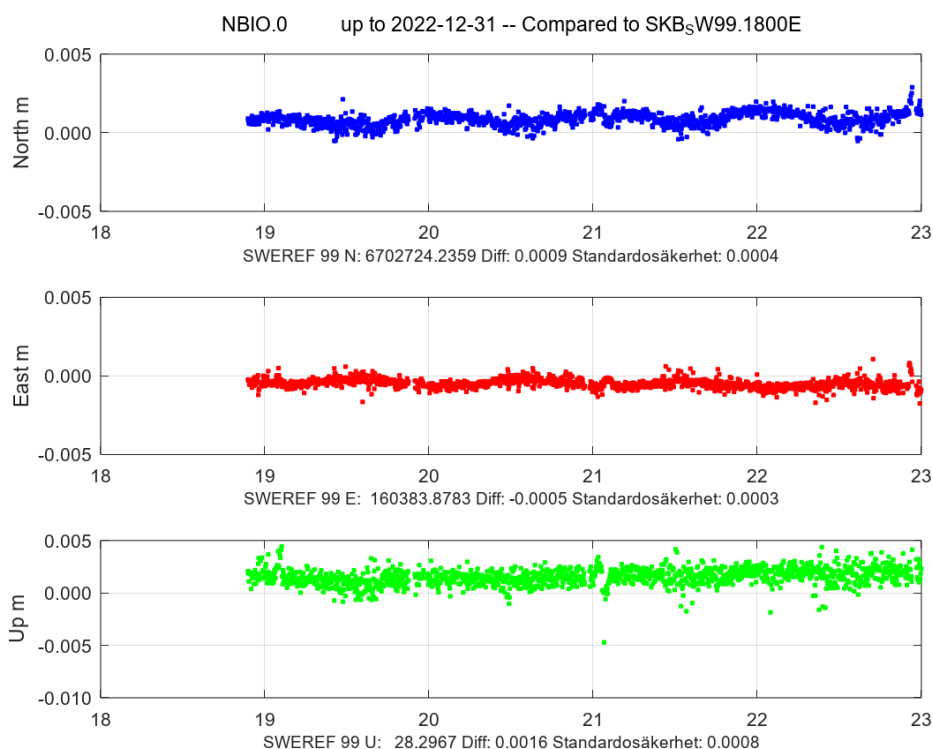
En nackdel med detta angreppssätt – när så få stationer ingår i nätet – är att avvikelser i enskilda stationer som ska fördelas över nätet, ger relativt stor effekt på övriga stationer. Effekten på de övriga stationerna blir dock mindre än den ursprungliga avvikelsen, och har motsatt tecken.



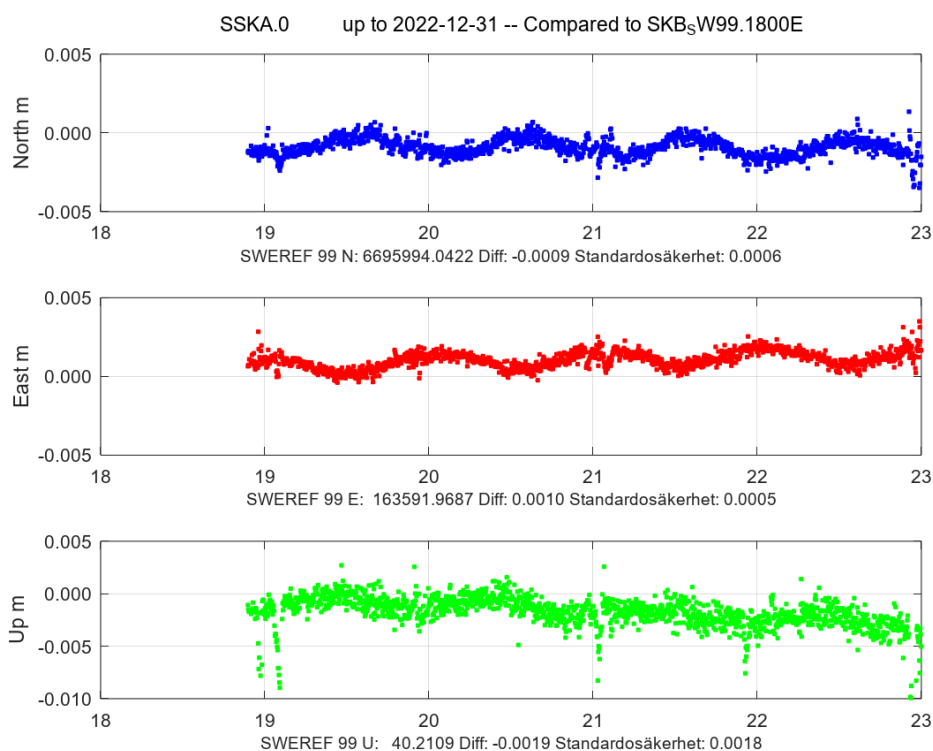
Figur 6-15. Koordinattidsserie för KOBB.0, baserad på koordinater från L3-lösningen. Skalan på de horisontella axlarna är år efter år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla tillgängliga stationer. Det är någon enstaka daglig lösning som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,007 m.



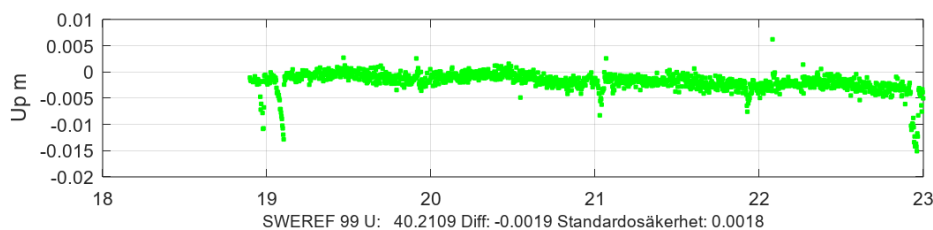
Figur 6-16. Koordinattidsserie för LKBB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla tillgängliga stationer. Det är några få dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,007 m.



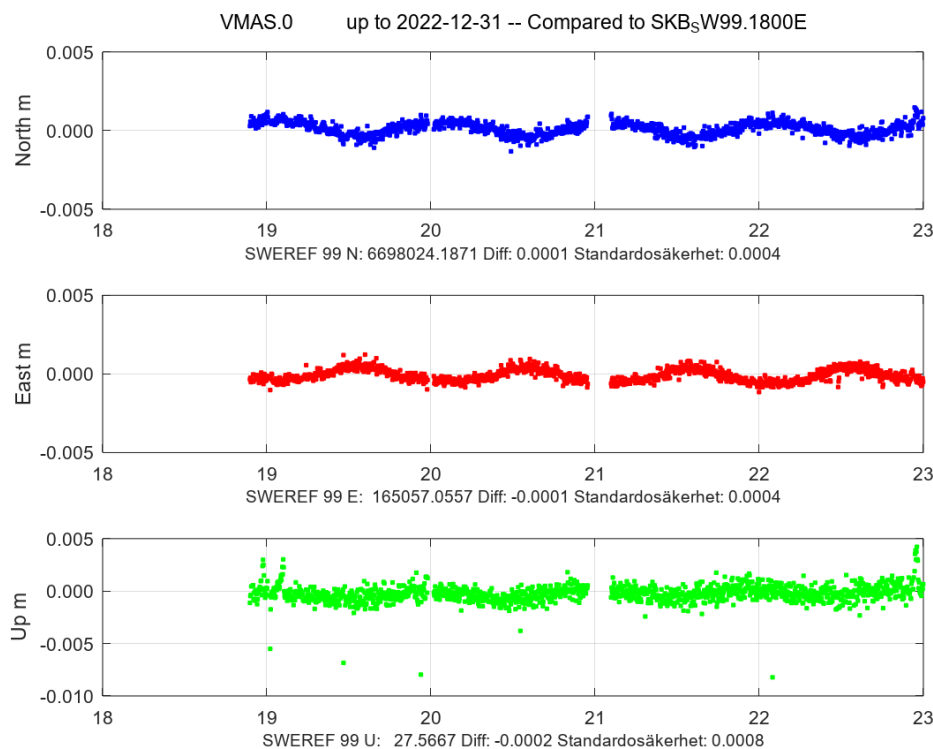
Figur 6-17. Koordinattidsserie för NBIO.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla tillgängliga stationer. Det är några enstaka dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,008 m.



Figur 6-18. Koordinattidsserien för SSKA.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla tillgängliga stationer. Det är ett antal dagliga lösningar som inte visas i diagrammet för U-komponenten eftersom värdena ligger mellan 0,005 och 0,007 m resp. mellan -0,010 och 0,020 m; se vidare Figur 6-19.



Figur 6-19. I diagrammet för U-komponenten för SSKA.0 i Figur 6-18 ryms inte alla dagliga koordinatlösningar med den skala som valts. Här redovisas tidsserien i U-komponenten med anpassad vertikal skala för att inkludera även de avvikande värdena i samband med att snö samlats på antennen.



Figur 6-20. Koordinattidsserie för VMAS.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla tillgängliga stationer.

I Figur 6-15 till Figur 6-16 ses att effekten av den ackumulerade snön på SSKA.0 vid årsskiftet 2018–2019 har fördelats ut mellan stationerna i nätet och ger påverkan på tidsserierna i U-komponenten för de övriga stationerna, i något varierande grad. Effekten av snön i slutet av 2022, som ju samlades främst på SSKA.0 och påverkade U-komponenten i första hand, har också fördelats ut mellan stationerna och påverkar tidsserierna för övriga stationer. Snöns påverkan på plankomponenterna – som ju flera stationer drabbades av – har också fördelats ut något mellan stationerna.

Figur 6-15 visar att N-komponenten för KOB.0 skulle 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 främst 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.

6.3.4 Tidsserie för KOB.0

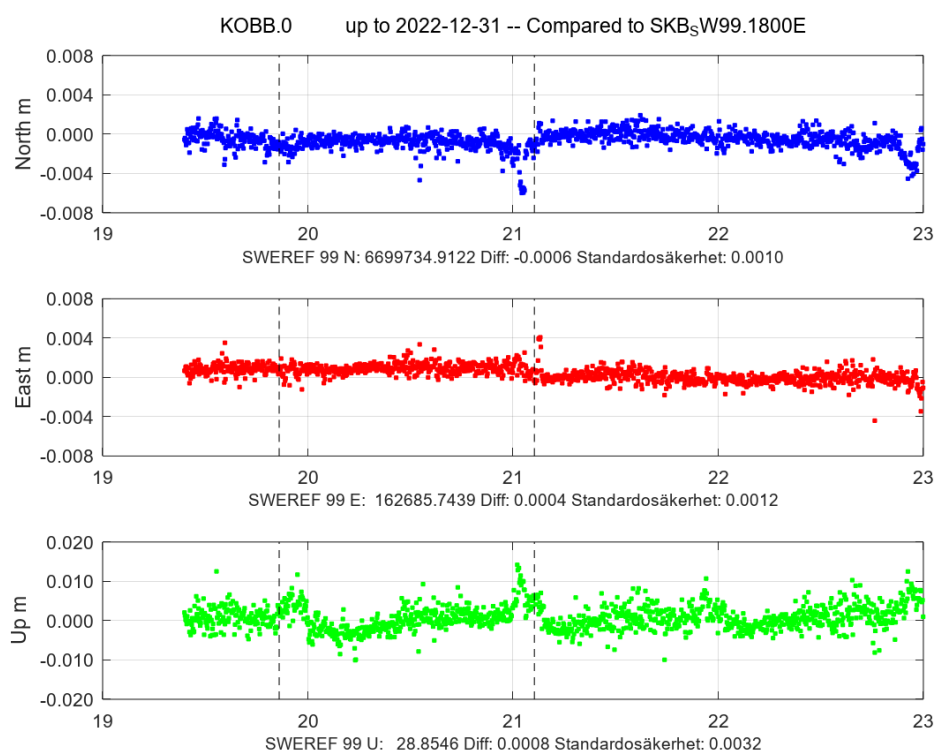
Ytterligare information om stabiliteten för KOB.0 kan fås från andra beräkningar av Swepos-nätet, som Lantmäteriet löpande gör. På sikt kommer motsvarande information om KOB.0 att kunna hämtas från det GNSS-nät som beräknas och analyseras av Nordiska kommissionen för geodesi (NKG); se vidare avsnitt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

För att få en motsvarande bild av KOB.B.0, som av de andra SKB-stationerna, 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.o.m. 26 maj 2019, och den tillgängliga tidsserien omfattar därför drygt tre och ett halvt år, till slutet av 2022.

