

Utvärdering av nya möjligheter till förbättrad positionering med satellitbaserade system

Evaluation of potential for improved positioning with satellite-based systems



Innehåll

Förord	3
Summary	4
Sammanfattning	6
Bakgrund	8
Syfte och mål	10
Material och metoder	11
Delstudie 1 - Satellitbaserad positionering	11
Försök och försöksled	12
Försök 1 – jämförelse av satellitmottagare	12
Förs	

Förord

Denna rapport är utarbetad inom ramen för projektet ”Utvärdering av nya möjligheter till förbättrad positionering med satellitbaserade system”. Projektet har finansierats av medel från Sven och Hildur Wingquists stiftelse för skogsvetenskaplig forskning, av Bo Rydins Stiftelse för vetenskaplig forskning samt av medel från Skogforsks ramprogram.

I studien har data samlats från mätningar på tre platser i landet: Remningstorp (Västergötland), Sundsvall samt Moskosel (Norrbotten). Försöksmark på dessa lokaler har anvisats av Geir Eriksen (Skogssällskapet

Summary

More accurate positioning using satellite-based systems could increase productivity and precision in forestry. In recent years, greater accuracy in positioning has been made possible through new satellite receivers, new satellite systems, and free services for real-time correction.

The aims of this study were: i) to quantify the accuracy of positioning in forest with varying degrees of cover using the type of equipment used in forestry; ii) to evaluate the effect of new satellites from the Galileo system; and iii) to evaluate the effect of real-time correction with the Swepos and EGNOS systems. Another goal was to examine how satellite-based positioning can be used together with data generated by harvesters with boom tip control to position individual trees during harvest.

The study was carried out in three locations in Sweden, with a geographical span from Remningstorp in Västergötland to Moskosel in Norrbotten. At each location, measurement stations were placed in three forest types: clear-cuts, thinning stands and final felling stands. The positions of the measurement points were first very accurately determined (at cm level) by measurement engineers from Metria. The measurement accuracy from each measurement station was calculated, based on deviations between the 'true' coordinates from the reference measurement and the coordinates shown from the measurements at each station.

To examine the technology for positioning individual trees in harvesting, data were retrieved from a Sveaskog-owned John Deere harvester (1270G) in Moskosel. The harvester was equipped with a sophisticated GNSS receiver, Arrow 100 from Eos Positioning Systems, and software from John Deere. This enabled continual logging of boom angle and extension length.

To examine the precision and repeatability of the data generated by sensors on crane movements, a controlled trial was carried out where the base machine was stationary, and the harvester operator repeatedly gripped a number of trees. In a second trial, tree positions generated from data from the harvester were compared with corresponding tree positions from manual reference measurement. The comparison involved 49 trees whose stumps had been marked with numbers when the tree was cut.

The results can be summarised as follows:

- Clear differences were found in measurement accuracy between the different satellite receivers, particularly in measurement of full-cover forest. The measurement error of more sophisticated receivers (the Arrow units and ppm 10xx) can be expected to be less than 2 m for measurements under a tree layer. The corresponding measurement error for the mobile telephones evaluated (Huawei P30 and Sony XZ) and for receivers often used in forest planning (iPad, FIDS Zelo, Garmin Glo and G62) can be expected to be approximately 5 m.
- The number of satellites generally had a favourable effect on the measurement accuracy of positioning in forest. In recent years, a number of new satellites from the BeiDou and Galileo systems have come on the scene, which very rapidly and dramatically increased the total number of available satellites. When measuring in forests, it is therefore important to use satellite receivers that can use all satellite systems.
- The risk for large measurement errors tended to increase considerably when the number of available satellites was less than approximately 14. This minimum number of satellites should be useful in practical applications as an indirect measure of measurement accuracy.
- Real-time correction with the Swepos and EGNOS systems reduced the measurement error by 60-90 cm when measuring on clearcuts. However, the favourable effect of the correction system decreased as the density of the tree layer increased. Comparison between Swepos and EGNOS showed that the two systems had similar effects.
- Approximately five additional Galileo satellites reduced the measurement error by about 0.5 m. However, the effect was limited to measurement where the total number of available satellites from all satellite systems was low.
- The sensor on the John Deere harvester for recording boom angle and extension length had very high precision, and the position of the individual trees relative to the boom foot can be given with very high repeatability, at cm level. For determining tree position based on harvester data, the contribution of these two parameters to the total positioning error can be regarded as negligible. The other sources of error identified in the study were determination of the global position of the harvester, calculation of direction of movement, and lack of information about the angle of rotation at the midpoint of the machine.
- Comparison between tree positions generated from harvester data and from manual reference measurement showed generally good correspondence. The mean deviation between the two sets of figures was 1.4 m, while the standard deviation for the corresponding deviation was 1.0 m. It seems possible that, with small measures, accuracy can be attained that harmonises with requirements in forestry applications. However, it is important that new studies in this area are initiated.

The study shows the level of accuracy that can be expected from GNSS-based positioning in forestry, today and in the foreseeable future. The results can be used as a basis when choosing equipment and its settings to optimise measurement accuracy. The study also shows the status of the method of positioning individual trees based on harvester data, and gives guidance on what needs to be further developed before the method can be applied in practice.

Sammanfattning

Med ökad noggrannhet i den positionering som sker med satellitbaserade system i skogsbruket finns potential att öka produktivitet och precision i arbetsåtgärder. Under de senaste åren har nya möjligheter till förbättrad noggrannhet tillkommit i form av nya satellitmottagare, nya satellitsystem samt fria tjänster för realtidskorrektion. Målen med studien var; i) att kvantifiera noggrannheten vid positionering i skog med varierande grad av slutenhet med den typ av utrustning som används i skogsbruket, ii) att utvärdera effekten av tillkommande satelliter från Galileo-systemet samt, iii) att utvärdera effekten av realtidskorrektion med Swepos- och EGNOS-systemen. Ett ytterligare mål var att belysa hur satellitpositionering kan användas tillsammans med maskindata från skördare med kranspetsstyrning för att positionera enskilda träd vid avverkning.

Studien genomfördes på tre lokaler i landet med en geografisk spännvidd från Remningstorp i Västergötland till Moskosel i Norrbotten. Inom varje lokal gjordes mätningar på mätpunkter utlagda i tre skogstyper: hygge, gallringsskog och slutavverkningsskog. Mätpunkternas positioner bestämdes inledningsvis med hög noggrannhet (cm-nivå) av mättekniker från Metria. Mätnoggrannheten från försöksleden skattades baserat på avvikelserna mellan de ”sanna” koordinaterna från referensmätningen och koordinaterna från mätningarna inom respektive försöksled.

För att belysa teknik för att positionera enskilda träd vid avverkning hämtades data från en John Deere-skördare (1270G) i Moskosel, ägd av Sveaskog. Skördaren var utrustad med en avancerad GNSS-mottagare, Arrow 100 från Eos Positioning Systems och programvara från John Deere, vilken möjliggjorde kontinuerlig loggning av kranvinkel och utsträckt kranlängd. För att belysa precision och repeterbarhet för givarna som genererade information om kranrörelser genomfördes ett kontrollerat försök där basmaskinen var stillastående och skördarföraren återkommande greppade ett antal stammar. I ett andra försök jämfördes trädpositioner genererade från data från skördaren med motsvarande trädpositioner från manuell referensmätning. Jämförelsen omfattade 49 träd för vilka stubbarna märkts med nummer då träden avverkades.

