

Rapport
P-21-10
Juni 2021



Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2020

Christina Kempe
Rickard Jäderberg
Lotti Jivall

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING AB

SWEDISH NUCLEAR FUEL
AND WASTE MANAGEMENT CO

Box 3091, SE-169 03 Solna
Phone +46 8 459 84 00
skb.se

SVENSK KÄRNBRÄNSLEHANTERING

ISSN 1651-4416

SKB P-21-10

ID 1934617

Juni 2021

Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2020

Christina Kempe, Rickard Jäderberg, Lotti Jivall
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 nödvändigtvis inte att resultera i en reviderad rapport. Revideringar av data kan också presenteras som supplement, tillgängliga på www.skb.se.

Denna rapport är publicerad på www.skb.se

© 2021 Svensk Kärnbränslehantering AB

Sammanfattning

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

Med drygt två års GNSS-observationer är det ännu för tidigt att skatta hastigheter för SKB-stationerna i Forsmark. Hittills har beräkningarna därför inriktats på att studera de olika alternativen för hantering av jonofärs- och tropofärsfördröjning. Till grund för valet av beräkningsstrategi och modeller ligger bl a daglig repeterbarhet (precisionen) för de olika alternativen, liksom jämförelser av L1- och L3-lösningarna.

Årets studier av de olika alternativen gav samma slutsats som förra årets studie, dvs att använda L1-lösningen från beräkningsalternativet med regional jonofärsmodell och skattning av tropofärsparametrar. I sammanhanget är det viktigt att nämna att jonofärsaktiviteten generellt varit låg under observationsperioden, varför det inte är möjligt att dra några säkra slutsatser om detta alternativ fortfarande kommer att vara det bäst lämpade när jonofärsaktiviteten ökar inom några år.

Baserat på utvärderingen av förra årets beräkning har inställningarna justerats något, bl a avseende anslutning till referenssystemet SWEREF 99. För att möjliggöra framtida studier av relativa rörelser mellan stationerna som orsakas av landhöjningen, har ingen landhöjningskorrektur applicerats innan inpassning av de dagliga lösningarna på SWEREF 99.

De resulterande koordinattidsserierna för SKB-stationerna har studerats visuellt, främst för att se om det förekommer problem på stationerna. Små årstidsvariationer kan ses, liksom enstaka förekomster av snö på GNSS-antennerna.

Summary

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

With just over two years of GNSS observations it is still too early to estimate velocities for the SKB stations in Forsmark. Hence the yearly processing has so far been aimed at studying different options for handling of ionospheric and tropospheric effects. The selection of processing strategy and models is based on, for example, daily repeatability (precision) of the different strategies, as well as comparisons of the L1 and L3 solutions.

The conclusion has not changed since last year's processing, and it is to use the L1 solution from the processing alternative that utilizes a regional ionospheric model in combination with estimation of troposphere parameters. In this context it is important to mention that the ionospheric activity in general has been low during the observation period. Therefore, it is not possible to tell whether this alternative will be the most suitable when the ionospheric activity will increase within a few years.

Based on the evaluation of last year's processing, the settings have been somewhat adjusted, regarding e.g. connection to the reference frame SWEREF 99. To enable future studies of relative movements between the stations, caused by post-glacial land uplift, no land uplift correction was applied before the fit of the daily solutions to SWEREF 99.

The resulting coordinate time series for the SKB stations were examined visually, mainly to find out if there were any problems at the stations. Small annual variations can be seen, as well as occasional occurrences of snow covering the GNSS antennas.

Innehåll

1	Använda förkortningar och begrepp	7
2	Introduktion	9
3	GNSS-stationerna i Forsmark	11
3.1	Utrustning och service	11
3.2	Dataflöde och tillhandahållande av GNSS-data	11
4	Kontinuerliga GNSS-observationer i Forsmark	13
4.1	Tillgängliga GNSS-data	13
4.2	Val av observationer	14
5	Beräkning av GNSS-data	15
5.1	Programvara och beräkningsstrategier	15
5.2	Datascreening	16
5.3	Hantering av jonosfär och troposfär	17
5.4	Referenssystemsanslutning	17
6	Resultat och diskussion	19
6.1	De olika beräkningsalternativen	19
6.2	Allmänt om beräkningarnas interna kvalitet	19
6.3	Daglig repeterbarhet	21
6.4	Jämförelse av olika beräkningsalternativ	22
6.4.1	Hantering av jonosfärsfördröjning	22
6.4.2	Skattning av troposfärparametrar	24
6.4.3	L1- eller L3-lösning	25
6.5	Koordinattidsserier	25
6.5.1	Anslutning till SWEREF 99 på KOBB.0	25
6.5.2	Anslutning till SWEREF 99 på alla stationer	28
6.5.3	Analys av koordinattidsserier	28
7	Fortsatta studier	33
7.1	Skattning av hastigheter för SKB-stationerna	33
7.2	SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv	33
	Referenser	35
Bilaga 1	Översikt utrustning på GNSS-stationer	37
Bilaga 2	Urklipp ur aktivitetsdagbok	39
Bilaga 3	Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen	41
Bilaga 4	Beskrivning av leveransen	43

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).
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).
FTP	File Transfer Protocol; filöverföringsprotokoll.
Galileo	Europeiskt satellitnavigeringssystem.
Glonass	Globalnaja navigatsionnaja sputnikovaja sistema; ryskt satellitnavigeringssystem.
GMF	Global Mapping Function.
GNSS	Global Navigation Satellite Systems; ett samlingsbegrepp för satellitnavigeringssystem.
GPS	Global Positioning System; amerikanskt satellitnavigeringssystem.
Helmert-transformation	Likformighetstransformation, här i tre dimensioner; används för transformation mellan två tredimensionella koordinatsystem. Transformationen beskrivs med tre translationer, tre rotationer och en skalförändring (eller ett urval av dessa).
IERS	International Earth Rotation Service.
IGb14	Uppdaterad version av IGS14.
IGS	International GNSS Service.
IGS14	IGS-realisering av ITRF2014 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.
L3	Jonosfärsfri linjärkombination, $L3 = 2.546 \times L1 - 1.546 \times L2$; används för att eliminera jonosfärens effekt på GNSS-signalerna.
L4	Geometrifri linjärkombination, $L4 = L1 - L2$; används vid skattning av jonosfärsmodeller.
L5	En av GPS-systemets bärvågor; L5 har frekvensen 1176.45 MHz.
LTO	Linear Tape-Open; teknologi för lagring av data på magnetband.
Multistationsutjämning	Beräkning av koordinatdifferenser, genom gemensam utjämning av GNSS-observationer från fler än två stationer.
NKG	Nordiska kommissionen för geodesi.
Periodbortfall	Bortfall av ett antal hela våglängder i den kontinuerliga fasmätningen på GNSS-signalens bärvåg, som beror på att GNSS-mottagaren har tappat signallåsningen.

Tabell 1-1. Forts.

Begrepp	Förklaring
Periodobekant	Obekant antal hela våglängder mellan satellit och GNSS-mottagare (station) vid inledningen av en fasmätning.
PPP	Precise Point Positioning.
RINEX	Receiver Independent Exchange format; utbytesformat för GNSS-observationer.
RMS	Root Mean Square; kvadratisk medelfel.
SINEX	Solution Independent Exchange format; utbytesformat för GNSS-lösningar.
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.
VMF	Vienna Mapping Function.
ZPD	Zenith Path Delay.

2 Introduktion

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

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



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

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

Planen är att data ska analyseras årligen. Detta är den andra analysen av data från de fem permanenta GNSS-stationerna. I rapporten från förra årets beräkning av GNSS-nätet (Kempe et al. 2020) beskrivs beräkningsprogramvara och -strategier utförligt. Här ges en sammanfattning samt beskrivning av de förändringar som gjorts inför årets beräkning.

Kortfattat kan processen beskrivas i ett antal olika steg:

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

Den första analysen av SKB-nätet, som gjordes i början av 2020, var inriktad på att testa och jämföra olika beräkningsstrategier; dels lösningar baserade på olika GNSS-signaler eller linjärkombination av dessa, dels olika sätt att hantera jonosfärs- och troposfärsfördröjning. Baserat bl a på resultaten från den första analysen har beräkningsinställningarna justerats något inför denna andra årliga analys; se vidare avsnitt 5.2 och 5.4.

Koordinattidsserierna är ännu för korta för att hastigheter ska kunna skattas, varför tidsserierna endast har studerats visuellt för att detektera eventuella problem.

3 GNSS-stationerna i Forsmark

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

3.1 Utrustning och service

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

Service och tillsyn av stationerna har under 2020 utförts i samband med ett driftstopp för stationen Lillkobben i november. Driftstoppet berodde på att fästet till vindgeneratoren havererat och hängde ner över solcellerna varpå laddningen av batterierna uteblev. Under samma resa upptäcktes ett likadant fel med trasigt fäste till vindgeneratoren på stationen Västra Måsklinten varpå denna byttes ut innan ett driftstopp inträffat. Utdrag ur aktivitetsdagbok för åren 2018–2020 finns i bilaga 2.

Ytterligare driftstopp skedde omkring årsskiftet 2020–2021 på samtliga stationer som saknar elnätsanslutning (eng. *off grid*) – Lillkobben, Norra Biotesten och Västra Måsklinten – på grund av väderförhållandena.

Det framkom då tydligt att dessa stationer är beroende av så många soltimmar och starka vindar som möjligt, speciellt under de mörkaste månaderna. Västra Måsklinten hade ett driftstopp som varade från dag 352 (dvs 17 december) år 2020 fram till årsskiftet och 34 dagar in på nuvarande år (dvs 3 februari 2021), vilket också var den station som hade det längsta driftstoppet. Lillkobben och Norra Biotesten hade 10 respektive 14 dagars driftstopp under december 2020.

En önskad utgång vore att helt få bort driftstopp som beror på de lokala väderförhållandena. För att uppnå detta bör en översyn av nuvarande utrustning ske och eventuellt uppgradera den, samt kontinuerligt se till att samtlig utrustning är hel och väl lämpad för de aktuella förhållandena. Möjlighet till att ha reservutrustning nära till hands kan också vara ett alternativ.

3.2 Dataflöde och tillhandahållande av GNSS-data

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

4 Kontinuerliga GNSS-observationer i Forsmark

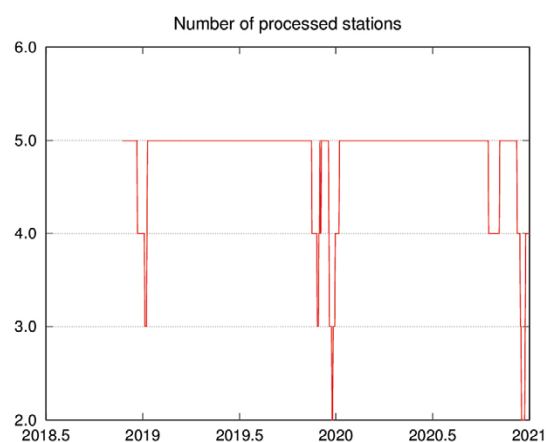
4.1 Tillgängliga GNSS-data

GNSS-data för perioden 24 november 2018 till 31 december 2020 har beräknats.