L3-lösning används även i Swepos veckoberäkning, men baslinjerna i nätet är längre än i SKB-nätet och därför kan vi förvänta oss att tidsserien för KOB.B.0 är något brusigare än de tidsserier för SKB-nätet som presenterats i avsnitt 6.3.2 och 6.3.3. I Figur 6-21 ser vi också att det stämmer, eftersom de vertikala skalorna har behövt anpassas (jämfört med tidsserierna i avsnitt 6.3.1 till 6.3.3) för att kunna redovisa data på ett bra sätt.

Tidsserien indikerar att KOB.B.0 är stabil i SWEREF 99. Vi ser att snö sannolikt har samlats på antennen under flera av vintrarna, vilket påverkar främst U-komponenten men i vissa fall även plankomponenterna. Man kan också ana att bruset i tidsserien, särskilt i U-komponenten, något högre sommartid än övriga delar av året.



Figur 6-21. 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. Trots att skalan är något anpassad är det ändå någon enstaka lösning som inte syns i diagrammen för N- och E-komponenterna, eftersom de ligger omkring -0,015 m resp. 0,035 m.)

De streckade vertikala linjerna visar tidpunkter när beräkningsinställningarna har ändrats. Sådana ändringar kan orsaka hopp i tidsserierna.

6.3.5 Koordinater från beräkning i nära realtid

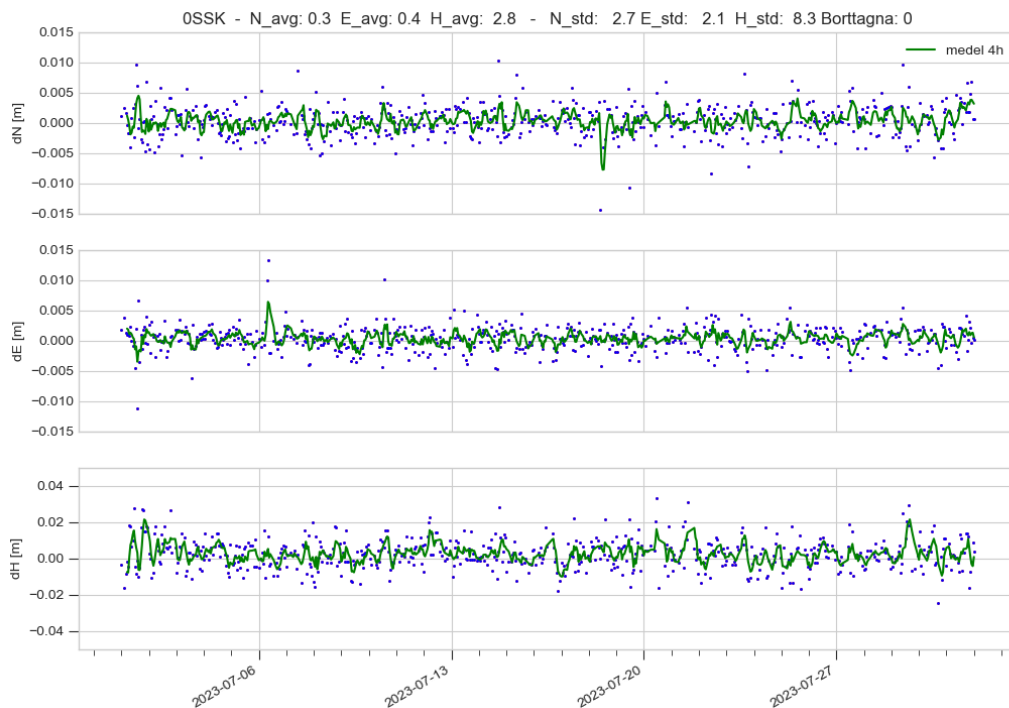
Som en del i att övervaka kvaliteten på data från Swepos-stationerna, görs sedan ett par år tillbaka en beräkning av GNSS-observationsdata i nära realtid, så kallad NRT-beräkning (Kempe et al. 2022). Varje timme beräknas koordinater för alla ingående Swepos-stationer, baserat på den senaste timmens GNSS-observationer. För att lösa periodobekanta används dock data från de senaste fyra timmarna.

I beräkningen ingår främst de stationer som levererar data till Swepos realtidstjänster. Därför ingår endast SSKA.0 av SKB-stationerna.

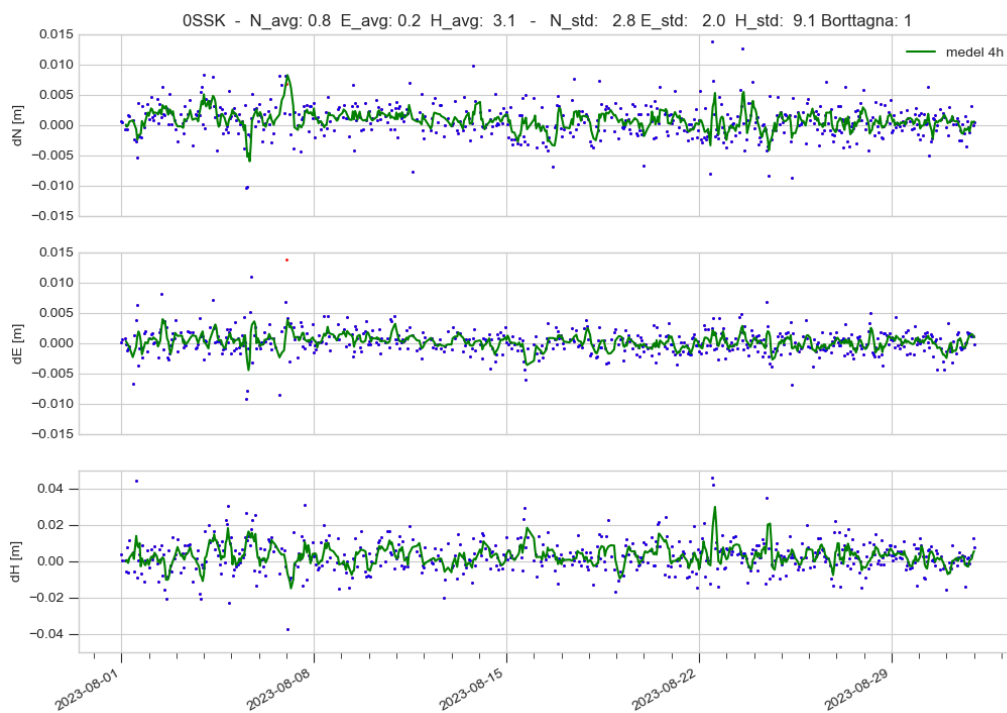
NRT-beräkningen ger en kvalitetskontroll med hög noggrannhet och upplösning, och kort fördröjning. Med hjälp av dessa tidsserier kan man bl.a. upptäcka och analysera periodiska variationer över dygnet. I Figur 6-22 till Figur 6-24 visas NRT-tidsserierna för SSKA.0 sommaren 2023.



Figur 6-22. Koordinattidsserie för SSKA.0 från NRT-beräkning av Swepos-nätet, juni 2023. Varje blå prick motsvarar koordinaten från beräkningen av en timmes GNSS-observationer. De gröna linjerna visar glidande medelvärden för de senaste fyra timmarna.



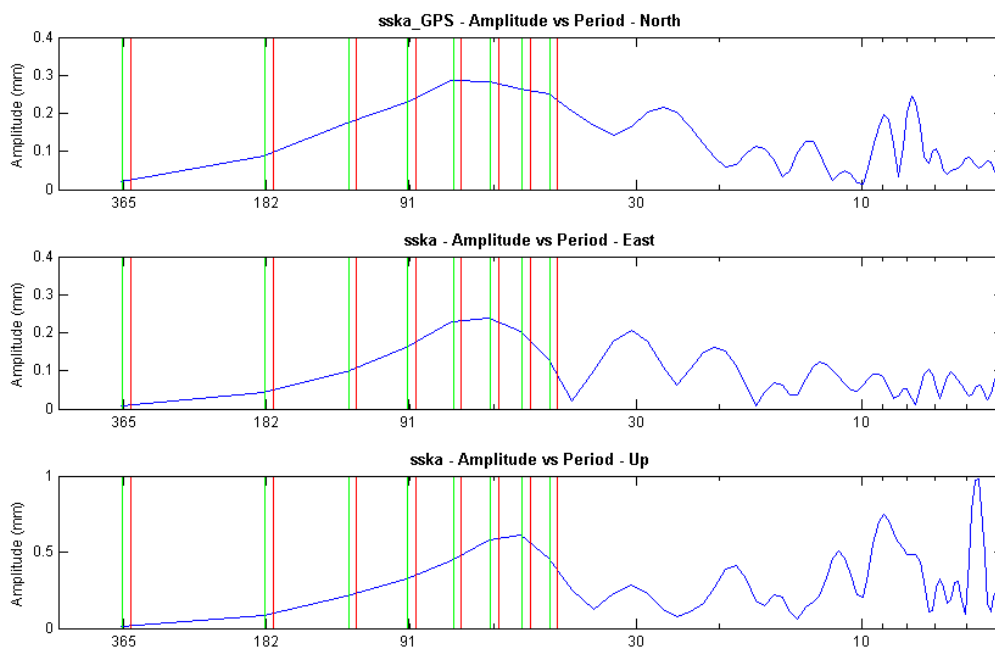
Figur 6-23. Koordinattidsserie för SSKA.0 från NRT-beräkning av Swepos-nätet, juli 2023.



Figur 6-24. Koordinattidsserie för SSKA.0 från NRT-beräkning av Swepos-nätet, augusti 2023.

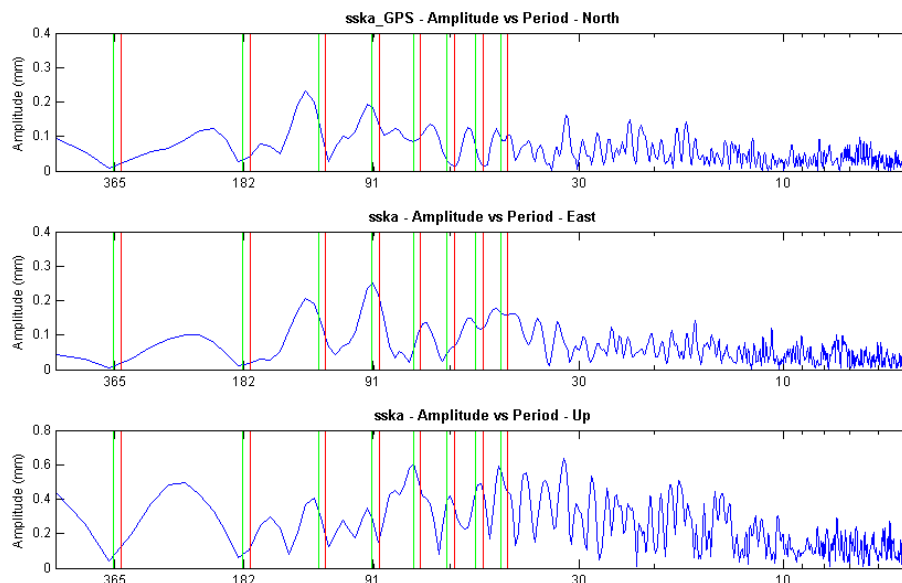
Här valdes sommarperioden ut för att monumentets temperaturskillnader mellan dag och natt då förväntas vara relativt stora p.g.a. solstrålning, vilket därmed skulle kunna orsaka dygnsvariationer i koordinattidsserien.