Resultaten kan sammanfattas enligt följande:

- Det var tydliga skillnader i mätnoggrannhet mellan de utvärderade satellitmottagarna, framförallt vid mätning i uppvuxen skog. De mer avancerade mottagarna Arrow-enheter (och ppm 10xx) kan förväntas ha ett mätfel som understiger 2 m vid mätning under ett trädskikt. Motsvarande mätfel för de utvärderade mobiltelefonerna (Huawei P30 och Sony XZ) och för mottagare som används i stor omfattning vid skoglig planering: iPad, FIDS Zelo, Garmin Glo och G62, kan förväntas uppgå till cirka 5 m.
- Antalet satelliter hade en generell gynnsam inverkan på mätnoggrannheten vid positionering i skog. Under de senaste åren har ett antal nya satelliter från BeiDou- och Galileosystemen tillkommit, vilket på kort tid ökat det totala antalet tillgängliga satelliter på ett dramatiskt sätt. Det är därför angeläget att använda satellitmottagare som kan utnyttja samtliga satellitsystem vid mätning i skog.
- Risken för större mätfel tenderade att öka markant då antalet tillgängliga satelliter var färre än cirka 14 stycken. Detta gränsvärde för satellitantalet bör vara användbart i praktiska tillämpningar som ett indirekt mått på mätnoggrannheten.
- Realtidskorrektur med Swepos- och EGNOS-systemen minskade mätfelet med 60–90 cm vid mätning på hygge. Den gynnsamma effekten från korrektions-systemen avtog dock i takt med tilltagande täthet på trädskiktet. Jämförelse mellan Swepos och EGNOS visade att de två systemen hade likartad effekt.
- Cirka fem tillkommande Galileo-satelliter minskade mätfelet med cirka 0,5 m. Effekten var dock begränsad till mätning då det totala antalet tillgängliga satelliter från samtliga satellitsystem var lågt.
- John Deere-skördarens givare för registrering av kranvinkel och utsträckt kranlängd hade en mycket hög precision och de enskilda trädens position relativt kranfoten kunde återges med mycket hög repeterbarhet, på centimeternivå. För bestämning av trädposition baserat på skördardata kan bidraget från dessa två parametrar till det totala positioneringsfelet anses försumbart. De övriga felkällorna för trädpositionering som identifierades i studien var bestämningen av skördarens globala position, beräkningen av färdriktning och avsaknad av information om vridningsvinkel i maskinens midja.
- Jämförelsen mellan trädpositioner genererade från skördardata med trädpositioner från manuell referensmätning visade på en generellt god överensstämmelse. Medelvärde för avvikelserna mellan de två bestämningarna var 1,4 m medan standardavvikelsen för motsvarande avvikelse uppgick till 1,0 m. Det bedöms möjligt att med begränsade insatser nå en noggrannhet som harmonierar med kraven i skogliga tillämpningar. Det är dock angeläget att nya studier inom området initieras.

Sammanfattningsvis belyser studien den noggrannhet som kan förväntas från GNSS-baserad positionering i skogsbruket idag och inom den närmaste framtiden. Resultaten kan användas som underlag för val av utrustning och hur denna kan ställas in för att optimera mätnoggrannheten. Därutöver belyser studien status för metodiken att positionera enskilda träd baserat på skördardata samt ger vägledning kring vilka fortsatta utvecklingsinsatser som krävs för att metodiken ska nå praktisk tillämpning.

Bakgrund

Positionering med hjälp av satellitbaserade system introducerades i skogsbruket på 1990-talet (Hellström & Johansson 1993) och används idag inom en mängd tillämpningar. Under de senaste åren har nya satellitsystem introducerats (ESA 2019, BeiDou 2019) och fria tjänster för realtidsförbättring av satellitbaserade positionsbestämningar tillkommit (Swepos 2019). Detta innebär sammantaget att möjligheten till noggrann positionering i skog förbättrats avsevärt. De potentiella fördelar som en förbättrad noggrannhet vid positionering kan generera i skogsbruket kan sammanfattas i form av ökad precision i utförandet och redovisningen av skogsbruksåtgärder, ökad produktivitet och förbättrade möjligheter till delautomation av arbetsoperationer (Lindroos m. fl. 2015). I dagsläget saknas det dock studier som kvantifierar hur de nya möjligheterna påverkar noggrannheten vid positionering med satellitbaserade system i skog. För att kunna beskriva detta är det viktigt att riktade studier genomförs under skogligt relevanta förhållanden.

GNSS (Global Navigation Satellite Systems) är samlingsnamnet för satellitbaserad navigering och positionering. För svenska förhållanden har satelliter från det amerikanska GPS-systemet och det ryska Glonass-systemet använts. I december 2016 togs det europeiska satellitnavigeringssystemet Galileo i operationellt bruk och sedan 2018 har ett stort antal satelliter från det kinesiska systemet BeiDou på kort tid gjorts tillgängliga globalt (ESA 2019, BeiDou 2019). Vid satellitbaserad positionering är noggrannheten i lägesbeskrivningen, framförallt i skog där det finns skymmande grenverk, beroende av antalet tillgängliga satelliter (t.ex. Ahrenberg & Olofsson 2005, Kaartinen m.fl. 2015). Tillskottet av satelliter från Galileo- och Beidou-systemen är därmed en av de faktorer som kan förväntas ha en betydande positiv påverkan på noggrannheten vid lägesbestämning i skog, men i nuläget saknas dock studier som närmare kvantifierar detta.

I skogliga tillämpningar används så kallad kodmätning för att bestämma avståndet mellan satellit och mottagare. Noggrannheten vid kodmätning kan ökas genom användande av relativ eller differentiell GNSS (DGNSS) vilket innebär att korrektionssignaler från referensstationer med känd position utnyttjas. Korrektionssignalerna distribueras till mottagarna via mobilt internet och i Sverige finns sedan 2016 en kostnadsfri sådan tjänst (Swepos 2019). Korrektionssignalen kan också distribueras via så kallade geostationära satelliter. I Europa finns ett sådant system etablerat (EGNOS) sedan några år tillbaka (ESA 2019) och en nyligen genomförd studie indikerar att för skogliga tillämpningar kan det senare systemet vara att föredra i områden med bristfällig mobiltäckning (Skogforsk 2017). Hur dessa korrektionssystem påverkas av att ett större antal satelliter nu finns tillgängliga via Galileo- och Beidou-systemen är inte belyst och det är därför viktigt att sådana studier genomförs för att kunna optimera noggrannheten vid lägesbestämning i skogliga tillämpningar.