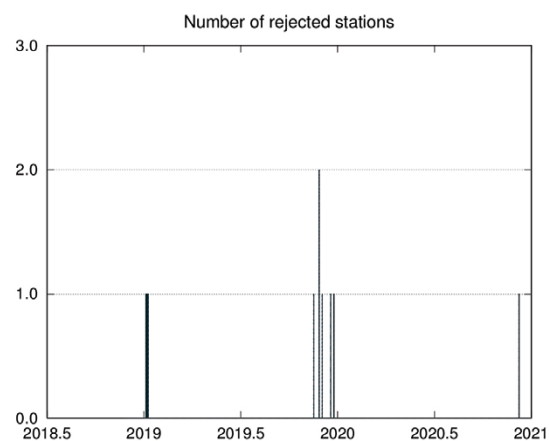
För fyra dygn i slutet av 2018 fanns observationsdata endast från KOB.B.0, varför det inte gick att genomföra beräkning av nätet dessa dagar. Utöver detta är det 93 dygn där observationsfiler från en eller flera stationer saknas; se figur 4-1.

För elva dygn har observationsfilen för en – eller i enstaka fall två – av stationerna förkastats på grund av för kort observationstid; se figur 4-2.

Totalt är det 99 av 765 dygnslösningar som saknar koordinater för en eller flera stationer.



Figur 4-1. Antal indatafiler i GNSS-beräkningen varje dygn. För 93 dygn saknas data från en eller flera stationer. Skalan på den horisontella axeln är decimala år.



Figur 4-2. Antal stationer per dygn som har förkastats på grund av för kort observationsfil.

4.2 Val av observationer

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

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

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

Enligt planen kommer nästa ITRF-realiserings att lanseras hösten 2021 (Institut Géographique National 2019), men tidplanerna är ofta mycket osäkra i dessa sammanhang. När ITRF-realiserings väl är lanserad så behöver IGS ta fram sin egen version av referenssystemsrealiserings, liksom en uppdaterad lista över antenmodeller, innan den nya realiseringens kan börja användas i praktiken. Sammantaget gör detta att man nog inte kan räkna med att en ny version av ITRF kommer i bruk förrän tidigast under den senare delen av 2022.

5 Beräkning av GNSS-data

I rapporten från förra årets beräkning av GNSS-nätet (Kempe et al. 2020) beskrivs beräkningsprogramvara och -strategier utförligt, liksom de olika alternativen för modellering av jonosfärens och troposfärens effekter på GNSS-signalerna. Här ges en sammanfattning samt beskrivning av de förändringar som gjorts inför årets beräkning.

5.1 Programvara och beräkningsstrategier

För beräkning av GNSS-observationerna har Bernese GNSS Software version 5.2 (release 2020-08-27) använts. Programvaran, som är utvecklad vid universitet i Bern (Dach et al. 2015), bygger på sofistikerade, vetenskapliga algoritmer och modeller. De viktigaste parametrarna och modellerna redovisas i tabell 5-1.

Dagliga koordinater i skattas i en minsta-kvadratutjämning av respektive dygns GNSS-observationer som har omformats till s k dubbeldifferenser. Utjämningen resulterar i dagliga koordinatfiler och dagliga filer med normalekvationer i standardformatet SINEX. Innan skattning av koordinaterna har avvikande observationer 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 s k final-produkter från CODE (Dach et al. 2020). Den 17 maj 2020 började man använda den uppdaterade referenssystemsrealiseringen IGB14 i stället för den tidigare IGS14. Enligt Rebischung (2020) förväntas inte bytet påverka kontinuiteten i produktserien.

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

Indata	
GNSS-observationer	GPS/Glonass-data i RINEX-format, 30 sek-intervall
Bandata	CODE:s final-produkter
Referenssystem	IGS14/IGb14 (GNSS-beräkning) SWEREF 99 18 00 ellh (koordinatlösningar)
Antennmodeller	Absoluta antennmodeller igs14.atx, inkl. typmodell för TPSCR.G5 NONE (används även för TPSCR.G5 OSPS)
Parametrar och modeller	
Observabler	Dubbeldifferenser av bärvågsobservationer Elevationsmask 3° Elevationsberoende viktning L1 och 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
Jonosfär	a) Regional jonsfärsmodell b) CODE:s globala jonsfärsmodell c) L3 eliminerar jonsfäreffekten
Troposfär	a) A priori-modell GMF (Böhm et al. 2007) för datascreening, preliminära (flyt-) lösningar och för lösning av periodobekanta. A priori-modell VMF (Böhm et al. 2006) för de slutliga lösningarna där ZPD skattas varje timme. b) A priori-modell GMF för datascreening och preliminära (flyt-) lösningar. A priori-modell VMF för de slutliga lösningarna. Ingen skattning av ZPD.
Tidjord	Hantering av tidjord i Bernese GNSS Software 5.2 görs enligt IERS conventions 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 KOBB.0 (sigma 0.0001 m). Nätet ansluts till SWEREF 99 genom translation på KOBB.0.

En sammanfattning av beräkningsgången finns i bilaga 3.

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

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

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

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

Inför årets beräkning har inställningarna för datascreening och referenssystemsanslutning justerats (se avsnitt 5.2 och 5.4). Det valda lösningsalternativet avseende hantering av jonosfär och troposfär är detsamma som förra året, dvs att skatta regionala jonosfärmodeller och lösa troposfärparametrar; se vidare avsnitt 6.4.1 och 6.4.2.

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

5.2 Datascreening

Vid förra årets beräkning screenades alla data i beräkningen, dvs screeningen gjordes med 30-sekundersintervall, vilket tar relativt lång tid. För att minska tidsåtgången vid årets beräkning justerades inställningarna för datascreeningen. Screeningen görs nu med 180-sekundersintervall vilket är att se som standardinställningen. Vinsten med att screena alla data är inte tillräckligt stor för att motivera den ökade tidsåtgången och algoritmerna för lösning av periodobekanta är tillräckligt robusta för att kunna hantera en viss mängd oscreenade data utan signifikant försämring¹.

Den ändrade datascreeningen gör att andelen förkastade data är något mindre än vid förra årets beräkning (se figur 6-1). För att se om den ändrade datascreeningen skulle ge någon betydande inverkan på de slutliga koordinaterna, så jämfördes koordinaterna från årets beräkning av 2018–2019 års observationer med föregående års beräkning. I jämförelsen ingår 399 dagliga lösningar från beräkningsalternativet regIONO_TROP.

Eftersom även anslutningen till SWEREF 99 ändrats mellan de årliga beräkningarna, så gjordes jämförelsen på de dagliga IGS14/IGb14-koordinaterna från L1-, L2- resp. L3-lösningarna. För varje daglig lösning har stationskoordinaterna jämförts och RMS har beräknats. I tabell 5-2 visas genomsnittligt RMS-värde liksom det maximala dagliga RMS-värdet. Den förändrade datascreeningen får alltså mycket liten påverkan på de beräknade koordinaterna.

Tabell 5-2. Jämförelse av dagliga koordinater, från årets och föregående års beräkning av 2018–2019 års observationer. RMS för alla dagliga lösningar. Enhet: mm.

	L1	L2	L3
Medel (dagliga RMS)	0.02	0.05	0.04
Max (dagliga RMS)	0.22	0.28	0.24

¹ **Fridez P, 2020.** Sampling interval for data screening? E-postkonversation med supporten för Bernese GNSS Software, University of Bern, 23–27 januari 2020.

5.3 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.

För hantering av jonosfäreffekten har dels CODE:s globala jonosfärmodeller (Dach et al. 2020), dels regionala jonosfärmodeller baserade på data från SKB-nätet, använts vid beräkning av L1- och L2-lösningarna. Vid beräkning av L3-lösningarna används jonosfärmodellen för beräkning av högre ordningens jonosfärskorrekationer.

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).

Dessutom har en lösning beräknats utan att använda jonosfärmodell, främst i testsyfte.

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 GNSS-signaler och kan därför inte elimineras genom att bilda kombinationer av GNSS-signalerna. Troposfäreffekten måste i stället modelleras eller skattas ur observationsdata.

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

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

För små GNSS-nät, som SKB-nätet, går det inte att skatta troposfärparametrar för alla stationer eftersom korrelationen mellan dem blir för hög. På grund av detta har troposfärparametrarna skattats relativt en referensstation; i detta fall KOB0.

Dessutom har ett antal lösningar beräknats, där troposfärparametrar inte har skattats. Även i dessa fall har GMF använts som a priori-modell och mappningsfunktion i datascreening, för de preliminära lösningarna och vid lösning av periodobekanta, samt VMF som a priori-modell och mappningsfunktion för de slutliga lösningarna.

5.4 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, kommer nätets geometri från GNSS-beräkningen att bevaras, vilket är lämpligt i detta fall.

För GNSS-beräkningen används referenssystemet IGS14/IGb14, vilket är referenssystemet för satellitbanorna. A priori-koordinater i IGS14, epok 2010.0, för alla stationer har tagits fram genom en tidigare PPP-beräkning, som i stora drag följer rekommendationerna i Dach et al. (2015). Eftersom inga skattade hastigheter i IGS14 finns för SKB-stationerna, så används hastighetsmodellen NNR-NUVEL 1A (DeMets et al. 1994) för att extrapolera IGS14-koordinaterna till observationsepoken. Osäkerheten i PPP-lösningen och att det endast finns s k NUVEL-hastigheter gör att IGS14-koordinaterna ska betraktas som ungefärliga i sitt absolutläge. För analyserna av SKB-nätet vill man dessutom använda 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 (dvs referenssystemet representerar landets form sommaren 1999). Normalt görs därför en landhöjningskorrektur av IGS14/IGb14-koordinaterna mellan observationsepoken och epok 1999.5 innan de 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 (dvs i epok 1999.5) på de andra stationerna, men den relativa skillnaden i landhöjning kommer att synas som rörelser (utom för den station som hållits fast i inpassningen).

De slutliga lösningarna har transformerats till SWEREF 99 genom att göra en translation på KOB.B.0 till de sk definitiva SWEREF 99-koordinaterna (Alfredsson et al. 2019) efter översynen av SWEPOS-stationernas koordinater som gjorts under 2020 (Lantmäteriet 2021).

När man ansluter GNSS-lösningarna på endast en station så innebär koordinatöversynen att nätet parallellförfllyttas en aning jämfört med förra årets beräkning och analys.

6 Resultat och diskussion

6.1 De olika beräkningsalternativen

För SKB-nätet har ett antal olika beräkningar gjorts för jämförelse och utvärdering; se tabell 6-1. Varje beräkningsalternativ innehåller såväl L1- och L2- som L3-lösningar.

Tabell 6-1. De olika beräkningarna av SKB-nätet.

Benämning	Parametrar vid beräkning
regIONO_TROP	Regional jonofärsmodell; skattning av tropofärsparametrar
globIONO_TROP	Global jonofärsmodell; skattning av tropofärsparametrar
noIONO_TROP	Ingen jonofärsmodell; skattning av tropofärsparametrar
regIONO_noTROP	Regional jonofärsmodell; ingen skattning av tropofärsparametrar
globIONO_noTROP	Global jonofärsmodell; ingen skattning av tropofärsparametrar

6.2 Allmänt om beräkningarnas interna kvalitet

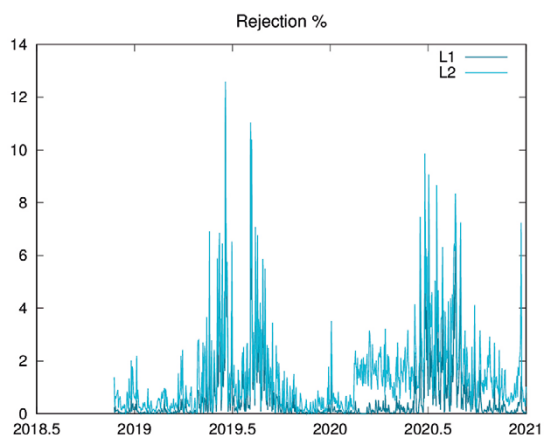
Andelen observationer som förkastats i datascreeningen (se tabell 6-2 och figur 6-1), andelen lösta periodobekanta (tabell 6-3) och RMS för de dagliga lösningarna (tabell 6-4) i respektive beräkningsalternativ varierar minimalt, beroende på vilka strategier som valts för att hantera jonofärs- respektive tropofärsfördröjning.