För att undersöka om koordinattidsserierna uppvisar dygnsvariationer gjordes spektralanalys med hjälp av TSview (Herring 2003). Eftersom tidsserien som visas här endast omfattar tre månader, så är det inte möjligt att skatta linjära hastigheter i kombination med parametrar för års- och/eller halvårsvariation (jfr. avsnitt 7.2). Om endast linjära hastigheter skattas, är det möjligt att samtidigt utföra spektralanalys.



Figur 6-25. Spektralanalys av koordinattidsserien för SSKA.0, från NRT-beräkning av Swepos-nätet under juni–augusti 2023. Baseras på skattning av enbart linjära hastigheter. Skalan på den horisontella axeln är dagar.

För att kunna utföra spektralanalys vid skattning av linjära hastigheter i kombination med års- och halvårsvariationer – eftersom det är vårt huvudalternativ för hastighetsskattningen – så användes koordinater från NRT-beräkningen för perioden november 2021 till december 2023, det vill säga alla tillgängliga data.



Figur 6-26. Spektralanalys av koordinattidsserien för SSKA.0, från NRT-beräkning av Swepos-nätet under perioden november 2021 till december 2023. Baseras på skattning av linjära hastigheter i kombination med års- och halvårsvariationer. Skalan på den horisontella axeln är dagar.

I den korta tidsserien (Figur 6-25) syns en tydlig signal för perioden en dag i U-komponenten, vilken dock saknas i den längre tidsserien (Figur 6-26), där heller inga andra tydliga signaler återstår efter att parametrar för hel- och halvårsvariation lösts ut.

6.4 Analys av koordinattidsserierna

Bruset i L1-tidsserierna (se avsnitt 6.3.1) ökar generellt sett mot slutet av perioden, vilket sannolikt kan kopplas till den ökande jonosfärsaktiviteten. Därför betraktar vi alltså L3-lösningen som anslutits till SWEREF 99 på enbart KOB.0 (se tidsserier i avsnitt 6.3.2) som huvudlösning.

Omkring årsskiftet 2018-2019 samlades snö på antennen på SSKA.0, vilket ger snöeffekter i U-komponenten. I koordinattidsserierna ses detta som avvikande koordinater. Effekten syns tydligt när anslutningen till SWEREF 99 görs enbart på KOB.0 (se Figur 6-12 och Figur 6-13).

När alla tillgängliga stationer används för anslutningen till SWEREF 99 fördelas koordinatavvikelserna 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 6-18 och Figur 6-19). I tidsserierna för de övriga stationerna (se Figur 6-15 till Figur 6-17 samt Figur 6-20) kan man i stället se spår av denna snöeffekt, men mindre till beloppet och riktad åt motsatt håll.

Snö ser ut att ha samlats på antennen SSKA.0 även de följande vintrarna, men då har den gett mindre påverkan på de beräknade koordinaterna för stationen.

I slutet av 2022 ses snöeffekter i flera koordinatkomponenter för flera av stationerna, men tydligast för NBIO.0 och SSKA.0. Om snö ackumuleras symmetriskt på radomen påverkar det främst U-komponenten, men om snön snedfördelas på radomen – till exempel p.g.a. blåst – så kan även plankomponenterna påverkas.

Effekten av vissa störningar och effekter från stationernas närmiljö blir större vid användning av L3 än när L1 används, så att de framträder tydligare i tidsserierna. Det gäller till exempel den snö som samlades på antennerna under december 2022 och resulterade i koordinatavvikelser.

För SSKA.0 är årstidsvariationen i tidsseriens E-komponent tydligare i L3-tidsserien än i L1-tidsserien (se Figur 6-12 resp. Figur 6-7). Det bör dock inte spela någon avgörande roll för skattningen av stationernas hastigheter över tid, eftersom vi även skattar årstidsvariationer.

Genom att ansluta de dagliga lösningarna till SWEREF 99 på alla stationer som ingått 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, utom SSKA.0 som ser ut att ha en trend i U-komponenten. Alla stationer uppvisar någon form av årstidsvariation i en eller båda plankomponenterna.

Om man jämför tidsserierna från de båda SWEREF 99-anslutningarna, så kan man ana att KOB.0:s årstidsvariation påverkar de övriga stationerna när nätet ansluts till SWEREF 99 endast på KOB.0. När nätet ansluts till SWEREF 99 på alla stationer så ses mindre årstidsvariation i tidsserierna för LKB.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 SSKA.0 ser ut att ha en trend i tidsserien för U-komponenten, oavsett om anslutning till SWEREF 99 görs på enbart KOB.0 eller på alla stationer i nätet, så står KOB.0 fast som förstahandsval för anslutningen till referenssystemet.

En annan möjlighet skulle kunna vara att ansluta nätet till SWEREF 99 på omkringliggande Swepos-stationer. Eftersom de stabila Swepos-stationerna, så kallad klass A-stationerna, ligger relativt långt från Forsmark kommer man att behöva använda L3-lösning för de längre baslinjerna. Bruset från dessa långa baslinjer förväntas vara något högre än för de korta baslinjerna i SKB-nätet, och kan fortplanta sig till de stationsvisa tidsserierna för SKB-nätet.

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. Med så långa baslinjer i nätet kommer man att behöva göra landhöjningsreduktion innan anslutning till SWEREF 99 för att inte degradera anslutningen.

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 monumenten och berggrunden, 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 p.g.a. solbelysning under sommaren, till exempel beroende på monumenthöjd, om monumentet skuggas av objekt i sin omgivning, hur monumenten med triangelformad bas är orienterade och så vidare. Om monumentet värms upp – och därmed expanderar – ojämnt skulle det kunna ge en horisontell rörelse. Masterna på KOB.0, LKB.0, NBIO.0 och VMAS.0 har dock målats vita för att minska risken för ojämn uppvärmning.

Johansson (2024) 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 kallad dubbeldifferenser.

Tidsserierna från den årliga beräkningen visar att SKB-stationernas koordinater har årstidsvariationer främst i plankomponenterna. Om detta beror på ojämn solbelysning av monumenten så borde vi också kunna se dygnsvariationer i plan i NRT-tidsserierna (se Figur 6-22 till Figur 6-24), särskilt de årstider då temperaturskillnaden mellan natt och dag är som störst. Spektralanalys av NRT-tidsserien för SSKA.0 under juni till augusti 2023 (se Figur 6-25) visar inga tydliga dygnsvariationer i plan. I U-komponenten ser det ut att finnas en dygnsvariation, men med tanke på att tidsserien är kort och att amplituderna för alla redovisade signaler är små, får resultaten betraktas som högst preliminära. Spektralanalys av NRT-tidsserien för SSKA.0 från november 2021 till december 2023, efter att linjära hastigheter skattats i kombination med års- och halvårsvariationer, (se Figur 6-26) ger inget stöd för att stationen skulle ha en dygnsvariation över ett helt år. Att det bara är i den korta tidserien som man kan se en dygnsvariation kan förklaras med att temperaturskillnaden mellan dag och natt är större på sommaren.

För att kunna dra slutsatser om monumentens egenskaper skulle man behöva studera NRT-tidsserier mer ingående – till exempel för fler stationer över längre tid – och undersöka om det finns en korrelation med soligt väder eller temperaturvariationer över dygnet. När det gäller eventuella dygnsvariationer i U-komponenten så antar vi att temperaturskillnaderna i sig spelar större roll än om monumenten belyses ojämnt av solen. Monumentet på SSKA.0 är dessutom annorlunda utformat än de övriga SKB-stationernas monument, varför NRT-tidsserien för SSKA.0 inte säkert är representativ för de andra stationerna i nätet.

Det går också att se ett ökat brus i koordinattidsserierna under sommaren. Vår erfarenhet är att det är vanligt med högre brus i GNSS-beräkningar sommartid, bl.a. 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 en risk att fåglar, till exempel måsar, sätter sig på den högsta punkten i sitt revir för att bevaka det under häckningstiden – 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 6-27.



Figur 6-27. Den s.k. 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

Den föregående årliga beräkningen (Kempe et al. 2023) var den första som inkluderade även hastighetsskattning för SKB-stationerna, eftersom det var först då som tidsserierna var tillräckligt långa för att kunna göra hastighetsskattningarna med rimlig säkerhet.

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. Om tidsserien är kort 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 fyra års observationer från SKB-stationerna, från senhösten 2018 till slutet av 2022. Hastigheterna måste dock ännu betraktas som preliminära eftersom observationsperioden ännu är relativt kort, med hänsyn till de mycket små rörelser som vi försöker detektera.

För skattning av hastigheterna har den lösning använts, där anslutning av SWEREF 99 gjorts på enbart KOB0, vilket motiveras i avsnitt 6.4. Detta anslutningsalternativ innebär att koordinaterna för KOB0 varit fixerade och därmed kan ingen hastighet skattas för stationen. Skattningarna för de övriga stationerna kommer att avse respektive stations hastighet *relativt* KOB0.

Innan hastigheter skattas behöver man filtrera bort dåliga eller avvikande koordinatlösningar, orsakade av till exempel snö som samlats på antennen. Ev. 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 använda 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 skattningsalternativ.

För LKBB0, NBIO0 och VMAS0 har ungefär 30-40 dagliga koordinater tagits bort i den manuella editeringen, på grund av avvikelser orsakade av snö eller mer enstaka avvikelser under sommartid. För SSKA0 togs ca 60 observationer bort.

Om stationerna har kända förändringar under observationsperioden, till exempel antennbyten, så kan så kallad 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 kallad RealSigma-metoden, som ger mer realistiska osäkerhetsskattningar än om man antar att dataserien enbart karaktäriseras 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.