Noggrannheten vid praktisk lägesbestämning med satellitbaserade system i skog är svår att ange med exakthet eftersom förutsättningarna kan vara så varierande. Resultat från tidigare studier har skattat noggrannheten till intervallet 4–8 m för den typ av utrustning som vanligen används (t.ex. Kaartinen m. fl. 2015). Med de nya möjligheter som nu erbjuds, med fler tillgängliga satelliter och fria korrektionssystem, kan noggrannheten förväntas öka till 1–2 meter (Personlig kommunikation 2017. M. Croona, Forest it Design). I en nyligen genomförd studie har Lindroos m.fl. (2015) exemplifierat potentiella förbättringar som en sådan noggrannhet skulle medföra. Exempel som framhålls är möjligheten att generera trädkartor för avverkad skog, ökad möjlighet till kalibrering av data från

laserskanning genom sammankoppling med skördardata om enskilda träd, virtuell snitsling, markering av kultur- och naturvårdsobjekt, samt ökad möjlighet till delautomation för skogsmaskiner. Nedan konkretiseras några av de framhållna exemplen.

Förbättrad noggrannhet i lägesbestämningen kan generera ett minskat behov av snitsling. I dag sker en omfattande utmärkning i skogen med snitslar kring gränser och hänsynsobjekt under traktplaneringen av gallringar och slutavverkningar (Willén & Andersson 2015). Under avverkning navigerar skördarföraren efter en upprättad traktkarta och för att hitta snitslarna krävs uppmärksamhet av skördarföraren. Ersätts snitslingen vid traktplaneringen i ökad utsträckning av satellitbaserad positionsinformation skulle skördarföraren kunna få ett ökat förarstöd med varningar nära gränser eller hänsynstaganden vilket även skulle effektivisera avverkningsarbetet.

Många hänsynstaganden, framförallt oregistrerade kulturminnen, hittas även under förrojning eller i samband med avverkning (Willén & Mohtashami, 2017). För att säkra fortsatt hänsyn vid skogsvårdsåtgärder som markberedning och plantering krävs att hänsynstaganden registreras in. Detta är idag en svag länk i den digitala planeringskedjan och det är svårt att både registrera hänsynstaganden med rätt position och säkra att de följer med i fortsatta planeringsunderlag. Möjligheten att registrera dessa med en god noggrannhet är en väsentlig förutsättning för att kunna öka precisionen vid hänsynstaganden under avverkning och efterföljande skogsvård.

Vid avverkning sparas trädvis positionsinformation ned i skördarnas produktionsfiler. I dagsläget är det skördarhyttens position som registreras, men med ökad noggrannhet i bestämningen skulle det vara relevant att spara de enskilda trädens position. Detta kan åstadkommas med hjälp av tekniken med kranspetsstyrning, då skördardatorn kontinuerligt registrerar kranspetsens position relativt skördarhytten (Lindroos m. fl. 2015). Automatiserad gallringsuppföljning (Möller m. fl. 2011) är på väg att få brett genomslag i skogsbruket och information om de enskilda trädens position skulle vara användbart för att förbättra arealberäkningen då denna metod används (Bhuiyan m.fl. 2016). Det skulle också möjliggöra att skördarföraren får visualiseringsstöd för att identifiera eventuella partier mellan stickvägarna som inte gallrats. Vidare skulle information om position för de enskilda träden i skördardata kunna kopplas samman med data från laserskanning och möjliggöra kalibrering av data från laserskanning (Hauglin m. fl. 2017).

Syfte och mål

Det övergripande syftet med projektet har varit att på ett rikstäckande material kvantifiera noggrannheten vid satellitbaserad positionering i skog med den typ av utrustning som används i dagens skogsbruk. Mer specifikt har projektet syftat till att utvärdera effekten av ett ökat antal tillgängliga satelliter via Galileo-systemet och effekten av de system för realtidskorrektion av data som nu finns fritt tillgängliga. Ett ytterligare syfte har varit att genomföra praktiska demonstrationer av hur tekniken kan tillämpas vid kranspetsstyrning på skördare för positionering av enskilda träd.

Målen med projektet var:

- Att utvärdera noggrannhet vid positionering med den typ av satellitmottagare som används i skogsbruket i skog med varierande grad av slutenhet. Utvärdering har gjorts genom jämförelse med positionsinformation för ett antal punkter som mätts in med mycket hög noggrannhet.
- Att utvärdera effekten av ökad satellittillgänglighet via Galileo-systemet genom att för en mer avancerad satellitmottagare genomföra mätningar med, respektive utan, Galileo-satelliterna inkluderade.
- Att utvärdera effekten av realtidskorrektion med Swepos- och EGNOS-systemen genom att för en mer avancerad satellitmottagare genomföra mätningar med de två systemen aktiverade.
- Att genomföra en demonstration där en mer avancerad satellitmottagare monterats på en skördare med kranspetsstyrning och trädvis positionsinformation sparas i produktionsfilen. Positionsinformationen ska användas för att upprätta trädkartor över avverkade objekt.

Hypotesen i projektet var att de tillkommande satelliterna från Galileo- och BeiDou-systemen i kombination med tillgängliga korrektionssystem medför en markant förbättring av noggrannheten vid positionsbestämning i skogsmiljöer, motsvarande en mätosäkerhet på ± 2 meter eller bättre.

Material och metoder

Projektet var indelat i två delstudier. I delstudie 1 utvärderades effekten av; *i*) satellitmottagare, *ii*) korrektionssystem samt *iii*) satellitsystemet Galileo. I delstudie 2, som var av inledande karaktär, studerades teknik för satellitbaserad positionering av enskilda träd med hjälp av data genererade från skördare. Studieupplägg och genomförande av de två delstudierna beskrivs nedan.

DELSTUDIE 1 - SATELLITBASERAD POSITIONERING

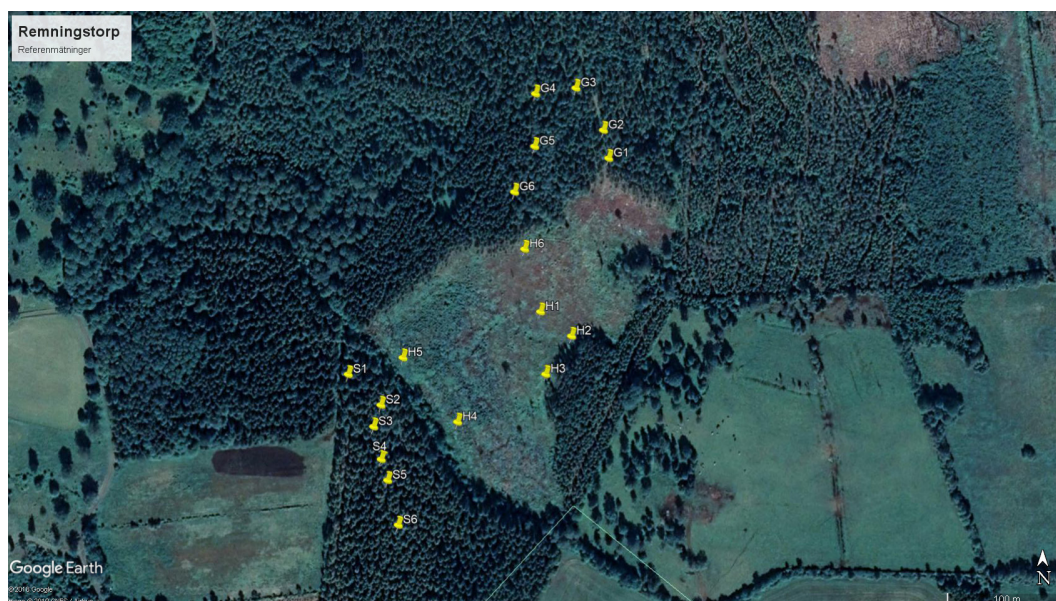
Mätningarna i delstudie 1 gjordes vid två studietillfällen på tre olika lokaler i landet (Figur 1). Studietillfälle 1 genomfördes 22/5, 2018 på Remningstorp i Västergötland (lat. 58.456759, long. 13.617554) medan studietillfälle 2 genomfördes i närheten av Sundsvall (lat. 62.20267, 16.882038) och i närheten av Moskosel (lat. 65.887982, long. 19.285297) under tidsperioden 15-20/5, 2019.