Tabell 6-2. Andel förkastade observationer i de olika beräkningsalternativen.

	regIONO_TROP (%)	globIONO_TROP (%)	no_IONO_TROP (%)	regIONO_noTROP (%)	globIONO_noTROP (%)
L1 medel	0.61	0.61	0.62	0.64	0.64
L1 max	11.61	11.59	11.59	11.72	11.72
L1 min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
L2 medel	1.43	1.43	1.44	1.45	1.45
L2 max	12.59	12.50	12.58	12.70	12.69
L2 min	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02

Tabell 6-3. Andel lösta periodobekanta för de dagliga lösningarna från de olika beräkningsalternativen.

	regIONO_TROP (%)	globIONO_TROP (%)	noIONO_TROP (%)	regIONO_noTROP (%)	globIONO_noTROP (%)
L1 medel	99.95	99.95	99.95	99.95	99.95
L1 max	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
L1 min	88.10	88.10	88.10	88.10	88.10
L2 medel	99.70	99.70	99.70	99.71	99.71
L2 max	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
L2 min	88.30	88.30	88.30	88.30	88.30

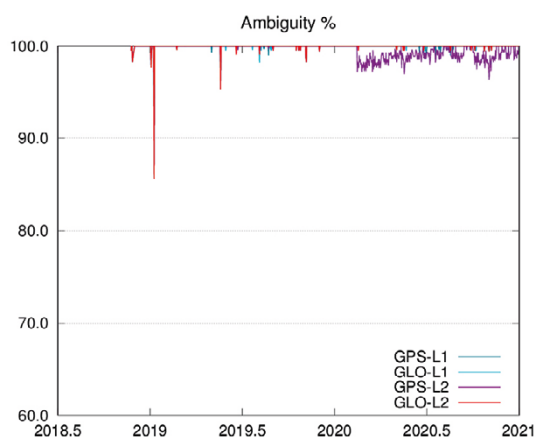


Figur 6-1. Andelen förkastade observationer varierar över året, men ligger i allmänhet under 5 % per dag. Figuren avser beräkningsalternativet regIONO_TROP, men ser ungefär lika ut för alla beräkningsalternativ.

Tabell 6-4. RMS i slutlösningarna för de olika beräkningsalternativen.

		regIONO_TROP (mm)	globIONO_TROP (mm)	noIONO_TROP (mm)	regIONO_noTROP (mm)	globIONO_noTROP (mm)
L1	medel	1.31	1.30	1.32	1.34	1.34
	max	2.4	2.4	2.4	2.5	2.5
	min	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
L2	medel	1.59	1.59	1.61	1.62	1.62
	max	2.7	2.7	2.7	2.7	2.7
	min	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
L3	medel	0.75	0.75	0.75	0.76	0.76
	max	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	min	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

I figur 6-2 ses tydligt att andelen lösta periodobekanta för GPS L2 sjunker något i början av 2020, närmare bestämt den 14 februari. I figur 6-1 syns även en ökning av andelen förkastade L2-data vid samma tidpunkt. Det sammanfaller med tidpunkten för en förändring av signalstyrkan från nyare generationers GPS-satelliter (Steigenberger et al. 2020). Mottagartypen som används på GNSS-stationerna i Forsmark – Trimble NetR9 – har sedan dess ett ökat antal s k periodbortfall (eng. *cycle slips*), vilket i sin tur leder till att det blir fler periodobekanta att lösa. Därmed ökar risken att alla periodobekanta inte 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.



Figur 6-2. Andel lösta periodobekanta per satellit-system och frekvens. Figuren avser beräkningsalternativet regIONO_TROP men ser ungefär lika ut för alla beräkningsalternativ.

Sannolikt har den större andelen förkastade data och den något minskade andelen lösta periodobekanta – som fortfarande kan betraktas som hög – för GPS L2 ingen påverkan på slutresultatet – de dagliga koordinaterna – eftersom mättiderna är långa. Repeterbarheten för de dagliga lösningarna (se tabell 6-5 och tabell 6-6) är i stort sett densamma som vid förra årets beräkning, och ingen synlig påverkan på koordinattidsserien kan observeras.

6.3 Daglig repeterbarhet

Repeaterbarheten för de dagliga lösningarna, som visas i tabell 6-5 och tabell 6-6, är det främsta kriteriet för valet av den eller de lösningar som kan vara aktuella att använda vid resultatredovisningen.

Tabell 6-5. Daglig repeterbarhet, uttryckt som RMS, för de lösningar där troposfärparametrar skattats.

		reglONO_TROP (mm)	globlONO_TROP (mm)	nolONO_TROP (mm)
L1	N	0.66	0.64	0.67
	E	0.33	0.34	0.34
	U	0.89	0.88	0.92
L2	N	0.76	0.71	0.79
	E	0.35	0.36	0.39
	U	0.99	0.96	1.03
L3	N	0.63	0.63	0.63
	E	0.41	0.41	0.41
	U	1.12	1.12	1.12

Repeaterbarheten – precisionen – för L1- och L2-lösningarna är på samma nivå för de beräkningar som gjorts med regional respektive global jonosfärmodell, möjligen med någon fördel för den globala jonosfärmodellen. Som förväntat är repeterbarheten något sämre i den beräkning där ingen jonosfärmodell använts.

L3-lösningarna har jämförbar repeterbarhet i alla tre beräkningarna, oavsett om jonosfärmodell använts eller inte. Eftersom L3 är en linjärkombination som eliminerar jonosfäreffekten, har det ingen betydelse vilken jonosfärmodell som används. Jonosfärmodellen används i detta fall endast för lösning av periodobekanta samt för högre ordningens jonosfärskorrekationer.

Precisionen i N-komponenten är ungefär densamma i L3-lösningarna, som i L1-lösningarna med regional eller global jonosfärmodell. L3 har dock aningen sämre repeterbarhet i E och U. 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.

Tabell 6-6. Daglig repeterbarhet, uttryckt som RMS, för de lösningar där troposfärparametrar inte har skattats.

		reglONO_noTROP (mm)	globlONO_noTROP (mm)
L1	N	0.67	0.65
	E	0.35	0.35
	U	1.10	1.08
L2	N	0.76	0.71
	E	0.37	0.37
	U	1.15	1.10
L3	N	0.64	0.64
	E	0.42	0.42
	U	1.20	1.20

Att skatta troposfärparametrar eller inte, gör mycket liten skillnad på den dagliga repeterbarheten; jämför tabell 6-5 och tabell 6-6. Sannolikt beror detta på att SKB-stationerna ligger nära varandra, miljön kring dem är likartad och höjdskillnaderna mellan stationerna är små.

För både L1-, L2- och L3-lösningarna är repeterbarheten i Up-komponenten något bättre i de beräkningsalternativ där troposfärparametrar skattas, än i de lösningar där troposfärparametrar inte skattas.

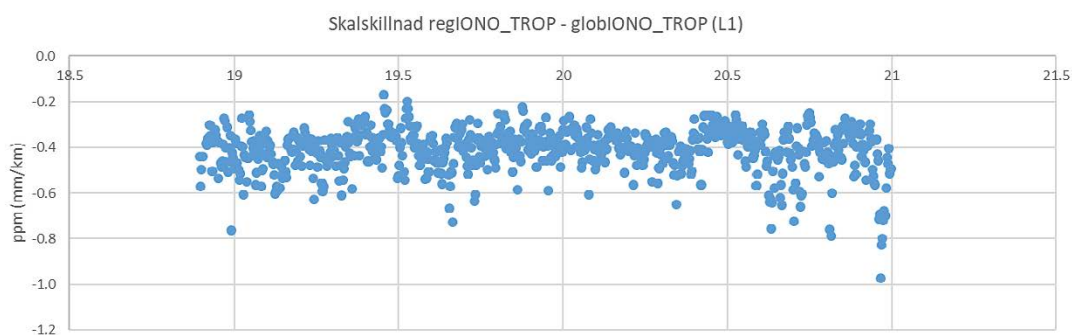
6.4 Jämförelse av olika beräkningsalternativ

6.4.1 Hantering av jonosfärsfördröjning

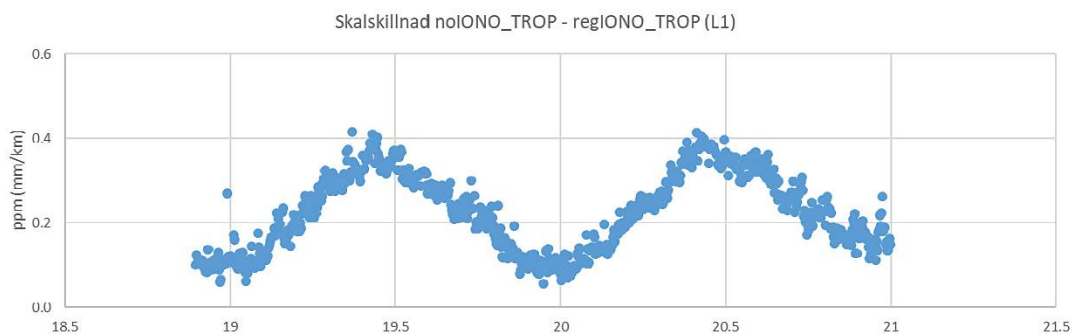
Repeterbarheten för de dagliga lösningarna, som redovisas i tabell 6-5 och tabell 6-6, visar att det är en fördel att använda en jonosfärmodell, om man avser att låta L1-lösningen vara slutlösning. Det kommer sannolikt att bli än tydligare då jonosfäraktiviteten ökar.

För att vidare studera hur väl de båda jonosfärmodellerna hanterar jonosfärsfördröjningen jämfördes dagliga L1-lösningar från beräkningsalternativen `regIONO_TROP` och `globIONO_TROP`; se figur 6-3. Jämförelsen gjordes genom Helmert-transformationer där fyra parametrar – tre translationer och skala – löstes för att se om GNSS-nätets skala skiljer mellan de två alternativen.

Vid jämförelse av `regIONO_TROP`-lösningen med lösningen utan jonosfärmodell, `noIONO_TROP`, så syns att skalskillnaden mellan lösningarna varierar över året; se figur 6-4. En liknande signal syns vid motsvarande jämförelse av `globIONO_TROP`-lösningen med lösningen utan jonosfärmodell.



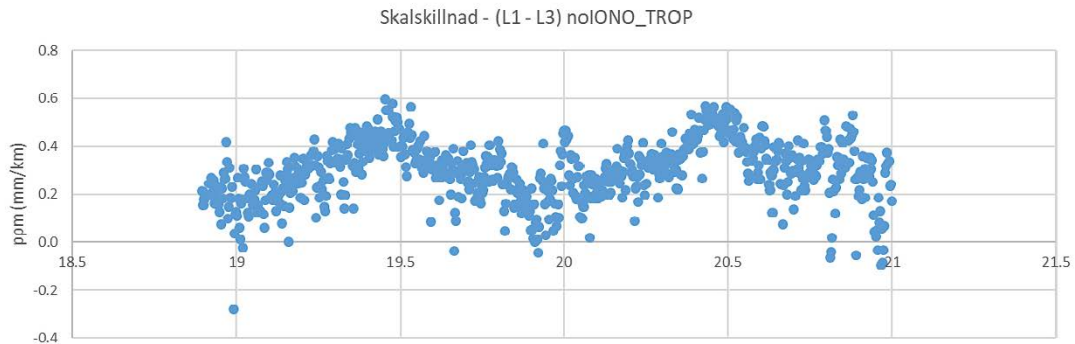
Figur 6-3. Genomsnittlig skillnad i skala mellan de dagliga L1-lösningarna från beräkningsalternativen `regIONO_TROP` och `globIONO_TROP` är -0.41 ppm (mm/km) (`regIONO_TROP` minus `globIONO_TROP`). Skalan på den horisontella axeln är decimala år från år 2000.