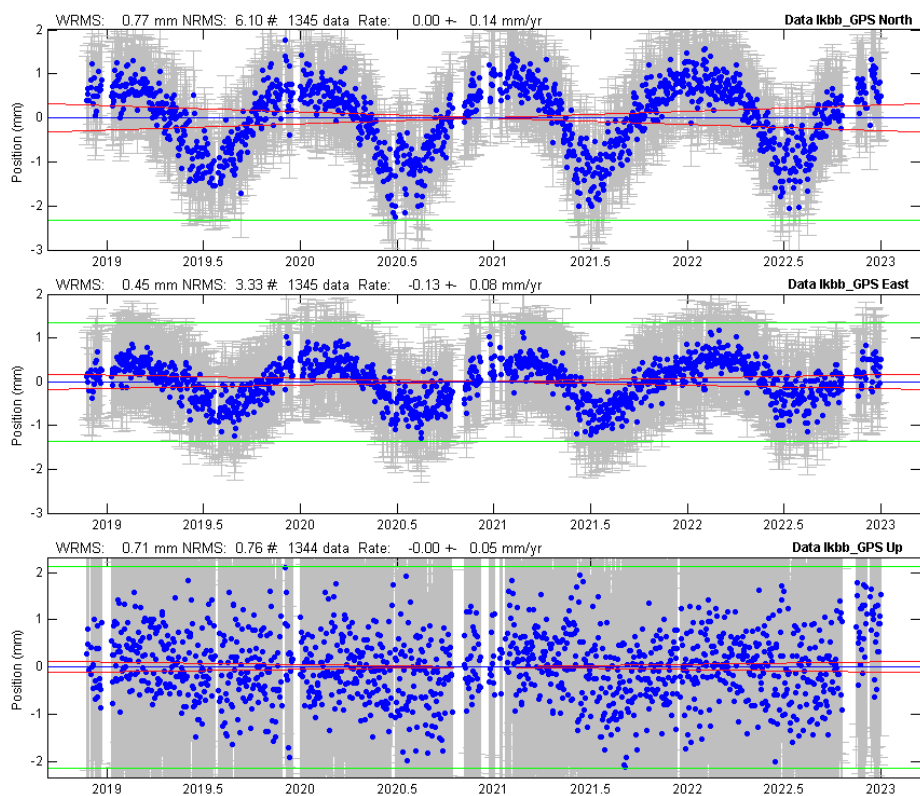
7.2.1 Skattning av linjära hastigheter

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

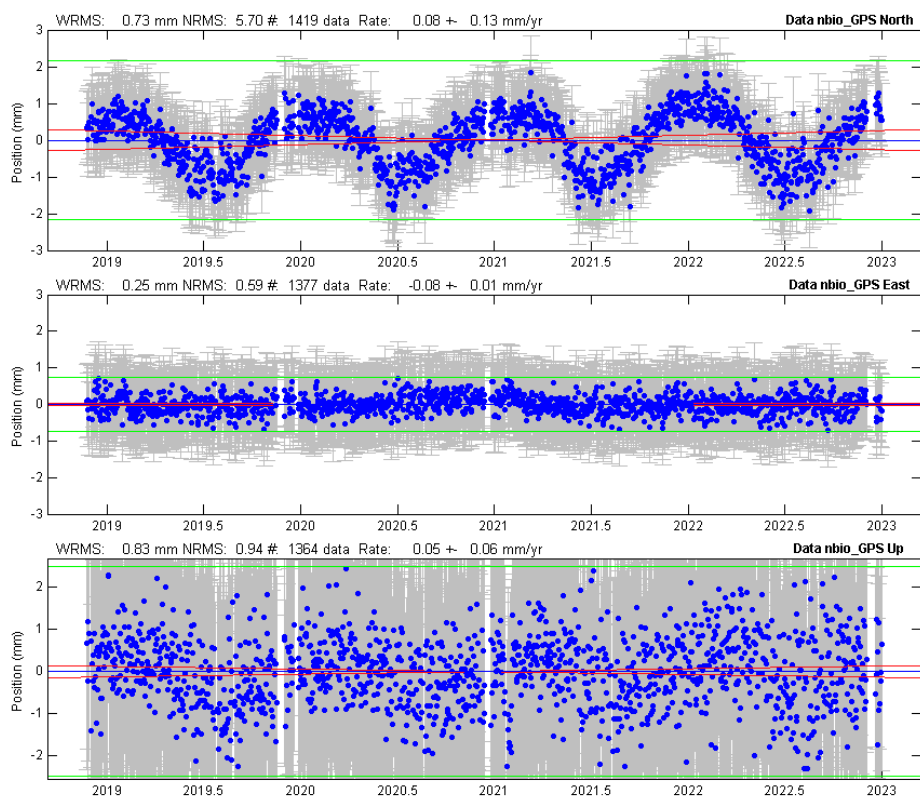
Tabell 7-1. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Endast linjära hastigheter har skattats (alternativ 1).

Enhet: mm/år.

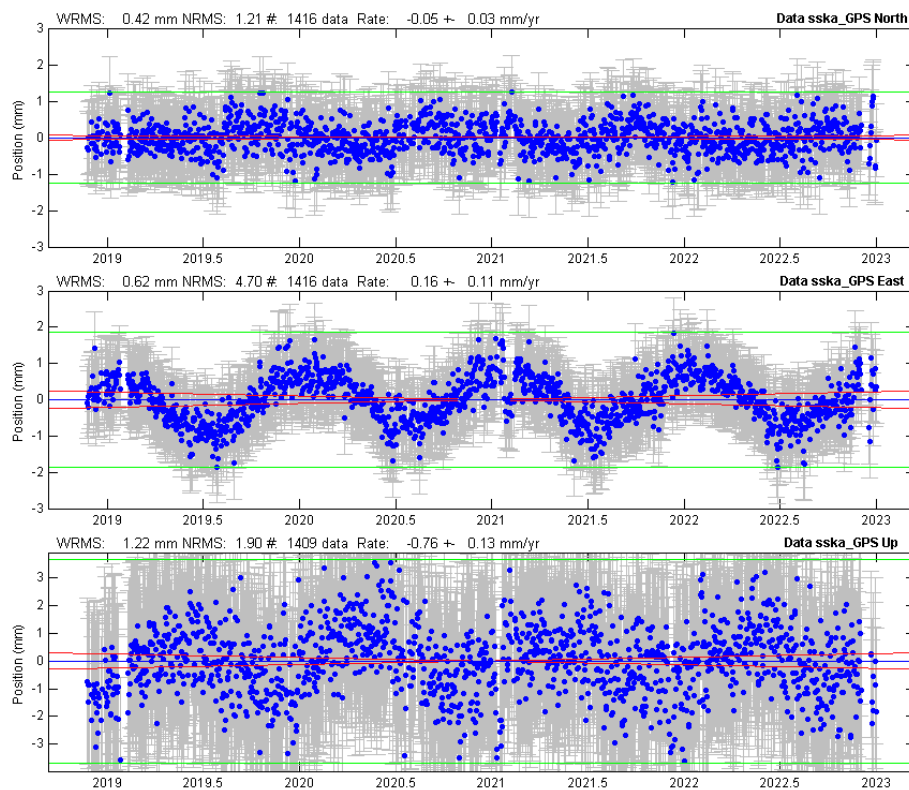
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	0,00	-0,13	0,00	0,14	0,08	0,05
NBIO.0	0,08	-0,08	0,05	0,13	0,01	0,06
SSKA.0	-0,05	0,16	-0,76	0,03	0,11	0,13
VMAS.0	-0,05	-0,05	-0,03	0,15	0,04	0,06



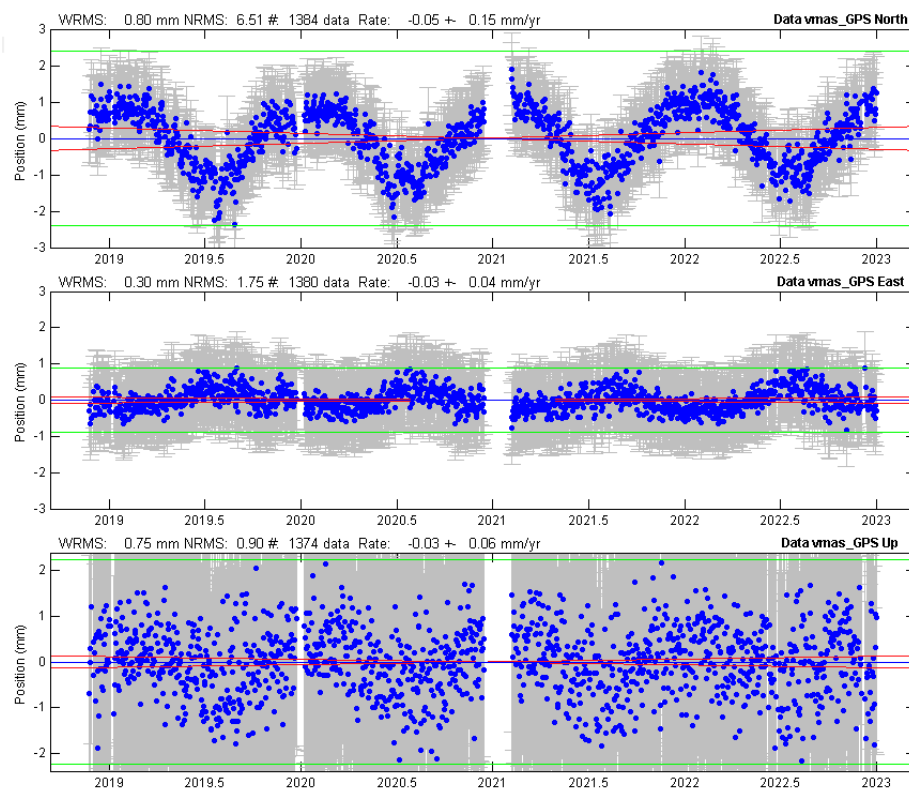
Figur 7-1. Resultat av hastighetsskattning för LKBB.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 1. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten, med täckningsfaktorn 3, för residualerna. De röda linjerna visar standardosäkerheten (med täckningsfaktorn 1) för den skattade hastigheten.



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.

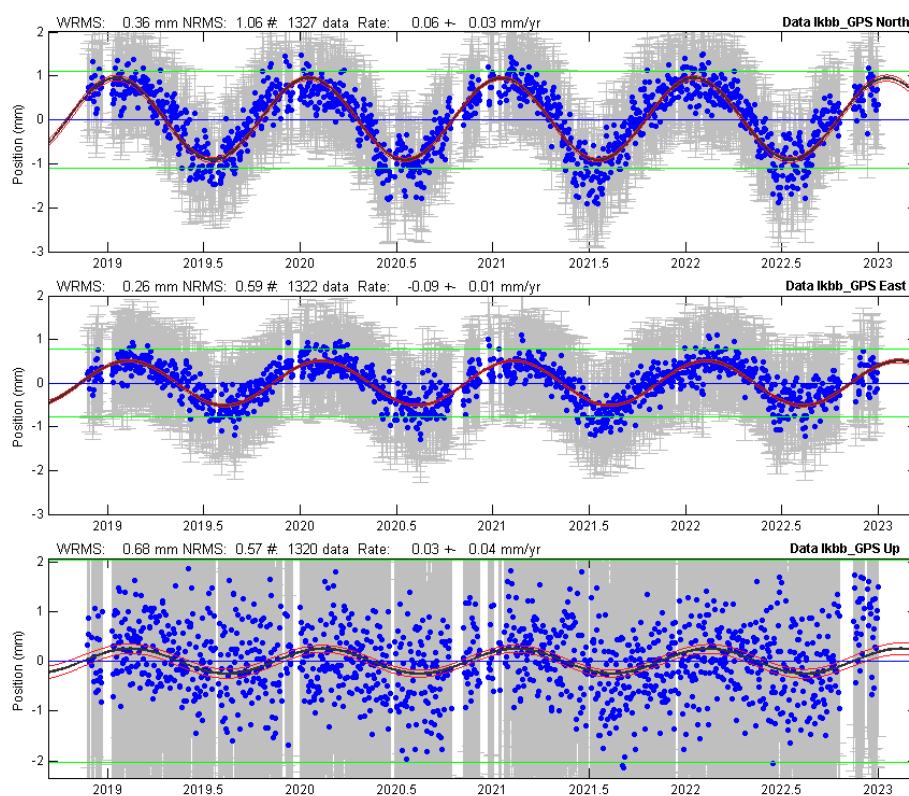
7.2.2 Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för årlig variation

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

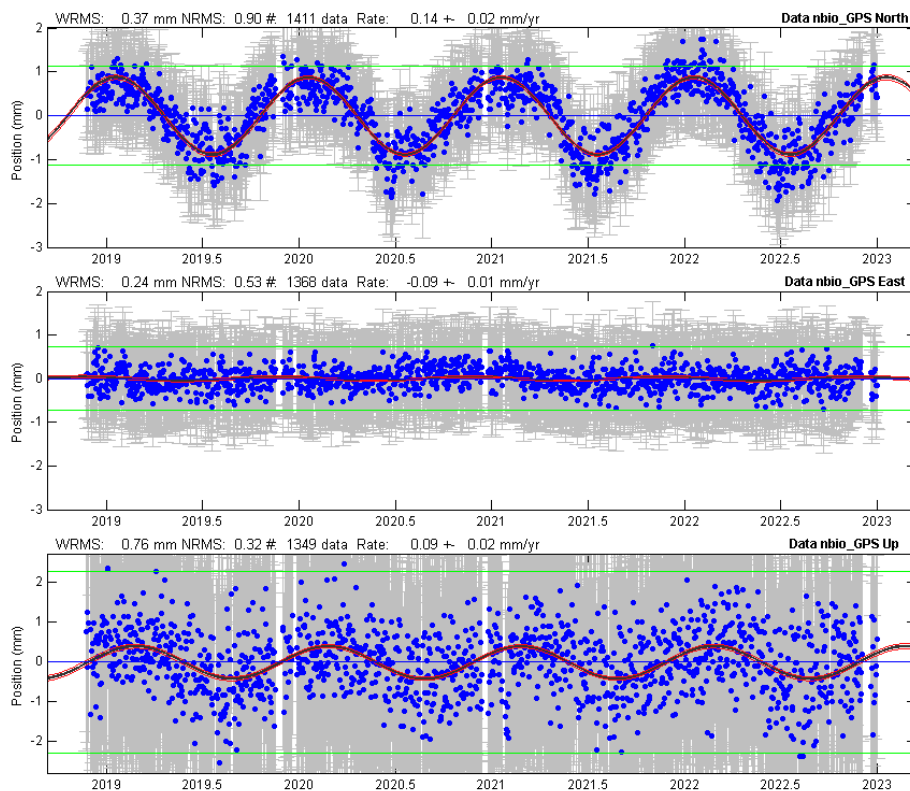
Tabell 7-2. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Linjär hastighet har skattats i kombination med årlig variation (alternativ 2).