Figur 1. Schematisk karta som illustrerar var mätningarna gjordes under studietillfälle 1 (Remningstorp), respektive studietillfälle 2 (Sundsvall och Moskosel).

Inom varje lokal gjordes mätningar i tre skogstyper: hygge, gallringsskog och slutavverkningsskog (Figur 2). Inom varje skogstyp lades sex mätpunkter ut, det vill säga totalt 18 mätpunkter per lokal. Mätpunkterna markerades med träkäppar.

På Remningstorp och i Sundsvall bestod slutavverkningsskogen av tät barrskog medan denna skogstyp var betydligt glesare i Moskosel. Ett liknande mönster mellan lokalerna fanns för gallringsskogen. På samtliga lokaler hade gallring genomförts, det vill säga det fanns upphuggna stickvägar och mätpunkterna i denna skogstyp placerades genomgående på dessa vägar. För skogstypen hygge fanns ingen uppvuxen vegetation utan sikten mot himlen (och mot satelliterna) var fri på samtliga lokaler.



Figur 2. Karta över mätpunkterna i Remningstorp där H=hygge, G=gallringsskog och S=slutavverknings-skog. Mätpunkterna var markerade med träkäppar.

Positionerna för samtliga mätpunkter mättes inledningsvis in med hög noggrannhet (cm-nivå) av mättekniker från Metria. Koordinaterna för mätpunkterna från denna referensmätning betraktades i studien som "sanna" värden. I studien skattades mätnoggrannheten från försöksleden baserat på differensen mellan de "sanna" koordinaterna från referensmätningen och koordinaterna från mätningarna inom respektive försöksled.

Försök och försöksled

Inom varje skogstyp och lokal genomfördes tre försök för att möjliggöra skattning av olika effekter på mätnoggrannheten vid satellitbaserad positionering (Tabell 1). Nedan beskrivs mätningarna inom de olika försöken och de ingående försöksleden.

Tabell 1. Skattad effekt samt antal ingående försöksled per mätserie

Försök	Studerad effekt	Antal försöksled
1	Satellitmottagare	9
2	Korrektionssystem	2
3	Satellitssystemet Galileo	2

Försök 1 – jämförelse av satellitmottagare

I försök 1 samlades data från totalt nio satellitmottagare med en spännvidd från mycket enkla mottagare till de mottagare som i dagsläget är de mest avancerade när det gäller skogliga tillämpningar. De enklare mottagarna saknar inställningsmöjligheter medan inställningsmöjligheterna är mycket stora för de avancerade mottagarna, till exempel när det gäller val av satellitsystem, korrektionssystem och lägsta tillåtna elevationsvinkel för satelliter som ska inkluderas vid positionsbestämningen.

Antalet testade satellitmottagare varierade något mellan lokaler – en utökning skedde inför det andra studietillfället i Sundsvall/Moskosel. Vilka satellitmottagare som testades på de olika lokalerna samt vilka inställningar som användes för respektive mottagare redovisas i tabell 2 och i texten. Bilder på mottagarna återfinns i bilaga 1.

Arrow 200 tillverkas av det kanadensiska företaget Eos Positioning Systems och är en av de mest avancerade satellitmottagarna för skogliga tillämpningar. Under testen i Remningstorp användes modellen Arrow 200 medan den efterföljande modellen, Arrow Gold, användes i Sundsvall och i Moskosel. Under försök 1 i Remningstorp var mottagaren inställd för att enbart använda satelliter från satellitsystemen GPS, Glonass och BeiDou medan samtliga satellitsystem (GPS, Glonass, Beidou och Galileo) användes i Moskosel och Sundsvall. På samtliga tre försökslokaler var mottagaren inställd för att inte använda någon korrektionssignal samt att enbart använda satelliter med elevationsvinkel större än tio grader för positionsbestämning. Arrow-mottagarna hade separat antenn som var ansluten med kabel till mottagen. För övriga mottagare i studien var antennen integrerad i själva mottagaren.

Mottagaren ppm 10xx tillverkas av det tyska företaget Precise Positioning Management och är en mottagare som inte varit vanlig på den svenska marknaden. I studien var mottagaren inställd för att använda satelliter från satellitsystemen GPS, Glonass, Beidou och Galileo samt att inte använda något korrektionssystem.

Garmin GLO är en enklare satellitmottagare som saknar inställningsmöjligheter. Den är konfigurerad för att använda satelliter från satellitsystemen GPS och Glonass samt satellitbaserade korrektionssignaler vilket för svenska förhållanden innebär signaler från EGNOS-systemet.

Garmin G62 är en handburen satellitmottagare med gränssnitt. I studien utgick vi från att mottagaren enbart använder satelliter från GPS- och Glonass-systemen men detta har inte varit möjligt att verifiera. Mottagaren använde inte någon korrektionssignal.

Surfplattan iPad används frekvent i skogsbruket. iPad har en inbyggd GNSS-mottagare och en inbyggd tjänst "location services". Information om vilka satellitsystem som används vid positionering och ifall korrektionssignaler utnyttjas har inte varit möjligt att få fram inom ramen för vår studie. I studien användes modellen iPad Air.

FIDS Zelo är en ruggad fält-PC med inbyggd GNSS-mottagare. I studien var mottagen inställd för att använda satelliter från GPS- och Glonass-systemen och ingen korrektionssignal.

I studien testades även två mobiltelefoner med inbyggda GNSS-mottagare, Huawei P30 Pro och Sony XZ2, den senare enbart i Sundsvall, på två av skogstyperna. Huawei-telefonen valdes för studien eftersom den har ett GNSS-chip som möjliggör mottagning av två frekvenser vilket teoretiskt kan förväntas ge en förbättrad noggrannhet vid positioneringen. Ingen av de testade mobiltelefonerna använde något korrektionssystem. I båda telefonerna användes operativsystemet Android (version 9).

Tabell 2. Lista över de satellitmottagare som ingick i utvärderingen samt på vilka försökslokaler datainsamling skedde.