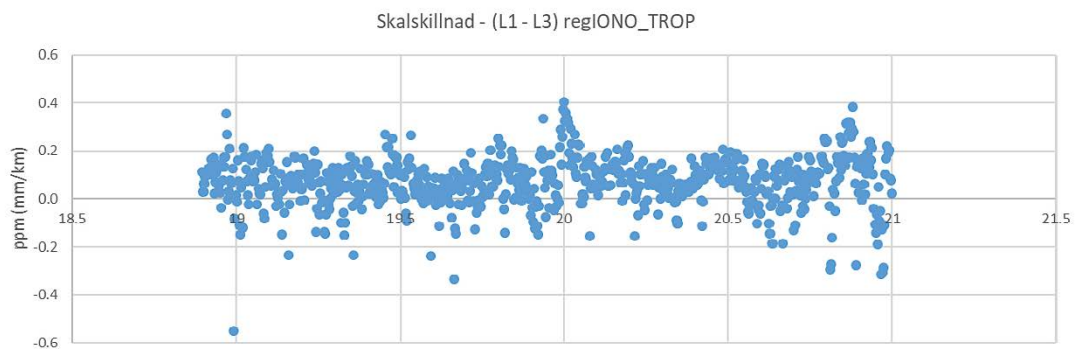
Figur 6-4. Skillnaden i skala mellan de dagliga L1-lösningarna från beräkningsalternativen `noIONO_TROP` och `regIONO_TROP` (`noIONO_TROP` minus `regIONO_TROP`) varierar över året.

För att visa om den årstidsrelaterade skalvariationen härrör från den okorrigerade jonosfärsfördröjningen i noIONO_TROP-lösningen eller från de använda jonosfärmodellerna jämfördes L1- och L3-lösningarna från respektive beräkningsalternativ. I L3-lösningarna ska ju jonosfärs effekten elimineras.

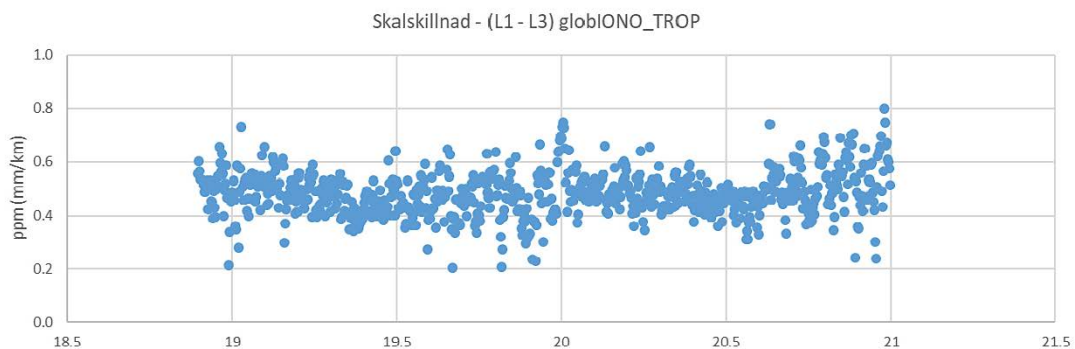
Den årstidsrelaterade variationen i skalskillnad kan ses mellan L1- och L3-lösningarna i alternativet noIONO_TROP (figur 6-5), men varken i regIONO_TROP (figur 6-6) eller globIONO_TROP (figur 6-7).



Figur 6-5. I beräkningsalternativet noIONO_TROP syns en årstidsvariation i skalskillnad mellan de dagliga L1- och L3-lösningarna (L1 minus L3).



Figur 6-6. I beräkningsalternativet regIONO_TROP syns ingen årstidsvariation i skalskillnaden mellan dagliga L1- och L3-lösningar. Den genomsnittliga skalskillnaden är 0.07 ppm.



Figur 6-7. I beräkningsalternativet globIONO_TROP syns ingen årstidsvariation i skalskillnaden mellan dagliga L1- och L3-lösningar. Den genomsnittliga skalskillnaden är 0.48 ppm.

Baserat på dessa jämförelser dras slutsatsen att den årstidsrelaterade signalen från jonosfären härrör från den okorrigerade jonosfärsfördröjningen i noIONO_TROP-alternativets L1-lösning.

I regIONO_TROP-beräkningen är skalskillnaden mellan L1- och L3-lösningarna mindre än i globIONO_TROP-alternativet (0.07 ppm resp. 0.48 ppm) och det tycks alltså som att den regionala jonosfärmodellen tar omhand jonosfärsfördröjningen på ett bättre sätt än den globala modellen, som inte kan eliminera skalfelet i L1-lösningen helt. Den regionala jonosfärmodellen är därför huvudalternativ för hantering av jonosfären vid beräkning av SKB-nätet.

Eftersom observationerna från SKB-nätet hittills har gjorts under en period då jonosfäraktiviteten är låg, är det svårt att dra några säkra slutsatser om vilken jonosfärmodell som är mest lämpad – i synnerhet för observationer som kommer att göras då jonosfäraktiviteten är högre. Motsvarande jämförelser av olika jonosfärmodeller bör då göras på nytt, eftersom kraven på jonosfärmodellen ökar med högre jonosfäraktivitet. T ex kan det bli viktigare att jonosfärmodellens har tillräcklig upplösning i tid och rum, vilket i sin tur betyder att mängden indata till modellen måste vara tillräcklig för att kunna skatta mängden parametrar med tillräcklig säkerhet.

6.4.2 Skattning av troposfärparametrar

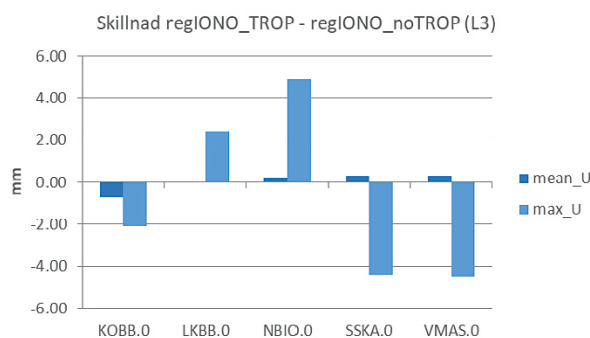
Eventuella risker med att skatta troposfärparametrar beskrivs närmare i Kempe et al. (2020). I detta fall bedömdes riskerna vara relativt små, eftersom likadana antenner – och liknande antennenmonument – används på alla SKB-stationer. Effekten av eventuellt bristfälliga antennenmodeller förstärks vid jonosfärsfri linjärkombination, och för närvarande är inte heller avsikten att använda L3-lösningen för koordinatberäkning.

Eftersom nätet har liten utbredning både i plan och höjd förväntas normalt ingen större skillnad i troposfärsfördröjningen mellan stationerna. Därmed kan skillnaderna mellan L3-lösningar där troposfärparametrar skattas eller inte, användas för att upptäcka eventuella problem med att antennenmodellen inte är representativ. Därför jämfördes dagliga L3-lösningar från beräkningsalternativen regIONO_noTROP och regIONO_TROP. Jämförelsen gjordes genom Helmert-transformationer där fyra parametrar – tre translationer och skala – löstes.

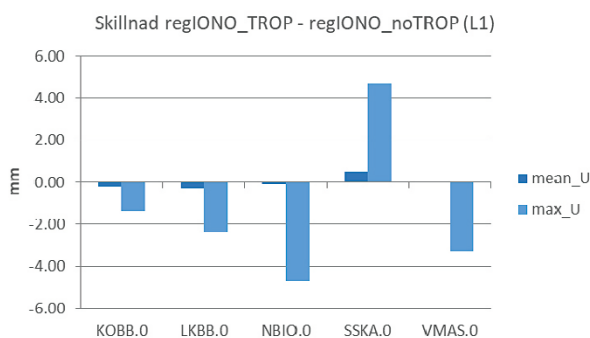
Inte heller årets jämförelse påvisar någon större risk med att skatta troposfärparametrar vid beräkning av SKB-nätet. Figur 6-8 visar att den genomsnittliga skillnaden mellan de två beräkningsalternativen är liten för alla stationer.

Eftersom L1-lösningar är huvudalternativet för koordinatberäkningen gjordes motsvarande jämförelse även av L1-lösningarna från beräkningsalternativen regIONO_noTROP och regIONO_TROP.

L1-lösningarna är mindre känsliga för skattning av troposfärparametrar och eventuella brister i antennenmodeller. Figur 6-9 visar att den genomsnittliga koordinatskillnaden mellan beräkningsalternativen regIONO_TROP och regIONO_noTROP är liten för alla stationer.



Figur 6-8. Genomsnittliga residualer (mörkblå staplar) i Up-komponenten, från Helmert-transformation mellan dagliga L3-lösningar från beräkningsalternativen regIONO_TROP och regIONO_noTROP för respektive station i SKB-nätet. De ljusare blå staplarna visar största residual för respektive station.



Figur 6-9. Genomsnittliga residualer (mörkblå staplar) i Up-komponenten, från Helmert-transformation mellan dagliga L1-lösningar från beräkningsalternativen regIONO_TROP och regIONO_noTROP för respektive station i SKB-nätet. De ljusare blå staplarna visar största residual för respektive station.

6.4.3 L1- eller L3-lösning

SKB-nätet är uppbyggt endast av korta baslinjer – som mest ca 7,5 km mellan NBIO.0 och SSKA.0 – vilket talar för att använda L1-lösningar. Precisionen i L1-lösningarna är också något bättre – främst i E- och Up-komponenterna – än L3-lösningarna (se tabell 6-5), och därför betraktas L1 för närvarande som huvudlösning för beräkningen av SKB-nätet.

Med tanke på att precisionen i L3-lösningarna är bättre än förväntat, så kan det bli aktuellt att överväga L3 som slutlösning – efter förnyad analys – under perioder då jonosfärsaktiviteten är högre.

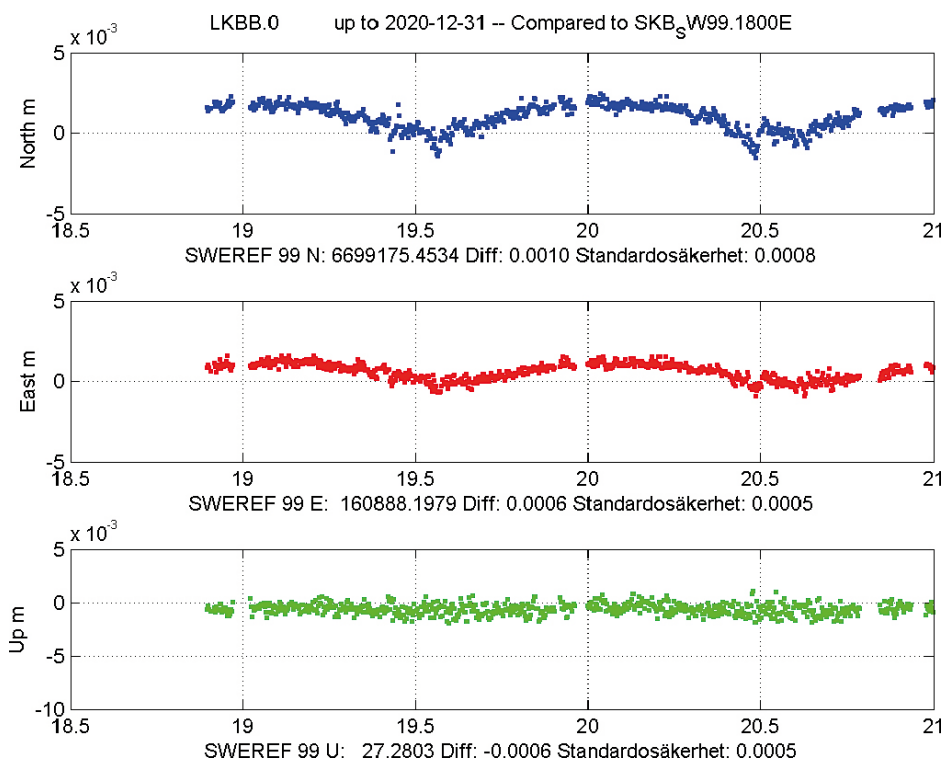
6.5 Koordinattidsserier

Den valda lösningen är L1 från beräkningsalternativet regIONO_TROP, enligt resonemangen ovan.