Enhet: mm/år.

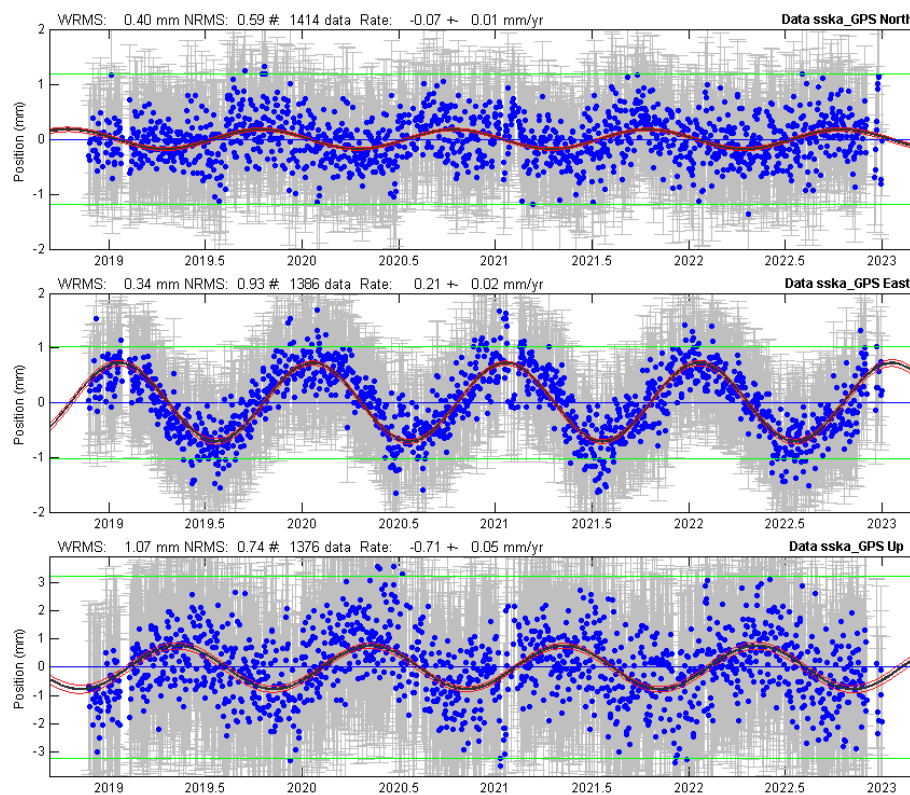
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	0,06	-0,09	-0,03	0,03	0,01	0,04
NBIO.0	0,14	-0,09	0,09	0,02	0,01	0,02
SSKA.0	-0,07	0,21	-0,71	0,01	0,02	0,05
VMAS.0	0,01	-0,05	-0,01	0,02	0,01	0,02



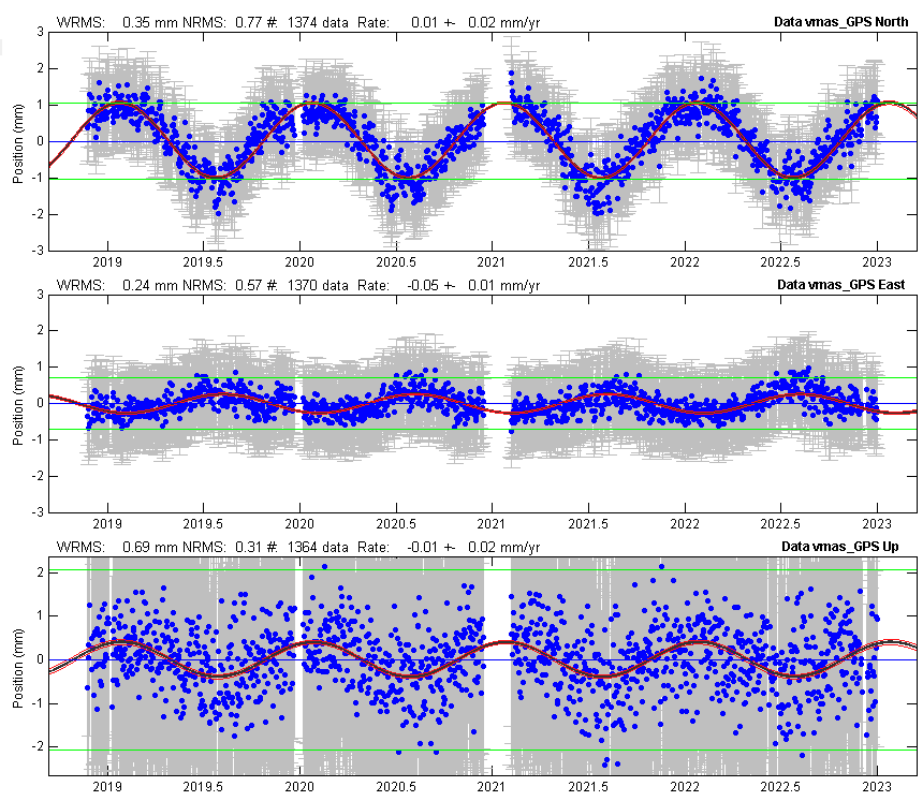
Figur 7-5. Resultat av hastighetsskattning för LKBB.0 relativt KOB.0, enligt alternativ 2. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade årstidsvariationerna är plottade på tidsserien. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten, med täckningsfaktorn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

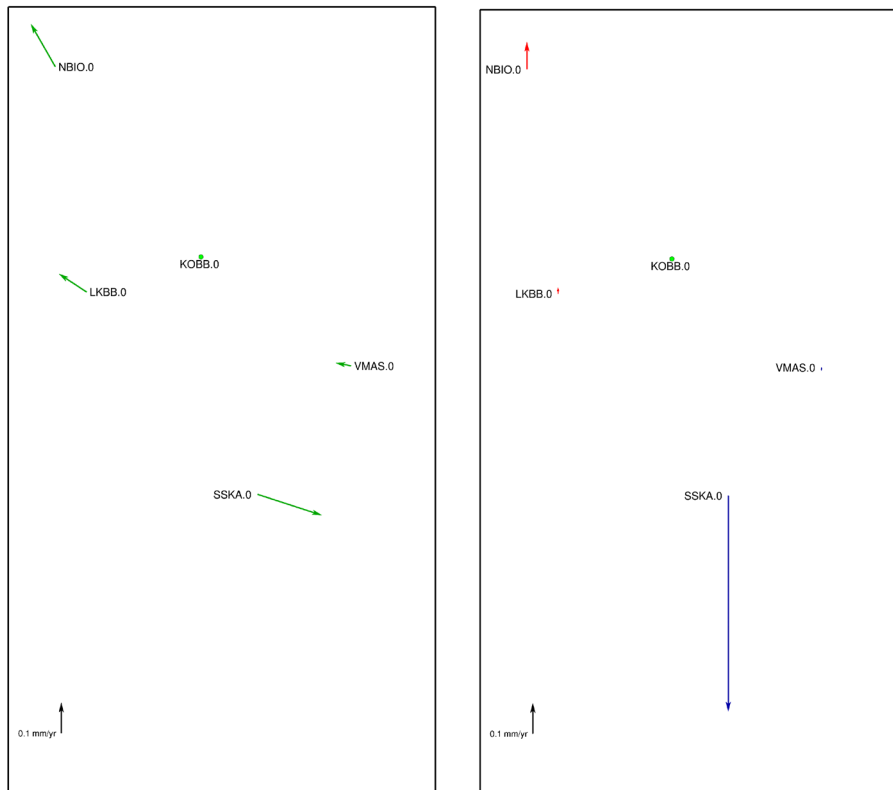
7.2.3 Skattning av linjära hastigheter inkl. parametrar för års- och halvårsvariation

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

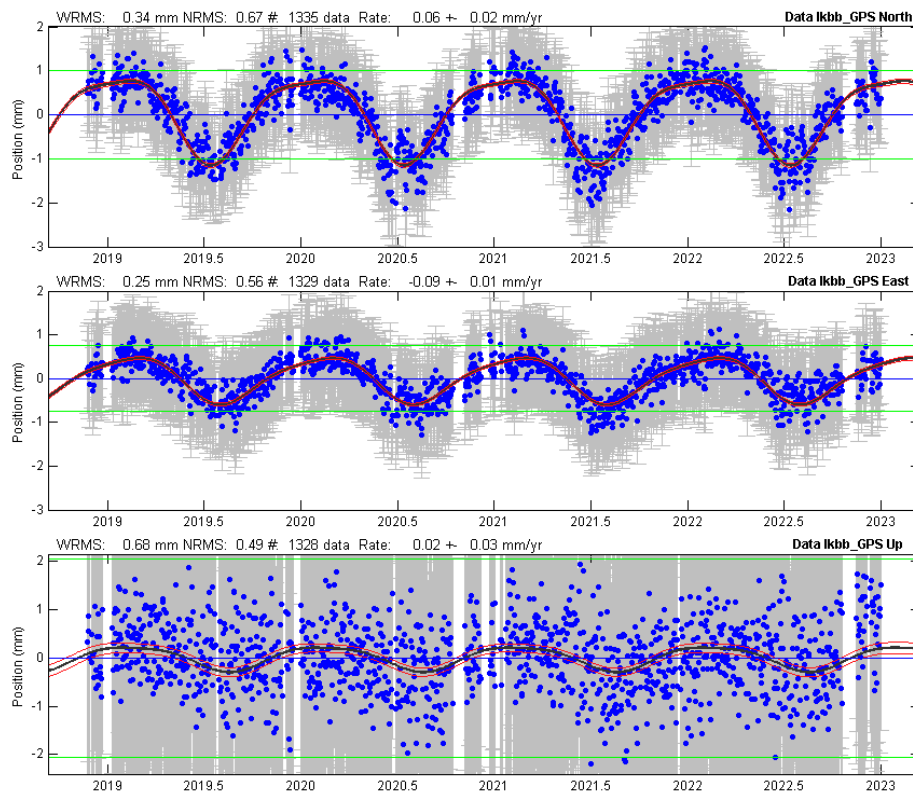
Tabell 7-3. Skattade hastigheter i tre koordinatkomponenter (vN, vE, vU) med respektive standardosäkerheter (stdN, stdE, stdU). Linjär hastighet har skattats i kombination med helårs- och halvårsvariation (alternativ 3).

Enhet: mm/år.