Satellitmottagare	Försökslokaler		
	Remningstorp	Sundsvall	Moskosel
Arrow 200/Gold	x	x	x
ppm 10xx		x	x
Garmin GLO	x	x	x
Garmin G62	x		
iPad Air		x	x
FIDS Zelo		x	x
Mobiltelefon Huawei P30 Pro		x	x
Mobiltelefon Sony XZ2		x	

Försök 2 - jämförelse av korrektionssystem

I försök 2 samlades data för att studera effekten av de två systemen Swepos och EGNOS för realtidsskorrektion av satellitdata. Båda systemen är kostnadsfria för användare. Systemen skapar korrektionssignaler utifrån ett nät av data från fasta referensstationer med känd position. Signalerna används för att korrigera mottagarnas satellitinformation för varierande atmosfäriska förhållanden. Därigenom erhålls en ökad noggrannhet vid positioneringen, så kallad differentiell GNSS (DGNSS).

Swepos är Lantmäteriets stödsystem för satellitpositionering (Anon 2019). Korrektionssignalen som genereras i Swepos DGNSS-tjänst distribueras via mobilt internet, det vill säga det krävs att användaren har en 3G- eller 4G-uppkoppling. Swepos DGNSS-tjänst stödjer i nuläget enbart satellitdata från GPS- och Glonass-satelliter, det vill säga inte satellitdata från Galileo- och Beidou-satelliter.

EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) är ett system som drivs av den europeiska rymdstyrelsen ESA. Utifrån ett nät av fasta referensstationer över Europa genereras korrektionssignaler som distribueras via tre geostationära satelliter som konstant befinner sig ovanför ekvatorn. EGNOS stödjer satellitdata från samtliga satellitsystem.

För att skatta effekten av de två korrektionssystemen genomfördes parallella mätningar med två Arrow 200-mottagare (Arrow Gold i Sundsvall och Moskosel). Den första mottagaren var inställd för att använda korrektionssystemet EGNOS och satelliter från systemen GPS, Glonass, Galileo och Beidou. Den andra mottagaren var inställd för att används Swepos och satelliter från GPS och Glonass. För båda mottagare användes enbart satelliter med en elevationsvinkel större än tio grader för positionering. Dessa mätningar genomfördes i samtliga skogstyper på de tre försökslokalerna.

I Remningstorp gjordes därutöver parallella mätningar i två serier med de två Arrow-mottagarna konfigurerade för mätning med Swepos-korrektion/utan korrektion, respektive med EGNOS-korrektion/utan korrektion.

Försök 3 – effekt av satellitsystemet Galileo

I försök 3 samlades data för att skatta den tillkommande effekten på mätnoggrannheten vid positionering av det europeiska satellitsystemet Galileo. På samma sätt som i försök 2 gjordes parallella mätningar med två Arrow-mottagare. Den första mottagaren var inställd för att använda satellitdata från systemen GPS, Glonass och Beidou medan den andra mottagaren var inställd för att använda satellitdata från GPS, Glonass, Galileo och Beidou. För båda mottagarna användes enbart satelliter med en elevationsvinkel större än tio grader för positionering.

Försök 3 genomfördes i samtliga skogstyper på de tre försökslokalerna.

Mätningar i delstudie 1

Noggrannheten vid satellitbaserad positionering påverkas av faktorer som rådande förhållanden i atmosfären och aktuell satellitgeometri. Dessa förhållanden förändras kontinuerligt över tid och för att möjliggöra en rättvis jämförelse mellan försöksled i vår studie var det viktigt att tiden i möjligaste mån kunde konstanthållas mellan de försöksled som skulle jämföras. I vår studie gjordes ansträngningar för att uppnå detta vilket utvecklas nedan.

Under försök 1 i Moskosel och Sundsvall monterades sex av de nio testade satellitmottagarna på en ställning (Figur 3). Av utrymmesskäl monterades de övriga tre satellitmottagarna Garmin Glo, iPad och FIDS Zelo på en separat ställning (Figur 4). Mätningarna med de två seten av mottagare skedde efter varandra på respektive mätpunkt. Detta innebar att inom samma set av mottagare skedde mätningarna per mätpunkt samtidigt medan tidsdifferensen mellan mottagarna i de två seten uppgick till någon minut.



Figur 3. Satellitmottagare monterade på ställning (nr 1) för att möjliggöra samtidig mätning. A1_a och A2_a indikerar antennerna tillhörande Arrow-enhet 1 och 2, A1 och A2 Arrow-enhet 1 och 2, ppm – ppm 10xx, H – Huawei mobiltelefon, S – Sony mobiltelefon. På bilden syns inte mottagaren Garmin 62.

Under försök 2 och 3 (Moskosel respektive Sundsvall) gjordes mätningarna med två Arrow-enheter och stålställning nr 1 (Figur 3) användes genomgående. Detta innebar att tiden för mätning var identisk mellan försöksled inom dessa två försök.

Under samtliga mätningar i Remningstorp, då antalet studerade mottagare var färre, var samtliga mottagare placerade på samma ställning, det vill säga all jämförande mätning skedde samtidigt.

Inför mätningarna sprejmarkerades öst-västlig riktning och en nordpil vid samtliga mätpunkter. Vid mätningarna placerade stålställningarna längs med träckäpparna (i vertikalled) samt konsekvent orienterade i öst-västlig, respektive nord-sydlig riktning. Detta innebar att de offset som uppkom mellan respektive satellitmottagares placering på stålställningen och centrumlinjen för träckäppen var desamma för alla mätpunkter. I den efterföljande analysen justerades de ursprungliga koordinaterna från respektive mottagare utifrån inmätt offsetvärde, det vill säga så att de justerade koordinaterna motsvarade en punkt som korsades av träckäpparnas centrumlinjer.

Data från satellitmottagare sparas enligt en internationell standard, NMEA. Standarden specificerar en rad meddelanden. Dessa innehåller grundläggande information som klockslag, koordinatinformation, antal satelliter, precisionsmått och information om eventuella korrektionssystem, men också detaljerad information om de satelliter som används. I vår studie loggades NMEA-data från samtliga mottagare under försöken. Undantag utgjordes av iPad, i vilken enbart koordinater registrerades. Loggning skedde internt på respektive mottagare, alternativt på mobiltelefoner med hjälp av bluetooth-överföring och Android-apparna NTRIP Client¹ och ppm Commander².



Figur 4. Satellitmottagare monterade på stålställning (nr 2) för att möjliggöra samtidig mätning. G indikerar Garmin GLO, i – iPad och F – FIDS Zelo.