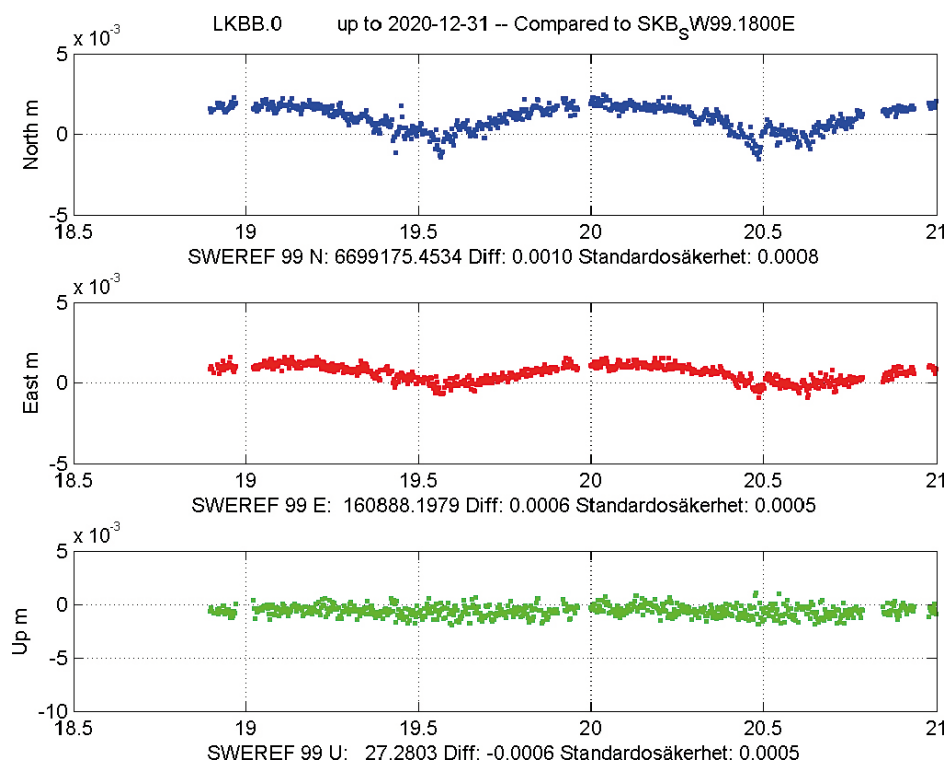
De dagliga koordinatlösningarna från GNSS-beräkningen har transformerats från geocentriska kartesiska koordinater i SWEREF 99, till plana koordinater i SWEREF 99 18 00 samt ellipsoidhöjd, för att sedan sammanfogas till stationsvisa tidsserier.

6.5.1 Anslutning till SWEREF 99 på KOBB.0

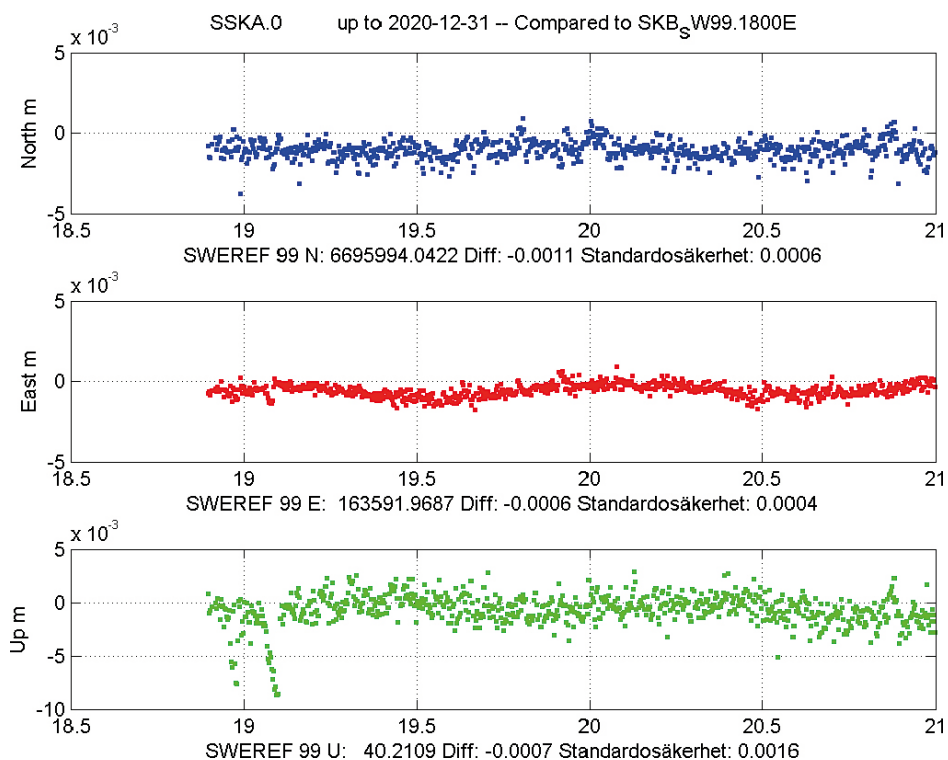
Koordinatlösningarna är anslutna till SWEREF 99 genom translation – dvs Helmert-transformation där tre translationer lösts – på KOBB.0 för att så småningom kunna analysera eventuella relativa rörelser mellan stationerna. Det innebär att koordinattidsserien för KOBB.0 inte är relevant att redovisa eftersom stationen i praktiken har hållits fast i anslutningen. Koordinattidsserier för de övriga stationerna visas i figur 6-10 till figur 6-14.



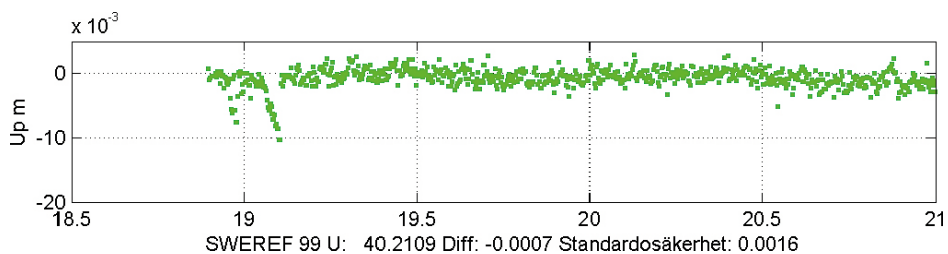
Figur 6-10. Koordinattidsserie för LKBB.0, baserad på koordinater från L1-lösningen från beräkningsalternativet *regIONO_TROP*. Skalan på de horisontella axlarna är decimala år från år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på *KOBB.0*.



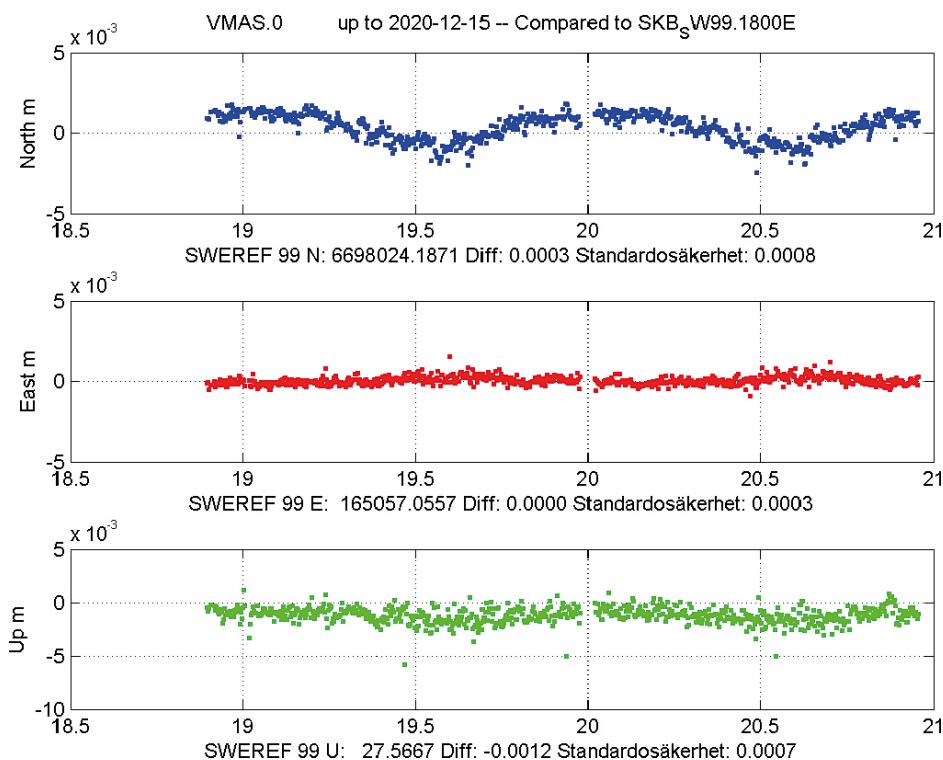
Figur 6-11. Koordinattidsserie för NBIO.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på *KOBB.0*.



Figur 6-12. Koordinattidsserie för SSKA.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB_B.0. Omkring årsskiftet 2018–2019 samlades snö på antennen, vilket gav avvikande koordinater i Up-komponenten. På grund av den valda vertikala skalan syns inte alla avvikande positioner här; se även figur 6-13.



Figur 6-13. Koordinattidsserie för Up-komponenten för SSKA.0, där den vertikala skalan är vald så att alla koordinatlösningar i tidsserien visas.



Figur 6-14. Koordinattidsserie för VMAS.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord genom translation på KOB.B.0.

6.5.2 Anslutning till SWEREF 99 på alla stationer

För att få information om KOB.B.0 gjordes även en alternativ anslutning av de dagliga lösningarna till SWEREF 99, baserad på alla tillgängliga stationer. Även denna anslutning är en Helmert-transformation med tre translationer. Koordinattidsserier för alla stationerna visas i figur 6-15 till figur 6-19.