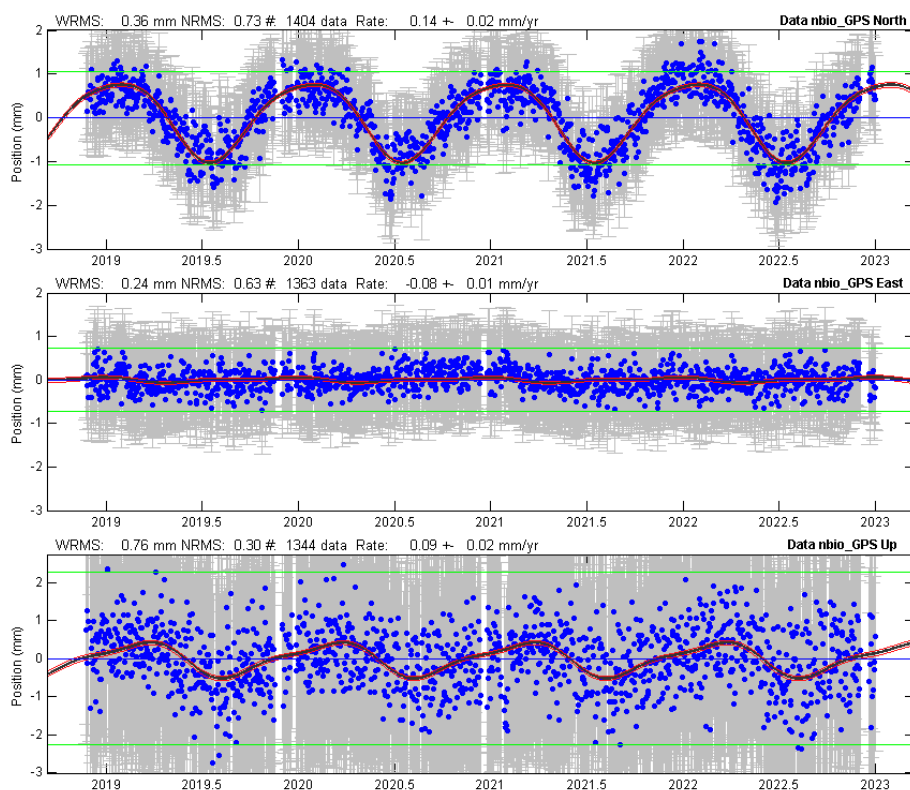
Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	0,06	-0,09	0,02	0,02	0,01	0,03
NBIO.0	0,14	-0,08	0,09	0,02	0,01	0,02
SSKA.0	-0,07	0,21	-0,71	0,01	0,02	0,05
VMAS.0	0,01	-0,05	-0,01	0,01	0,01	0,02



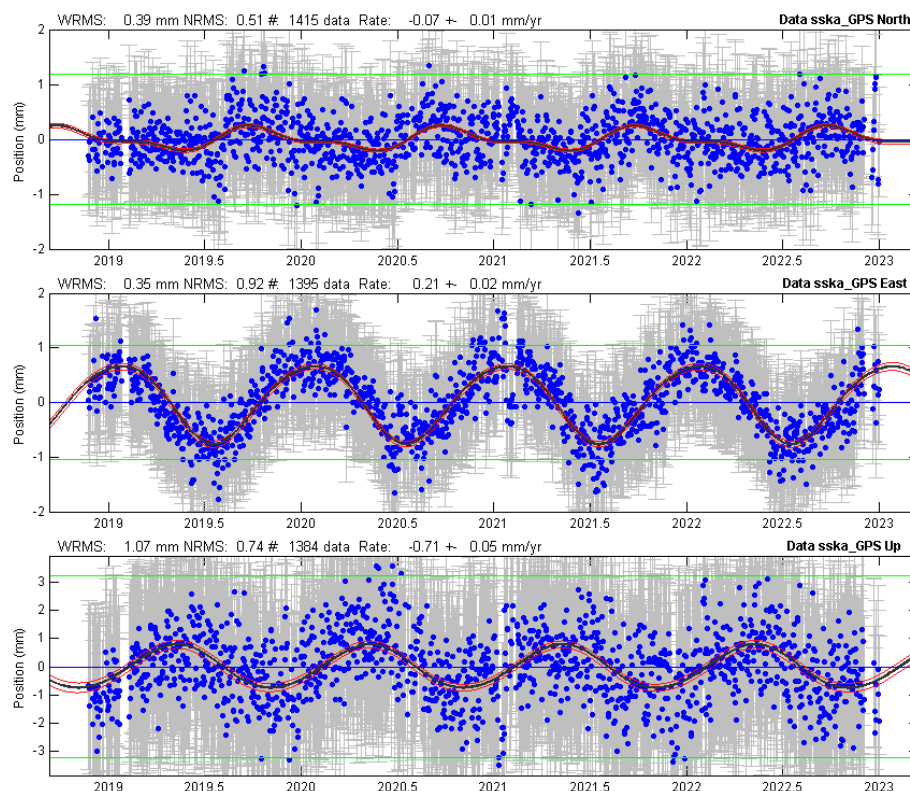
Figur 7-9. Skisserna visar de skattade linjära stationshastigheterna relativt KOB.B.0, från Tabell 7-3, med horisontella hastigheter (vN, vE) till vänster, och vertikala hastigheter (vU) till höger.



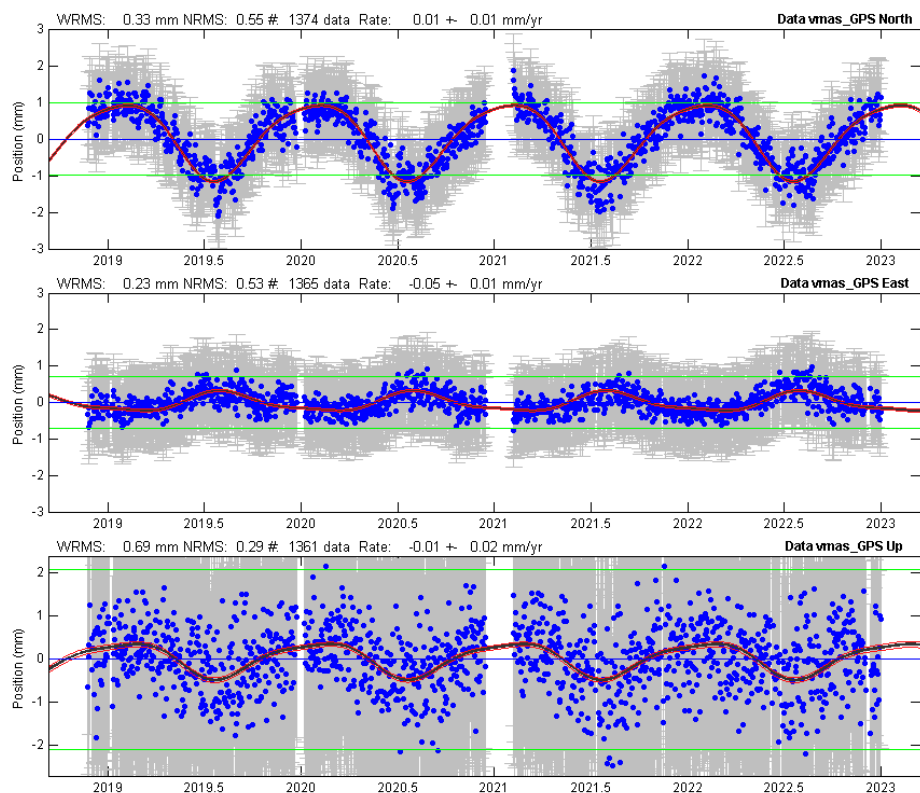
Figur 7-10. Resultat av hastighetsskattning för LKBB.0 relativt KOB.B.0, enligt alternativ 3. I bilden är endast de linjära hastigheterna borttagna från dataserien och de skattade helårs- och halvårsvariationerna är plottade på tidsserien. De gröna linjerna representerar den utvidgade standardosäkerheten (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 KOB.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 KOB.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.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 indataveditering

För att få någon form av kontroll av den manuella indatavediteringen, gjordes också motsvarande hastighetsskattningar baserat på en testlösning där SSKA.0 använts för anslutning till referenssystemet istället för KOB.0. De dagliga koordinaterna i SWEREF 99 är alltså framtagna på samma sätt som beskrivs i avsnitt 6.3.2, men med den skillnaden att KOB.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 skattningsalternativ.

De skattade hastigheterna för SSKA.0 relativt KOB.0 – det vill säga baserat på huvudlösningen som är ansluten till SWEREF 99 på KOB.0 – och hastigheterna för KOB.0 relativt SSKA.0 – som alltså baseras på testlösningen där SSKA.0 använts för anslutning till SWEREF 99 – stämmer väl överens; se Tabell 7-4.

Tabell 7-4. 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). Hastigheten för SSKA.0, relativt KOB.0, är hämtad från Tabell 7-3.

Enhet: mm/år.

Station	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
KOB.0, relativt SSKA.0	0,07	-0,21	0,72	0,01	0,02	0,05
SSKA.0, relativt KOB.0	-0,07	0,21	-0,71	0,01	0,02	0,05

Hastigheterna för KOB.B.0 (relativt SSKA.0) och SSKA.0 (relativt KOB.B.0) är så gott som identiska – men med omvänt tecken. Det tar vi som ett tecken på att den manuella indatavredningen är relativt robust, eftersom de två separata rederingarna ger korresponderande resulterande hastigheter.

Skilnaden i skattad hastighet (enligt alternativ 3) – beroende på om skattningen görs relativt KOB.B.0 eller SSKA.0 – är störst för LKBB.0 och NBIO.0, men skilnaden är inte signifikant i förhållande till osäkerheten i skattningarna.

Tabell 7-5. 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). Hastigheterna som skattats relativt KOB.B.0, är hämtade från Tabell 7-3. För att hastigheterna som skattats relativt SSKA.0 ska vara jämförbara med de hastigheter som skattats relativt KOB.B.0, så har här den skattade hastigheten för SSKA.0 (se Tabell 7-3) adderats till (vN, vE, vU).

Enhet: mm/år.

Station	Relativt	vN	vE	vU	stdN	stdE	stdU
LKBB.0	KOB.B.0	0,06	-0,09	0,02	0,02	0,01	0,03
	SSKA.0	0,07	-0,10	0,03	0,01	0,03	0,08
NBIO.0	KOB.B.0	0,14	-0,08	0,09	0,02	0,01	0,02
	SSKA.0	0,14	-0,09	0,11	0,02	0,03	0,06
VMAS.0	KOB.B.0	0,01	-0,05	-0,01	0,01	0,01	0,02
	SSKA.0	0,00	-0,05	0,00	0,01	0,03	0,06

I Tabell 7-5 visas att de skattade hastigheterna för LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 är i stort sett identiska, oavsett om de skattats relativt KOB.B.0 eller SSKA.0, om man tar hänsyn till hastighetsskilnaderna mellan KOB.B.0 och SSKA.0.

7.3 Skattning av årstidsvariationer

Vid hastighetsskattningarna enligt alternativ 2 och 3 (se avsnitt 7.2.2 resp. 7.2.3) 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 fasförskjuten cosinusfunktion per koordinatkomponent för att underlätta förståelsen. Omräkningen ger en total amplitud för den nya funktionen samt funktionens fasförskjutning i förhållande till årets början.

I Tabell 7-6 redovisas de totala amplituderna för den årliga variationen i varje koordinatkomponent, när hastigheter skattats enligt alternativ 2. I Tabell 7-7 redovisas de totala amplituderna för års- och halvårsvariation i varje koordinatkomponent, när hastigheter har skattats enligt alternativ 3.

Tabell 7-6. Beräknade totala amplituder för den årliga variationen per koordinatkomponent (N_1 , E_1 , U_1), med respektive standardosäkerheter (stdN₁, stdE₁, stdU₁) från hastighetsskattning enligt alternativ 2.

Enhet: mm.