¹ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lefebure.ntripclient>

² <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.pilablu.gnsscommander>

Mätning i försök 1 till 3 skedde enligt följande stegvisa procedur:

1. Loggning av data initierades på satellitmottagarna.
2. Tiden för start av loggning registrerades med hjälp av en separat mobiltelefon. Ett egenutvecklat skript programmerat i appen Tasker³ användes. Tidtagningen baserades på mobilens klocktid. Tidsmässig differens mellan mobilens klocktid och satellittid (den tid som skrivs i NMEA-strängarna) mättes med hjälp av appen GPS Time⁴.
3. Stålställningen positionerades på första mätpunkten i den aktuella skogstypen (till exempel G1 i gallringsskogen) och hölls i samma position under 30 sekunder.
4. Tiden för start och stopp av mätning på mätpunkten registrerades i den tidtagande mobilen. Registrering skedde med hjälp av tasker-skriptet genom att med mobilen skanna identitetskodade NFC-taggar som fästs på mätpunkterna (Figur 5).
5. Steg 3 och 4 upprepades på de övriga mätpunkterna inom skogstypen (mätpunkt 2 till 6).
6. Steg 3 och 4 upprepades på samtliga mätpunkter fast nu i omvänd ordning, det vill säga mätning skedde från punkt 6 till punkt 1. Detta innebar att en upprepad mätning erhöles för respektive mätpunkt inom skogstyp.
7. Tiden för avslutning av mätning registrerades i mobiltelefonen tillsammans med eventuella kommentarer.



Figur 5. Bild på träkäpp vid en mätpunkt. Den blå brickan är en NFC-tag, kodad med mätpunktens identitet (G6). NFC-taggar användes tillsammans med egenutvecklad programvara för att i mobiltelefon registrera tiden då mätning skedde på de olika mätpunkterna

³ <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.lefebure.ntripclient>

⁴ <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.pilabu.gnsscommander>

Databehandling och analyser

Det totala mätfelet (RMSE) per mätpunkt (P) för positioneringen inom respektive försöksled är uppbyggt av två delar; en del som beskriver den systematiska avvikelsen (Bias) och en del, $\sigma_{(P_GNSS)}^2$, som beskriver den tillfälliga avvikelsen (ekvation 1):

$$\begin{aligned} RMSE(P_{ref}) &= \sqrt{(Bias_X(P)^2 + Bias_Y(P)^2) + (\sigma_{X,P_{GNSS}}^2 + \sigma_{Y,P_{GNSS}}^2)} \\ &= \sqrt{Bias(P)^2 + \sigma_{P_{GNSS}}^2} \end{aligned} \quad (\text{ekv. 1})$$

Den systematiska delen kan skattas som den genomsnittliga avvikelsen mellan positionen från referensmätningen (den "sanna" positionen) och den mätta positionen från mätningen. Data samlades under 30 sekunder per mätpunkt och bias bestämdes som den genomsnittliga avvikelsen under detta tidsintervall. Flertalet mottagare registrerade en beräknad position per sekund och den tillfälliga avvikelsen uttrycker spridningen för de enskilda mätvärdena under mätintervallet på 30 sekunder. Den systematiska och den tillfälliga delen i det totala mätfelet illustreras i figur 6.

I studien beräknades den systematiska avvikelsen per mätpunkt som

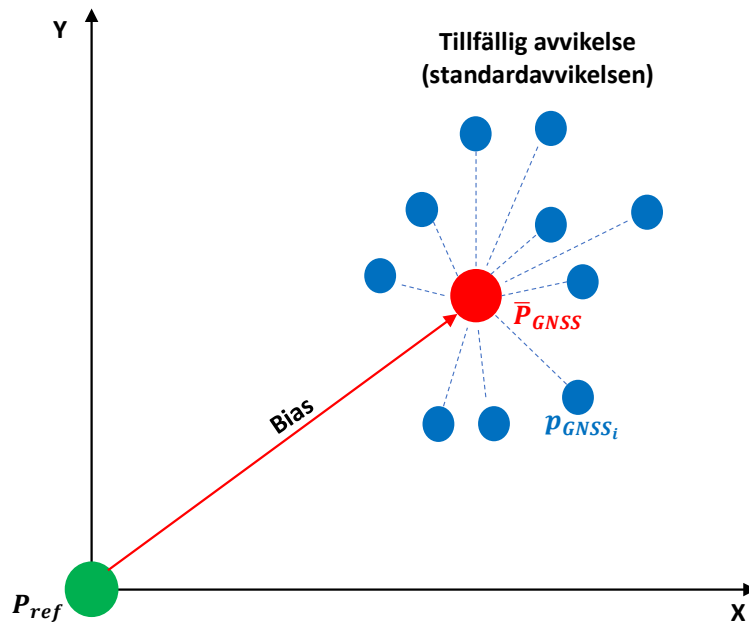
$$Bias(P_{ref}) = P_{ref} - \bar{P}_{GNSS} = \sqrt{(X_{P_{ref}} - \bar{X}_{P_{GNSS}})^2 + (Y_{P_{ref}} - \bar{Y}_{P_{GNSS}})^2} \quad (\text{ekv. 2})$$

där P_{ref} är positionen för mätpunkten från referensmätningen, $\bar{P}_{GNSS}$ är positionen från mätningen med det aktuella försöksledet uttryckt som ett medelvärde för samtliga mätningar under mätintervallet på 30 sekunder och X och Y anger ost- respektive nordkoordinaten.

Standardavvikelsen för den tillfälliga avvikelsen per mätpunkt ($\sigma_{P_{GNSS}}$) beräknades som

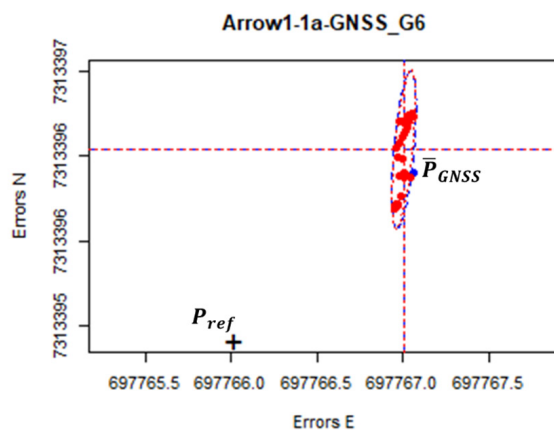
$$\sigma_{P_{GNSS}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P}_{GNSS} - P_{GNSS_i})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((\bar{P}_{GNSS_x} - P_{GNSS_{x_i}})^2 + (\bar{P}_{GNSS_y} - P_{GNSS_{y_i}})^2)}{n}} \quad (\text{ekv. 3})$$

där P_{GNSS_i} är koordinaten för ett enskilt mätvärde under mätintervallet på 30 sekunder och X och Y anger ost- respektive nordkoordinaten.



Figur 6. Illustration av det totala mätfelet per mätpunkt uppbyggt av en systematisk avvikelse (Bias) och en tillfällig avvikelse. Den systematiska avvikelsen utgörs av avståndet mellan positionen från referensmätningen (P_{ref}) och den genomsnittliga positionen från 30 sekunders mätning per försöksled ($\bar{P}_{GNSS}$) medan den tillfälliga avvikelsen beskriver spridningen av enskilda mätvärden (P_{GNSS_i}) runt den genomsnittliga positionen från 30 sekunders mätning per försöksled

I vår studie var den helt dominerande delen av det totala mätfelet (RMSE) uppbyggt av den systematiska delen och för flertalet mottagare utgjorde denna del mer än 99 procent av det totala mätfelet. I resultatdelen redovisas därför enbart det totala mätfelet och ej dess uppdelning på komponenter. Ett exempel på mätdata från en mätpunkt redovisas i figur 7.