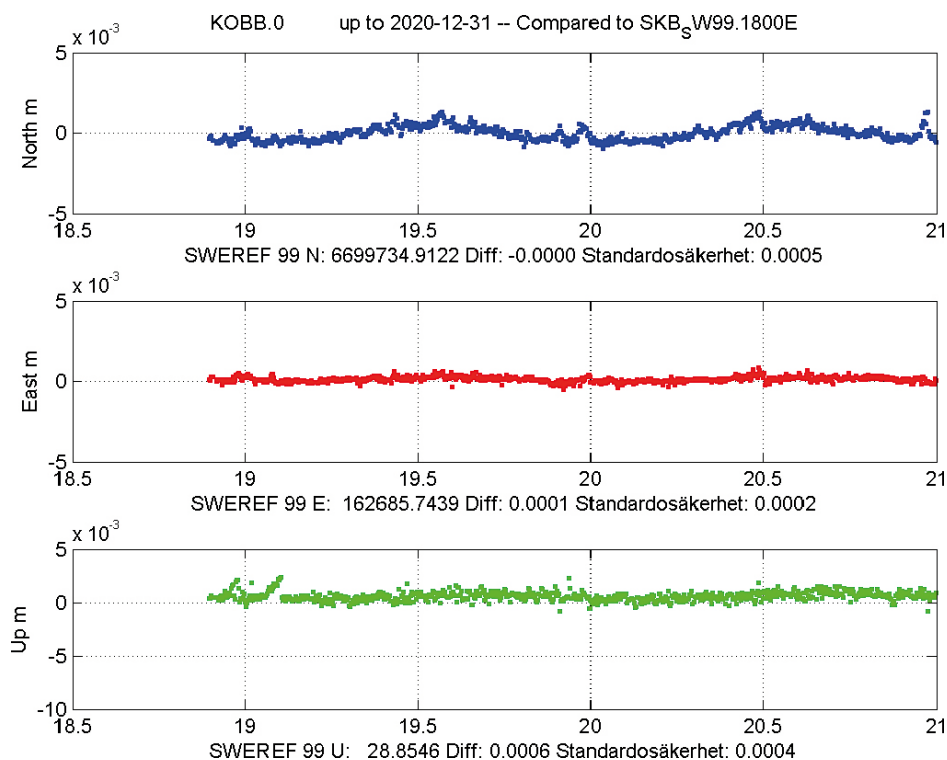
En nackdel med detta angreppssätt – när så få stationer ingår i nätet – är att avvikelser i enskilda stationer som ska fördelas över nätet, ger relativt stor effekt på övriga stationer. Effekten på de övriga stationerna blir dock mindre än den ursprungliga avvikelserna, och har motsatt riktning.

6.5.3 Analys av koordinattidsserier

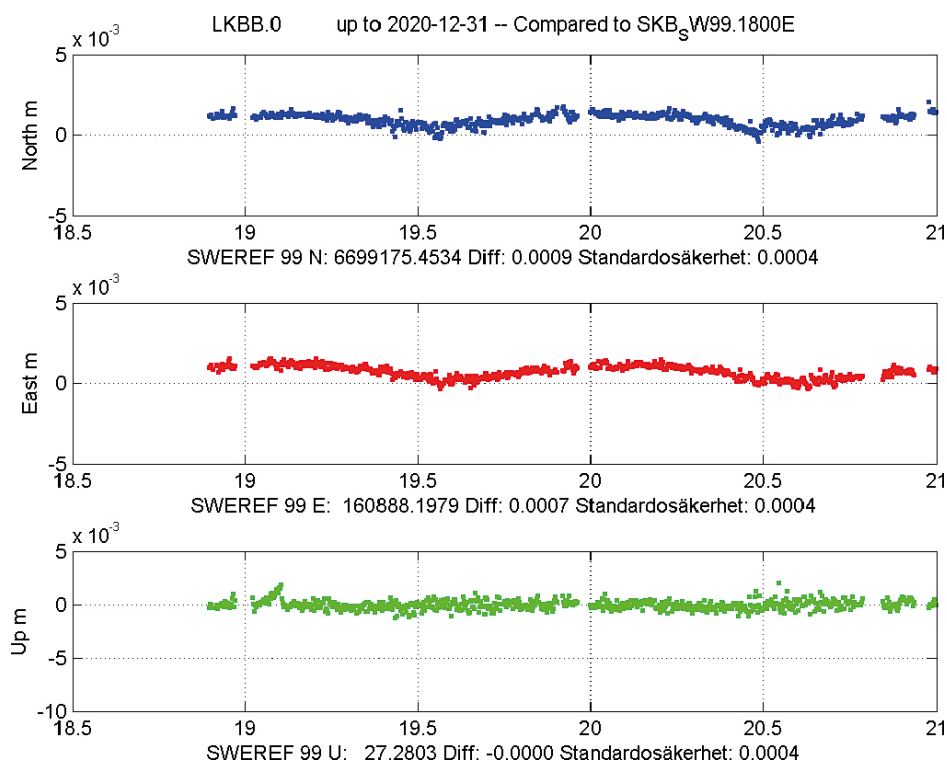
I koordinattidsserierna för SSKA.0 ses en snöeffekt i Up-komponenten. Omkring årsskiftet 2018–2019 samlades snö på antennen, vilket ger upphov till avvikande koordinater. Effekten syns tydligt när anslutningen till SWEREF 99 görs enbart på KOB.B.0 (se figur 6-12 och figur 6-13).

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). I tidsserierna för de övriga stationerna (se figur 6-15 samt figur 6-17 till figur 6-19) kan man i stället se spår av denna snöeffekt, men mindre till beloppet och riktad åt motsatt håll; om än inte så tydligt i tidsserien för NBIO.0.

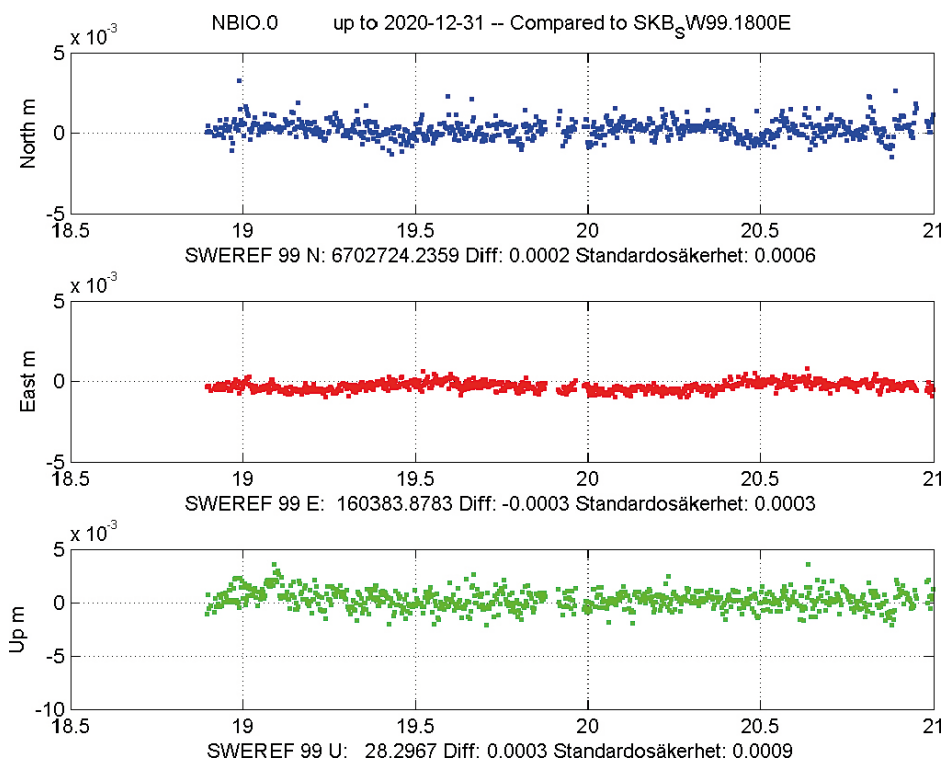
I koordinattidsserien för KOB.B.0 (se figur 6-15) förekommer avvikande positioner i N-komponenten i slutet av 2020, vilket skulle kunna bero på att snö ackumulerats på radomen. Om snö ackumuleras symmetriskt på radomen påverkar det främst Up-komponenten, men om snön snedfördelas på radomen – till exempel på grund av blåst – så kan även plankomponenterna påverkas.



Figur 6-15. Koordinattidsserie för KOBB.0, baserad på koordinater från L1-lösningen från beräkningsalternativet *regIONO_TROP*. Skalan på de horisontella axlarna är decimala år från år 2000. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer. I slutet av 2020 är N-komponenten misstänkt påverkad av snö.



Figur 6-16. Koordinattidsserie för LKBB.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.



Figur 6-17. Koordinattidsserie för NBIO.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.

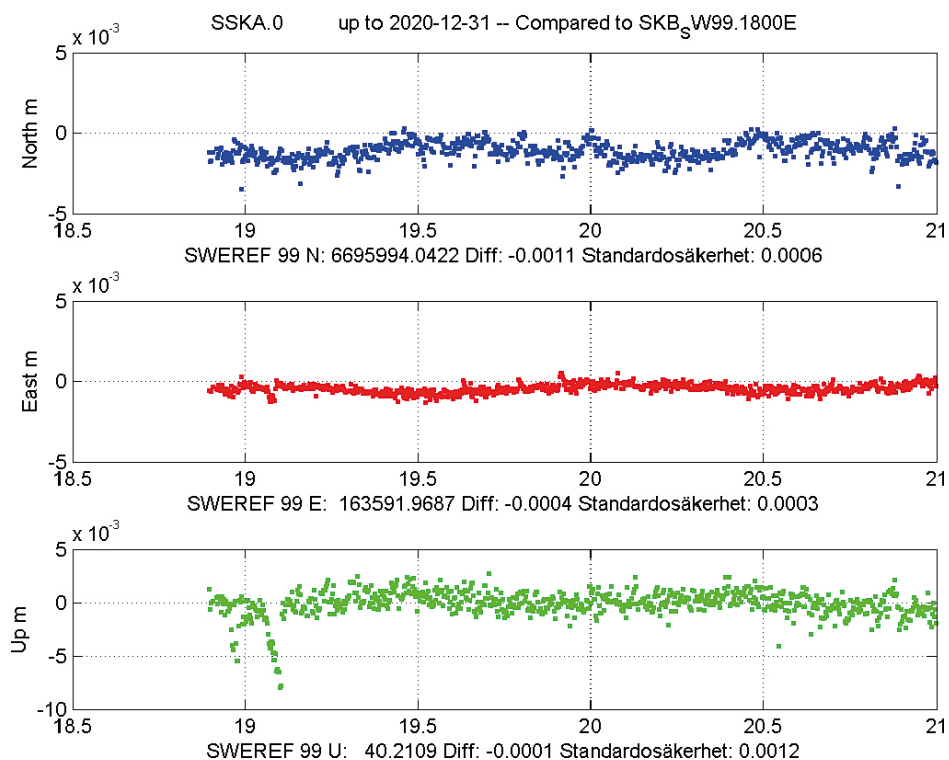
Anledningen till att denna effekt inte är synlig i tidsserierna för de övriga stationerna – vilket den skulle kunna vara efter Helmert-inpassningen som ju fördelar ut eventuella avvikelser på alla stationer – är att de flesta stationerna inte har levererat data för just dessa dygn. De har alltså inga koordinater för de aktuella dygnen och har därför inte ingått i anslutningen till SWEREF 99. Den enda station som har koordinater för de aktuella dygnen – utöver KOB.B.0 – är SSKA.0, men för denna station är tidsserien (figur 6-18) en aning brusig just då och den misstänkta snöeffekten från KOB.B.0 blir inte direkt synlig.

Vi misstänker att de små årstidsvariationer som kan ses i tidsserierna snarare beror på monumentens egenskaper än på beräkningstekniska effekter. Monumenten skulle kunna påverkas olika av uppvärmning på grund av solbelysning under sommaren, t ex beroende på monumenthöjd, om monumentet skuggas av objekt i sin omgivning, hur monumenten med triangelformad bas är orienterade osv Om monumentet värms upp – och därmed expanderar – ojämnt skulle det kunna ge en horisontell rörelse. Masterna på KOB.B.0, LKBB.0, NBIO.0 och VMAS.0 har dock målats vita för att minska risken för ojämn uppvärmning.