Station	N_1	E_1	U_1	stdN ₁	stdE ₁	stdU ₁
LKBB.0	0,94	0,51	0,25	0,04	0,02	0,07
NBIO.0	0,88	0,05	0,41	0,03	0,02	0,04
SSKA.0	0,17	0,72	0,77	0,02	0,04	0,09
VMAS.0	1,01	0,26	0,40	0,03	0,02	0,04

Tabell 7-7. Beräknade totala amplituder för årsvariation per koordinatkomponent (N_1 , E_1 , U_1) med standardosäkerheter ($\text{std}N_1$, $\text{std}E_1$, $\text{std}U_1$) och totalamplituder för halvårsvariation per koordinatkomponent ($N_{0,5}$, $E_{0,5}$, $U_{0,5}$) med standardosäkerheter ($\text{std}N_{0,5}$, $\text{std}E_{0,5}$, $\text{std}U_{0,5}$) från hastighetsskattning enligt alternativ 3.

Enhet: mm.

Station	Årsvariation						Halvårsvariation					
	N_1	E_1	U_1	$\text{std}N_1$	$\text{std}E_1$	$\text{std}U_1$	$N_{0,5}$	$E_{0,5}$	$U_{0,5}$	$\text{std}N_{0,5}$	$\text{std}E_{0,5}$	$\text{std}U_{0,5}$
LKBB.0	0,93	0,51	0,25	0,03	0,02	0,06	0,23	0,10	0,05	0,03	0,02	0,06
NBIO.0	0,89	0,04	0,42	0,03	0,02	0,03	0,14	0,03	0,13	0,03	0,02	0,03
SSKA.0	0,17	0,71	0,77	0,02	0,03	0,08	0,09	0,06	0,04	0,02	0,03	0,08
VMAS.0	1,03	0,26	0,39	0,02	0,02	0,03	0,16	0,08	0,10	0,02	0,02	0,03

Tabell 7-6 och Tabell 7-7 visar att de skattade amplituderna för årsvariationen är ungefär desamma oavsett om man löser halvårsvariationer eller inte.

Tabell 7-8. 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	16	39	44
NBIO.0	18	328	55
SSKA.0	287	20	128
VMAS.0	23	219	26

Tabell 7-9. 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	16	39	46	100	110	143
NBIO.0	18	319	54	100	9	114
SSKA.0	287	19	128	73	96	144
VMAS.0	23	219	28	102	20	103

Även fasförskjutningen för halvårsvariationen (se Tabell 7-8 och Tabell 7-9) mycket lika, oavsett om halvårsvariation har skattats eller inte.

7.3.1 Kontroll av manuell indataeditering

På samma sätt som beskrivs i avsnitt 7.2.4, kontrollerades effekten av den manuella indata-editeringen även vid skattningen av årstidsvariationer. Även här användes testlösningen som anslutits till referenssystemet på SSKA.0 istället för på KOB.0.

De skattade årstidsvariationerna för SSKA.0 *relativt* KOB.0 – det vill säga baserat på huvudlösningen som är ansluten till SWEREF 99 på KOB.0 – och årstidsvariationerna för KOB.0 *relativt* SSKA.0 – som alltså baseras på testlösningen där SSKA.0 använts för anslutning till SWEREF 99 – stämmer väl överens; se Tabell 7-10.

Tabell 7-10. Beräknade totala amplituder för årsvariation per koordinatkomponent (N_1 , E_1 , U_1) med standardosäkerheter ($\text{std}N_1$, $\text{std}E_1$, $\text{std}U_1$) och totalamplituder för halvårsvariation per koordinatkomponent ($N_{0,5}$, $E_{0,5}$, $U_{0,5}$) med standardosäkerheter ($\text{std}N_{0,5}$, $\text{std}E_{0,5}$, $\text{std}U_{0,5}$) från hastighetsskattning enligt alternativ 3. Amplituden för SSKA.0, relativt KOB.0, är hämtad från Tabell 7-7.

Enhet: mm.

Station	Årsvariation						Halvårsvariation					
	N_1	E_1	U_1	$\text{std}N_1$	$\text{std}E_1$	$\text{std}U_1$	$N_{0,5}$	$E_{0,5}$	$U_{0,5}$	$\text{std}N_{0,5}$	$\text{std}E_{0,5}$	$\text{std}U_{0,5}$
KOB.0, relativt SSKA.0	0,18	0,70	0,77	0,02	0,04	0,09	0,09	0,07	0,03	0,02	0,03	0,09
SSKA.0, relativt KOB.0	0,17	0,71	0,77	0,02	0,03	0,08	0,09	0,06	0,04	0,02	0,03	0,08

Tabell 7-11. 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. Fasförskjutningen för SSKA.0, relativt KOB.0, är hämtad från Tabell 7-9. Enhet: dagar (efter årsskifte).

Station	Årsvariation			Halvårsvariation		
	φN_1	φE_1	φU_1	$\varphi N_{0,5}$	$\varphi E_{0,5}$	$\varphi U_{0,5}$
KOB.0, relativt SSKA.0	108	202	310	164	4	55
SSKA.0, relativt KOB.0	287	19	128	73	96	144

Vid denna jämförelse kan man se att årstidsvariationerna i KOB.0 (relativt SSKA.0) och SSKA.0 (relativt KOB.0) har ungefär samma totala amplituder, men fasförskjutningarna skiljer, som förväntat, nära ett halvt år (ca 183 dagar).

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 så har SSKA.0 signifikant hastighet i U-komponenten och NBIO.0 har signifikant hastighet i E-komponenten.

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 både alternativ 2 och alternativ 3 är flertalet hastigheter signifikanta på 3-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 inte 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 tidsspännet är nära ett helt antal år (endast 34 dagar mer) och därmed medelvärdesbildas årstidsvariationerna bort även vid skattning av endast en linjär trend. Dessutom närmar vi ju oss de 4,5 år som Blewitt och Lavallée (2002) definierat som gräns för när årstidsvariationernas påverkan är försumbar.

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 fyra 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 datamängd – 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.

De skattade hastigheterna skiljer något jämfört med hastigheterna från föregående årliga beräkningen (Kempe et al. 2023). Det beror bl.a. på att tidsserierna nu är längre och att indata till hastighetsskattningen har editerats manuellt, baserat på visuell inspektion av tidsserien från respektive station. Eftersom förra hastighetsskattningen byggde på L1-lösningar medan denna skattning bygger på L3-lösningar har vi inte kunnat utgå från editeringen som gjordes inför förra hastighetsskattningen, och enbart editera data för 2022, utan vi behövde nu göra editeringen på nytt för hela tidsserien.

När hastighetsskillnaderna sätts i relation till respektive standardosäkerheter så är endast hastigheterna i alla koordinatkomponenter för VMAS.0 och i E-komponenten för SSKA.0 signifikanta.

7.4.2 Årstidsvariationer

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

Vid en jämförelse av amplituderna för helårsvariation (se Tabell 7-6 och Tabell 7-7) så är de mycket lika, oavsett om parametrar för halvårsvariation har lösts eller inte.

På motsvarande vis är fasförskjutningen för helårsvariationen (se Tabell 7-8 och Tabell 7-9) mycket lika, oavsett om halvårsvariation har skattats eller inte. Skillnaden är som mest två dagar utom i E-komponenten för NBIO.0 där fasförskjutningen skiljer 9 dagar, men där är å andra sidan amplituden väldigt liten.

I Tabell 7-7 och Tabell 7-9 ses att LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 har ungefär samma årstidsvariation, avseende både totala amplituder och fasförskjutningar, i N-komponenten. I E-komponenten har LKBB.0 och SSKA.0 liknande årstidsvariation.

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.0 är 0,22 mm/år för SSKA.0 respektive 0,16 mm/år för NBIO.0; se Figur 7-9. Osäkerheterna för dessa hastigheter är skattade till 0,04 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.0 är $0,71 \pm 0,10$ 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.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, vilket är en trolig orsak till att de skattade hastigheterna skiljer sig något från föregående skattning. Som nämnts tidigare, så visar Kierulf et al. (2021) att den undre gränsen snarare ligger omkring fem år om man söker hastigheter av den storlek som är intressant för SKB-nätet i Forsmark.

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

8 Fortsatta studier

SKB har beslutat att i fortsättningen låta räkna SKB-nätet med PPP, Precise Positioning, i stället för genom dubbeldifferenser och nätutjämnning, för korrelationer mellan de olika stationerna inte ska påverka analyserna. Det innebär antagligen att detta är den sista beräkningen av SKB-nätet som görs i denna form – åtminstone för en tid framåt.

Några reflektioner från de genomförda beräkningarna kan ändå komma till användning i framtiden:

- När jonosfärsaktiviteten ökar kan det vara aktuellt att åter studera skillnaderna mellan regional och global jonosfärmodell, för att se vilken av modellerna som bäst hanterar jonosfäreffekten.
- När jonosfärsaktiviteten nu har ökat har vi sett att L3-lösningarna – som förväntat – ger stabilare beräkningsresultat än L1-lösningarna.
- Generellt är förstärkningen av bruset från stationernas närmiljö etc. i L3-lösningarna mindre än förväntat – jämfört med L1-lösningarna – vilket kan bero på att hela nätet har identiska antenninstallationer och snarlika monument.

Notera att alla data måste räknas om på nytt vid byte av beräkningsstrategi, för att få dagliga koordinater som ger en konsistent tidsserie.

Det är lämpligt att använda någon ytterligare programvara för hastighetsskattning, utöver TSview. Till exempel kan fler brusmodeller testas i programvaran Hector för att försöka få mer realistiska osäkerhetsskattningar. Det grafiska stödet i TSview kan då användas vid bl.a. filtrering av data och utvärdering av tidsserierna.

8.1 SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv

Sedan oktober 2019 ingår KOB0 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, bl.a. till grund för förvaltning av referenssystemen och geodynamiska studier i området, av till exempel landhöjningen. Det innebär att man så småningom kan få information om stabiliteten för KOB0 i förhållande till ett större område.

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

Vid framtida omberäkningar av NKG-nätet kommer KOB0 att ingå med alla tillgängliga data, det vill säga från hösten 2018. NKG-lösningarna har hittills producerats i IGS14/IGb14 (ITRF2014), aktuell epok. Den kommande omberäkningen är tänkt att inledas 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 lämpligt att redovisa beräkningsresultatet i ett dynamiskt referenssystem, till exempel 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.

9 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. Gävle: Lantmäteriet. (Lantmäterirapport 2019:1)

Blewitt, G, Lavallée D, 2002. Effect of annual signals on geodetic velocity. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 107. <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 87, 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 111. <https://doi.org/10.1029/2005JB003629>

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 R, Schaer S, Arnold D, Brockmann E, Kalarus M S, Prange L, Stebler P, Jäggi A, 2023. CODE final product series for the IGS. Bern: Astronomical Institute, University of Bern.

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. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, MA: U.S.A.

JCGM, 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, Frankrike.

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

Johansson J, 2024. 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, 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.
- Kempe T, Alfredsson A, Alissa S, Engfeldt A, Dahlström F, Håkansson M, Jivall L, Jämnäs L, Lidberg M, Lilje C, Nilfouroushan F, Ning T, Norin D, Ohlsson K, Olsson P-A, Steffen H, Tirén K, Wiklund P, Ågren J, 2022.** National Report of Sweden to the EUREF 2022 Symposium. National report, Lantmäteriet, Sweden.
- Kempe C, Jäderberg R, Jivall L, 2023.** Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2021. SKB P-22-02, 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* 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* 26. <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, Frankrike.
- 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, Valtý P, Vergnolle M, Vernant P, 2020.** Comparative analysis of synthetic GNSS time series – Bias and precision of velocity estimations. Research Report RESIF 2020, Franrike.
- NOAA, 2023.** Solar cycle progression. Boulder, CO: Space Weather Prediction Center.
- 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, Finland.
- Petit G, Luzum B (eds), 2010.** IERS Conventions (2010). International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS), IERS Technical Note 36. Frankfurt: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie.
- 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, 2020-05-21, May 21. Tillgänglig: <https://insidegnss.com/the-new-flex-power-mode-from-gps-iir-m-and-iif-satellites-with-extended-coverage-area/> [2023-11-08].

10 Bilaga 1

Översikt utrustning på GNSS-stationer

Tabell 10-1 . Översikt över stationsutrustning.