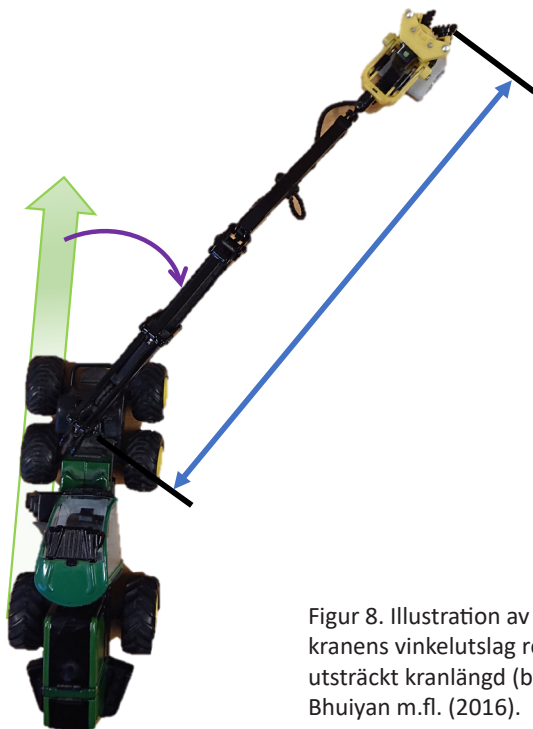


Figur 7. Exempel på mätdata från en mätpunkt (mätning med Arrow-enhet i gallring i Moskosel). P_{ref} betecknar mätpunktens "sanna" position från manuell referensmätning och röda fyllda cirkelar betecknar mätdata från 30 sekunders mätning med Arrow-enheten. Skärningspunkten mellan vertikal och horisontell streckad linje motsvarar genomsnittlig position för mätningarna under 30 sekunders intervallet ($\bar{P}_{GNSS}$). Baserat på samtliga mätvärden beräknades initialt en felellips symboliserad med blå streckad linje (± 3 standardavvikelser). Mätvärden utanför felellipsen (outliers) togs bort från de fortsatta beräkningarna. För denna mätpunkt var det ett mätvärde som togs bort (blå fylld cirkel).

DELSTUDIE 2. POSITIONERING AV ENSKILDA TRÄD

För att positionera enskilda träd utifrån data från skördarnas styrsystem krävs framför allt information om:

- Skördarens globala position från GNSS-mottagare.
- Skördarens färdriktning (Figur 8).
- Kranens vinkelutslag relativt färdriktningen (Figur 8).
- Utsträckt längd för kranen (Figur 8).
- Geometriskillnaden mellan GPS-mottagarens position och kranbasen. När GPS-mottagaren sitter på annan plats än själva kranbasen kräver detta information om midjans vinkel och maskinens lutning.



Figur 8. Illustration av skördarens färdriktning (grön pil), kranens vinkelutslag relativt färdriktningen (lila pil) samt utsträckt kranlängd (blå pil). Figur modifierad efter Bhuiyan m.fl. (2016).

I vår studie gjordes två kontrollerade försök för att belysa hur informationen kan användas för att positionera enskilda träd och för att identifiera inverkan av olika felkällor. Båda försöken genomfördes i Moskosel med en John Deere-skördare (1270G) ägd av Sveaskog vilken var försedd med kranpetsstyrning. Skördaren var utrustad med en avancerad GNSS-mottagare, Arrow 100 från tillverkaren Eos Positioning Systems. Mottagarens externa antenn var monterad i bakre delen av förarhytten i linje med hyttens mittlinje (Figur 9).



Figur 9. Placering av GNSS-mottagarens externa antenn.

Inför studien hade John Deere installerat en programvara som kontinuerligt registrerade kranvinkel och utsträckt kranlängd i en separat logfil. I filen loggades mätvärden med frekvensen 2 Hz, det vill säga mätvärden registrerades två gånger per sekund.

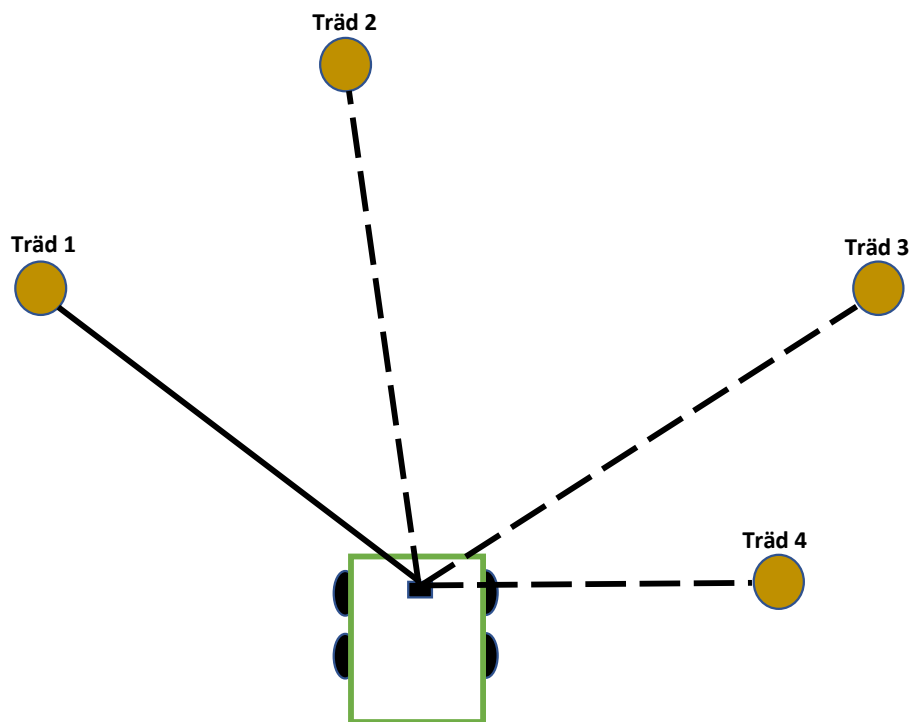
I det första försöket studerades precision och repeterbarhet för givarna som registrerar kranvinkel och utsträckt kranlängd. I försöket var själva maskinen stillastående efter att ha positionerats på en plats från vilken fyra träd nåddes med aggregatet (Figur 10). Därefter greppade föraren de stående träden med aggregatet under cirka 4 sekunder och höll då aggregatet stilla. Varje träd greppades i genomsnitt 6 gånger i en viss ordningsföljd (Figur 10).

Precisionen från givarna studerades genom att beräkna standardavvikelsen för mätvärdena inom varje sekvens då föraren greppat träden med aggregatet och aggregatet hållits stilla. Standardavvikelsen beräknades för registreringarna av kranvinkel och utsträckt kranlängd men också för variationen i markplanet efter att mätvärden lagts in i ett lokalt koordinatsystem med origo motsvarande kranfoten.