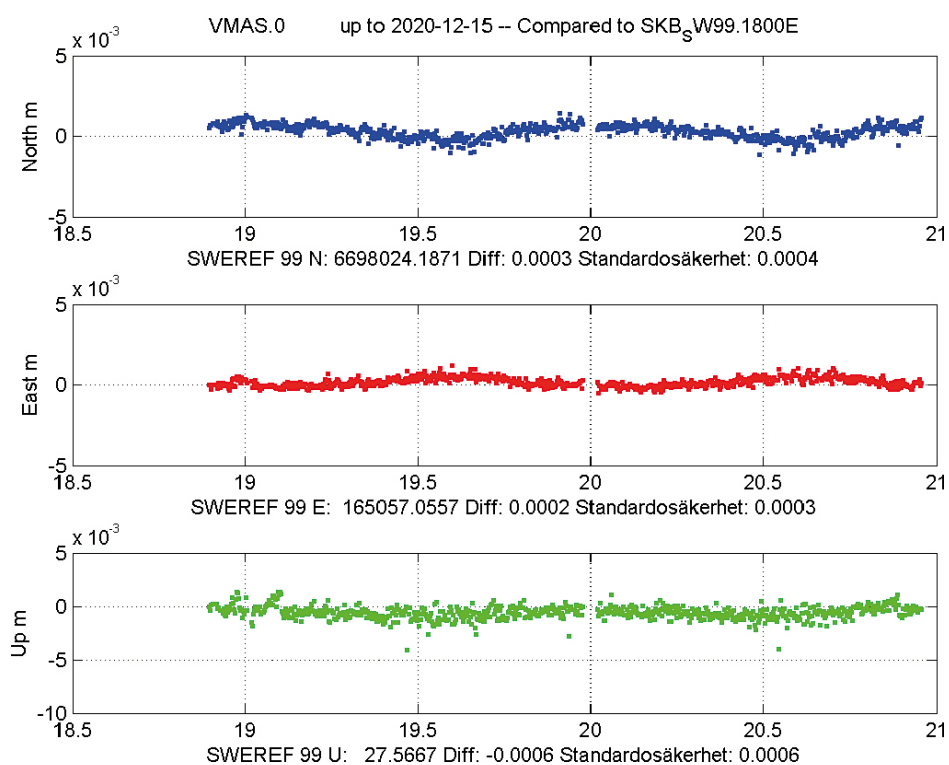
Genom att ansluta de dagliga lösningarna till SWEREF 99 på alla stationer som ingått i respektive lösning så kan man bättre jämföra stationernas stabilitet. Utifrån detta kan man i stort sett säga att alla stationer är likvärdiga ur stabilitetssynvinkel. NBIO.0 och SSKA.0 uppvisar något mindre årstidsvariation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

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

Eftersom det i detta fall främst är relativa rörelser mellan GNSS-stationerna som är av intresse, så är ändå anslutning till SWEREF 99 endast på en station att föredra. Förutom att den valda referensstationen bör vara stabil är det även viktigt att den ingår i så många dagliga lösningar som möjligt, dvs att tillgången på observationsdata är god.



Figur 6-18. Koordinattidsserien för SSKA.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer. Omkring årsskiftet 2018–2019 samlades snö på antennen, vilket gav avvikande koordinater i Up-komponenten.



Figur 6-19. Koordinattidsserie för VMAS.0. Anslutningen till SWEREF 99 är gjord på alla stationer.

7 Fortsatta studier

Planen är nu att hålla fast vid det valda lösningalternativet under en period, för att studera olika beräkningsinställningarna igen när jonosfärsaktiviteten ökar. Det kan då t ex bli aktuellt att åter igen jämföra regional och global jonosfärmodell, samt att jämföra L1-lösning med L3-lösning, för att se om nya ställningstaganden behöver göras för att få bästa möjliga koordinattidsserie. Vid eventuellt byte av beräkningsstrategi måste alla data räknas om på nytt för att få dagliga koordinater som ger en konsistent tidsserie.

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

7.1 Skattning av hastigheter för SKB-stationerna

Hittills har tidsserierna för SKB-stationerna endast studerats visuellt, främst för att se om det förekommer några problem på stationerna. Med längre observationsserier – minst tre år – kommer hastigheter att kunna skattas för de andra SKB-stationerna, relativt KOB.B.0.

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

7.2 SKB-nätet i ett nordiskt perspektiv

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

Vid framtida omberäkningar av NKG-nätet kommer KOB.B.0 att ingå med alla tillgängliga data, dvs från hösten 2018. NKG-lösningarna produceras för närvarande i IGS14/IGb14 (ITRF2014), aktuell epok. Framtida omberäkningar kan komma att redovisas i den, för beräkningstillfället, senaste ITRF-realiseringsen.

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

Referenser

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

- Alfredsson A, Alm L, Dahlström F, Jivall L, Kempe C, Wiklund P, 2019.** Förvaltning av de nationella geodetiska referensnäten. Lantmäterirapport 2019:1, Lantmäteriet, Gävle.
- 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. doi:10.1029/2005JB003629
- Böhm J, Heinkelmann R, Schuh H, 2007.** Short Note: A global model of pressure and temperature for geodetic applications. *Journal of Geodesy* 81, 679–683.
- 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.
- Dach R, Lutz S, Walser P, Fridez P (red), 2015.** Bernese GNSS Software Version 5.2. User manual, Bern: University of Bern, Bern Open Publishing.
- Dach D, Schaer S, Arnold D, Kalarus M S, Prange L, Stebler P, Villiger A, Jäggi A, 2020.** CODE final product series for the IGS. Bern: Astronomical Institute, University of Bern. Tillgänglig: <http://www.aiub.unibe.ch/download/CODE> [2021-02-18].
- 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.
- Institut Géographique National, 2019.** ITRF2020 – Call for participation. Tillgänglig: https://itrf.ign.fr/doc_ITRF/CFP-ITRF2020.pdf [2021-02-18].
- Jivall L, 2001.** SWEREF 99 – new ETRS 89: coordinates in Sweden. Gävle: Lantmäteriverket. (LMV-rapport 2001:6)
- Kempe C, Jäderberg R, Jivall L, 2020.** Årsrapport GNSS-mätningar i Forsmark 2019. SKB P-20-12, Svensk Kärnbränslehantering AB.
- 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. doi:10.1007/s10291-019-0886-3
- Lantmäteriet, 2021.** Information om kommande koordinatuppdatering i Swepos – uppdatering 2021 baserat på SWEREF 99-översynen. Tillgänglig: <https://www.lantmateriet.se/globalassets/kartor-och-geografisk-information/gps-och-geodetisk-matning/oversyn-sweref-99---nationella-tjanster.pdf>
- 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.
- Nyberg S, Kallio U, Häkli P, Jokela J, Koivula H, Saarinen V, Rouhiainen P, 2013.** Monitoring the bedrock stability in Olkiluoto – Summary of campaign based GPS measurements in 1996–2011. Posiva Working Report 2013-63, Posiva Oy, Finland.
- Ray R D, Ponte R M, 2003.** Barometric tides from ECMWF operational analyses. *Annales Geophysicae* 21, 1897–1910.
- Reischung P, 2020.** Switch to IGB14 reference frame. IGS-mail no 7921. Tillgänglig: <https://lists.igs.org/pipermail/igsmail/2020/007917.html> [2021-03-08].
- 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. Tillgänglig: <https://insidegnss.com/the-new-flex-power-mode-from-gps-iir-m-and-iif-satellites-with-extended-coverage-area/> [2021-02-15].

Översikt utrustning på GNSS-stationer

Tabell B1-1. Översikt över stationsutrustning.

	Kobben	Lillkobben	Norra Biotesten	Storskäret	Västra Måsklinten
Antenn TopCon CR-G5	X	X	X	X	X
Antennskydd Radom (OSPS)	X	X	X	X	X
Antennkabel Bedea RG214	X	X	X	X	X
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		X
Regulator solpanel		X	X		X
Vindsnurra		X	X		X
Regulator vindsnurra		X	X		X
2 st Batteri 100Ah		X	X		X

Urklipp ur aktivitetsdagbok

Tabell B2-1. Urklipp ur aktivitetsdagbok 2018–2020.

Version 2.2.0	
	AKTIVITETSDAGBOK
Sidan ____ av ____	

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

Datum (ååmmdd)	Tid		Aktivitet	Sub- activity ID	Objekt (ICODE)	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 Västra 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 Norra 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. (2NetR9 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					

Sammanfattning av de olika stegen i GNSS-beräkningen

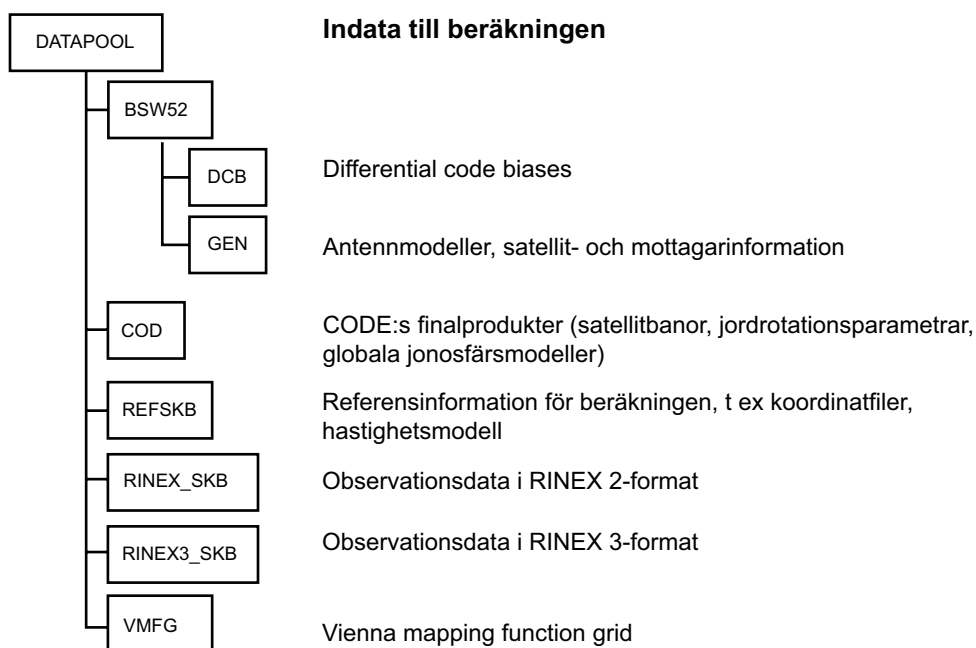
Tabell B3-1. De viktigaste stegen i beräkningen av SKB-nätet.