I tabellen redovisas utbytesdatum för utrustning som har bytts under 2022.

	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	
GNSS-mottagare Septentrio PolarX5		X 2022-11-03	X 2022-12-19		
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	X 2022-11-22		X 2022-11-03
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	X 2022-11-22		X 2022-11-03

11 Bilaga 2

Urklipp ur aktivitetsdagbok

Tabell 11-1 . Urklipp ur aktivitetsdagbok 2018–2022.

		Version 2.2.0	
AKTIVITETSDAGBOK		Sidan av	

OMRÅDE Forsmark	PROJEKT Monitorering Forsmark	BESÄTTNING (fullständiga namn) Martin Espenäs Rickard Jäderberg
UPPDRAGSANSVARIG PÅ PLATS Rickard Jäderberg	ORGANISATION(ER) Lantmäteriet	
KRINGINFORMATION (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 offgridsystem 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 offgridsystem med GPS på Lilla Kobben samt mast på N. Biotesten.					
181116	09:00	12:00	Montering offgridsystem 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					
221103	08:00	15:00	Installation ny GNSS-mottagare på Lillkobben samt uppgradering av strömförsörjning på Västra Måsklinten					

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)
221122	08:00	13:00	Uppgradering strömförsörjning på Norra Biotesten					
221216	09:00	12:00	Felsökning på Norra Biotesten					
221219	09:00	12:00	Installation av ny GNSS-mottagare Norra Biotesten					

12 Bilaga 3

Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen

Tabell 12-1. 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 korregerar dessa om möjligt.
11	GPSEST	Skapar regional jonosfärmodell
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 12-1 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

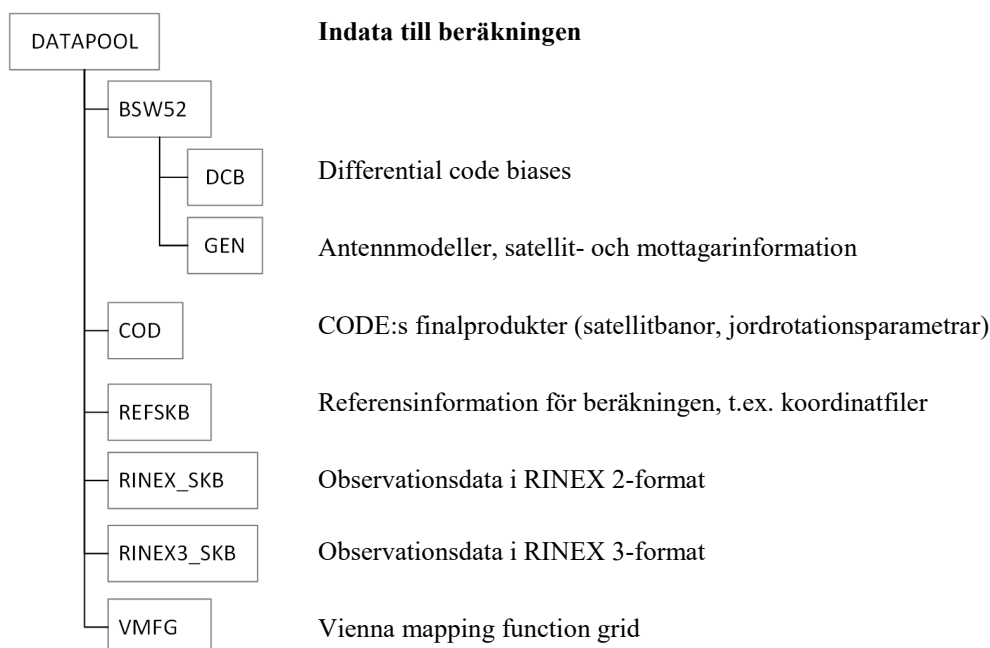
- | | | |
|----|--------------|--|
| 20 | GPSEST (L1) | Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L1-lösning med fixerade periodobekanta från steg 18; sparar normalekvationer. |
| 21 | ADDNEQ2 (L1) | Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L1-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX från normalekvationerna 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 KOB.B.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 KOB.B.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 KOB.B.0) |
-

13 Bilaga 4

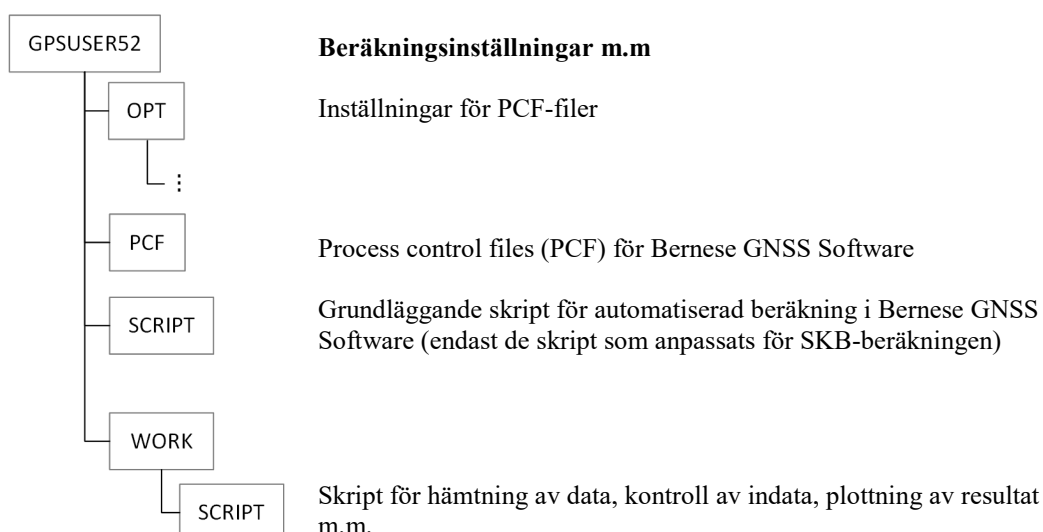
Beskrivning av leveransen

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

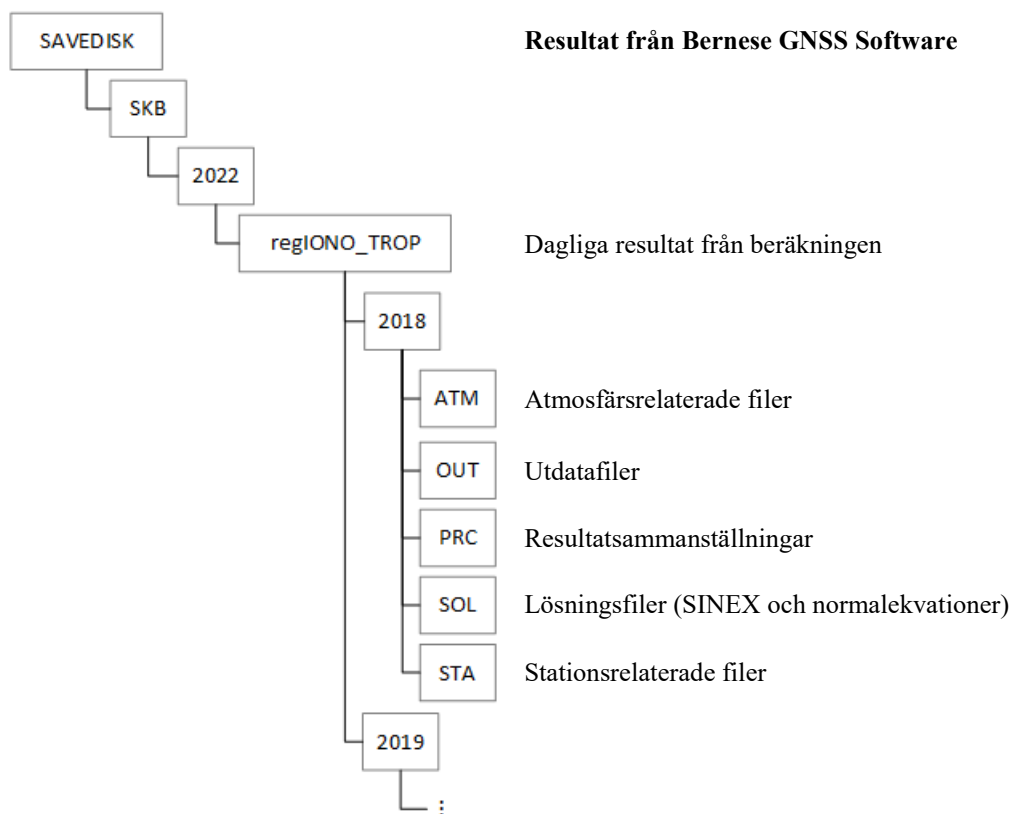
Strukturen följer den standard som brukar användas för beräkningar i Bernese GNSS Software, och innehåller sannolikt mer data än de som SKB primärt är intresserade av. Se Figur 13-4 för närmare beskrivning av resultaten.



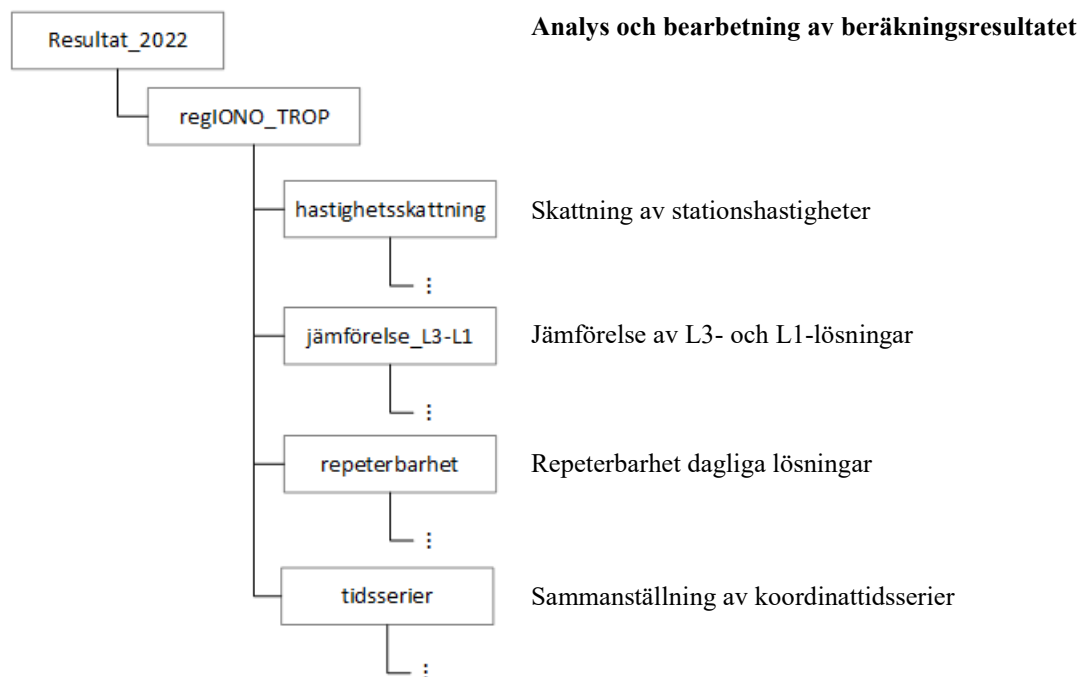
Figur 13-1. Strukturen för indata till GNSS-beräkning med Bernese GNSS Software.



Figur 13-2. Strukturen för inställningar för automatiserad beräkning med Bernese GNSS Software; process control files (PCF) inkl. inställningar och grundläggande skript.



Figur 13-3. Strukturen för dagliga beräkningsresultat från Bernese GNSS Software.



Figur 13-4. Strukturen för redovisning av resultatbearbetningar; daglig repeterbarhet, sammanställning av koordinattidsserier och skattning av stationshastigheter. I tidsserie-mapparna finns dagliga koordinatfiler; både med geocentriska kartesiska 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.