Steg	Subrutin	Kommentar
1	COOVEL	Extrapolerar koordinater till observationsepoken
2	POLUPD	Konverterar jordrotationsfil till Bern-format
3	PRETAB	Skapar bandatafil i tabellform
4	ORBGEN	Skapar GNSS-banor i Bern-format
Import av observationsdata		
5	RNXSMT	Konverterar observationsdata RINEX 3-format till RINEX 2-format, inkl. val av observationstyper
6	RNXGRA	Summerar/redovisar RINEX-filernas innehåll; tar bort dåliga observationsfiler
7	RXOBV3	Konverterar RINEX-filer till Bern-format
8	CODSPP	SPP för varje station, inkl. synkronisering av mottagarklockor (använder ban- och klockdata från steg 3)
Skapa baslinjer och screena data		
9	SNGDIF	Skapar baslinjer med OBSMAX-strategi
10	MAUPRP	Screenar bärvågsdata (L1 och L2) innan detektering av periodbortfall. Identifierar data utan periodbortfall. Finner periodbortfall i återstående data och korrigerar dessa om möjligt.
11	GPSEST	Skapar regional jonosfärmodell (i förekommande fall)
12	GPSEDT (L1)	GPSEST beräknar flytlösning med korrigerade periodbortfall från steg 10. Skattar troposfärsfördröjning (i förekommande fall), 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 i förekommande fall) (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.
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 (i förekommande fall) från normalekvationerna i steg 20; sparar normalekvationer.
22	ADDNEQ2 (L1)	Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil
23	HELMR1 (L1)	Ansluter L1-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0)
24	GPSEST (L2)	Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L2-lösning med fixerade periodobekanta från steg 19; sparar normalekvationer.
25	ADDNEQ2 (L2)	Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L2-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX (i förekommande fall) från normalekvationerna i steg 24; sparar normalekvationer.
26	ADDNEQ2 (L2)	Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil
27	HELMR1 (L2)	Ansluter L2-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0)
28	GPSEST (L3)	Ger "fri" (<i>loosely constrained</i>) L3-lösning med fixerade periodobekanta från steg 18 och 19; sparar normalekvationer.
29	ADDNEQ2 (L3)	Ger "fast" (<i>tightly constrained</i>) L3-lösning, troposfärsskattning och troposfärs-SINEX (i förekommande fall) från normalekvationerna i steg 28; sparar normalekvationer.
30	ADDNEQ2 (L3)	Ger reducerade normalekvationer och SINEX-fil
31	HELMR1 (L3)	Ansluter L3-lösningen till SWEREF 99 (translation på KOBB.0)

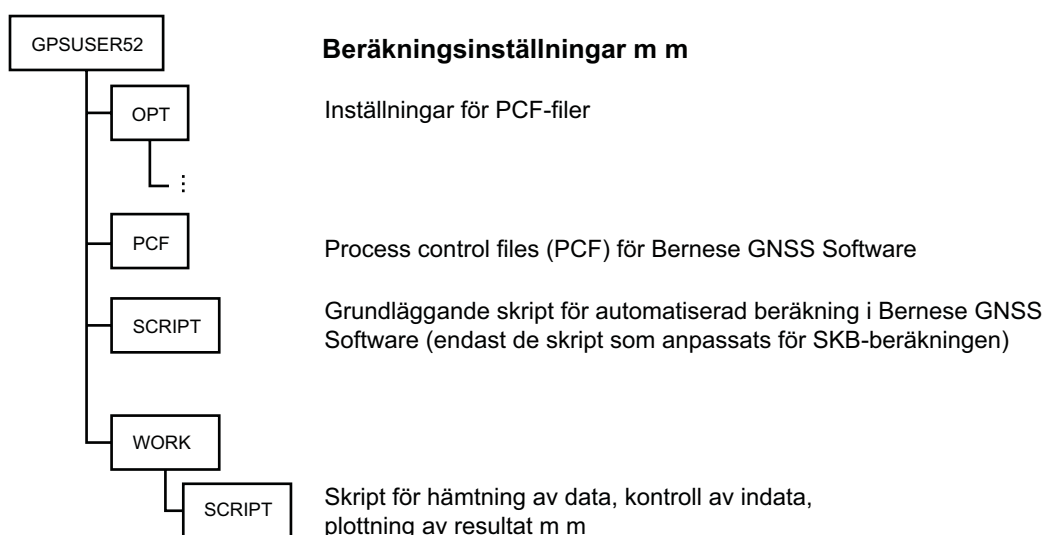
Beskrivning av leveransen

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

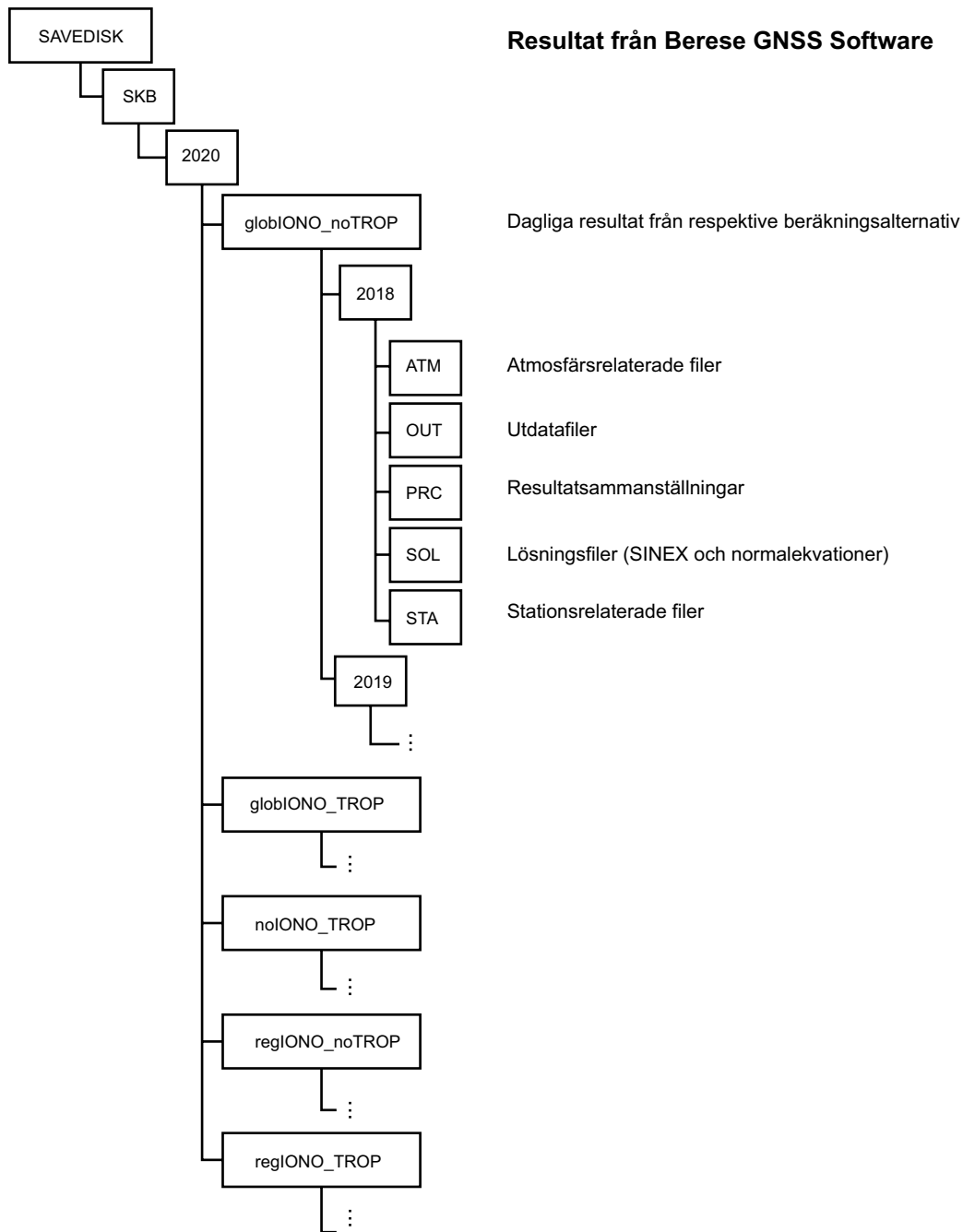
Strukturen följer den standard som brukar användas för beräkningar i Bernese GNSS Software, och innehåller sannolikt mer data än de som SKB primärt är intresserade av. Se figur B4-4 för närmare beskrivning av resultaten.



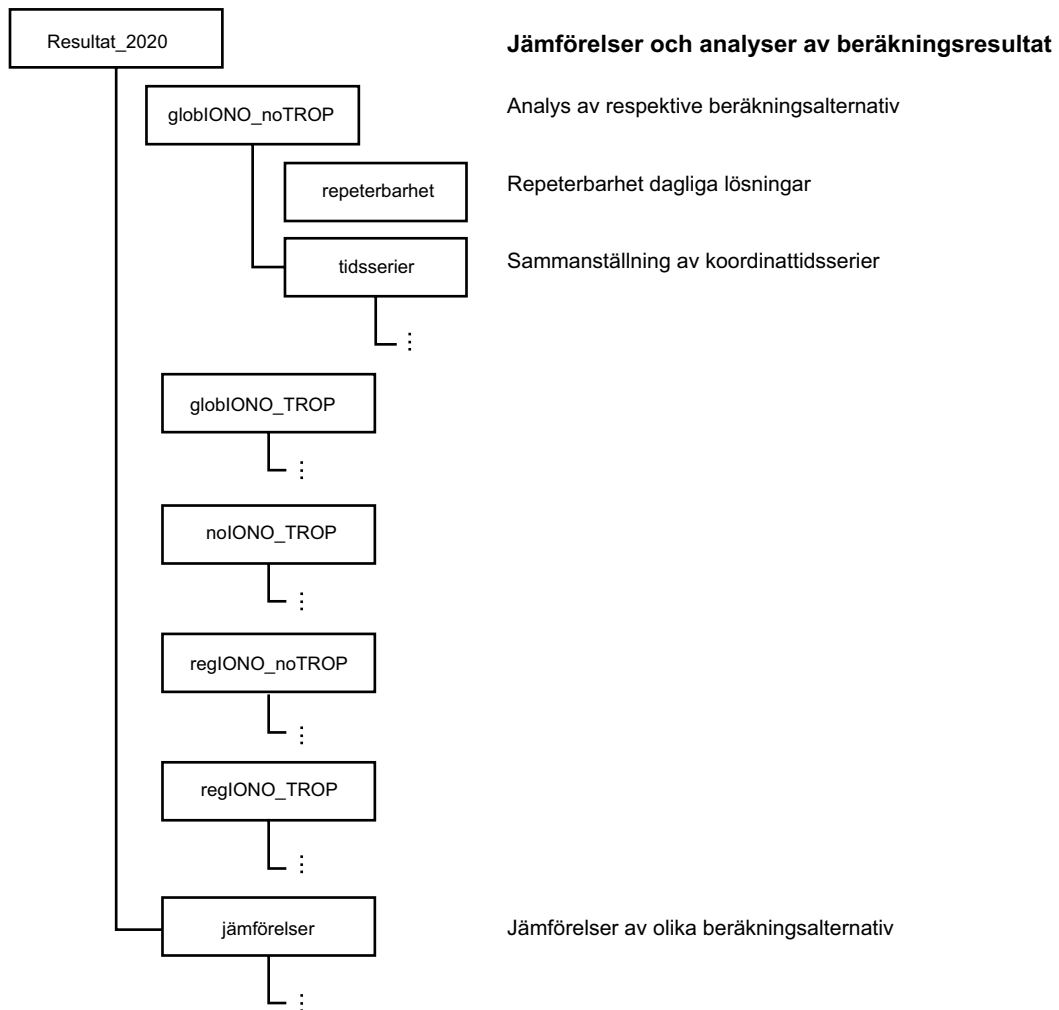
Figur B4-1. Strukturen för indata till GNSS-beräkning med Bernese GNSS Software.



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



Figur B4-3. Strukturen för dagliga beräkningsresultat från Bernese GNSS Software. De olika beräkningsalternativen lagras i olika mappar.



Figur B4-4. Strukturen för redovisning av resultatbearbetningar; daglig repeterbarhet, sammanställning av koordinattidsserier och olika jämförelser. I tidsserie-mapparna finns dagliga koordinatfiler (SWEREF 99, geocentriska kartesiska koordinater) från de olika lösningarna. I tidsserie-mappen för den valda lösningen (regIONO_TROP) finns även dagliga koordinatfiler i SWEREF 99 18 00 och ellipsoidhöjd samt stationsvisa koordinatfiler som ligger till grund för tidsserieplottarna.

SKB:s uppdrag är att ta hand om använt kärnbränsle och radioaktivt avfall från de svenska kärnkraftverken så att människors hälsa och miljö skyddas på kort och lång sikt.

skb.se