Repeterbarheten från givarna studerades genom att jämföra medelvärden per träd från de upprepade sekvenserna då föraren greppat träden med aggregatet och aggregatet hållits stilla.

I det andra försöket jämfördes beräknande trädpositioner baserade på mätdata från skördaren med motsvarande trädpositioner från manuell referensmätning. För 49 träd märktes stubbarna med nummer då träden avverkades. Positionerna för stubbarna mättes därefter in med hög noggrannhet (cm-nivå) av en mättekniker från Metria. En del av stubbarna blev täckta med ris vid avverkningen och kunde inte återfinnas vid den manuella referensmätningen vilket resulterade i att positionerna från 43 träd kunde jämföras.

För att beräkna trädpositionerna utnyttjades data registrerade i skördarens produktionsfil (hpr-fil) samt log-filen innehållande data från den kontinuerliga registreringen av kranvinkel och utsträckt kranlängd. Data över basmaskinens koordinater samt kranvinkel vid fällning av de enskilda stammarna hämtades från hpr-filen. Skördarens färdriktning beräknades med hjälp av en tidigare utvecklad algoritm (Bhuiyan m.fl. 2016) vilken baseras på data för basmaskinens koordinater vid fällning av stammarna. För att komplettera dessa data med utsträckt kranlängd vid fällning av stammarna matchades data från hpr-filen samman med data från log-filen med hjälp av tidsstämplar och kranvinkelinformation. Tillsammans med avståndet mellan placeringen av GNSS-mottagarens externa antenn och kranfoten användes slutligen koordinaterna från GNSS-mottagaren, beräknad färdriktning för skördaren samt kranvinkel och utsträckt kranlängd vid fällning för att beräkna trädpositionerna uttryckta i ett globalt koordinatsystem. Avståndet mellan placeringen av GNSS-mottagarens externa antenn och kranfoten approximerades som det absoluta avståndet i xy-planet mellan dessa punkter då maskinens midja är rak samt riktad i maskinens färdriktning.



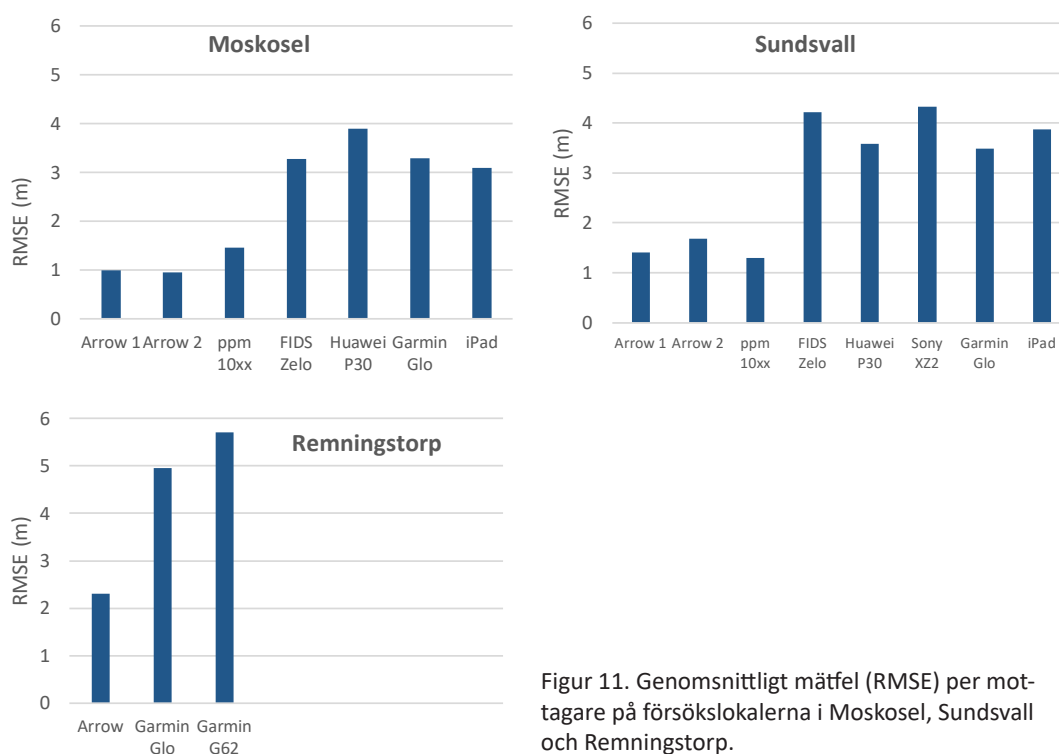
Figur 10. Schematisk illustration av försöket som gjordes i syfte att belysa repeterbarhet och precision för skördarens givare för kranvinkel och utsträckt kranlängd. I försöket greppade föraren de stående träden med aggregatet under cirka 4 sekunder och höll det stilla. Träden greppades i ordningen träd 1, träd 2, träd 3, träd 4, träd 3, träd 2 o.s.v. Varje träd greppades i genomsnitt 6 gånger. Givarna för kranvinkel och utsträckt kranlängd loggades med 2 Hz, det vill säga 2 mätvärden erhöles per sekund.

Resultat och diskussion

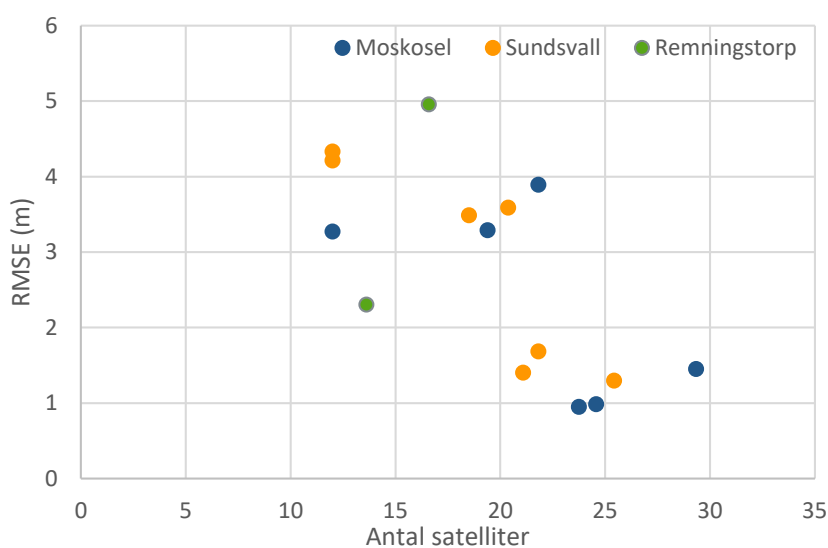
FÖRSÖK 1. EFFEKT AV SATELLITMOTTAGARE

Resultaten i detta avsnitt visar mottagarnas prestanda utan några korrekitioner aktiverade. I figur 11 redovisas satellitmottagarnas genomsnittliga mätfel (RMSE) per försökslokal. I Moskosel och Sundsvall uppvisade de två Arrow-mottagarna och mottagaren ppm 10xx väsentligt lägre mätfel än övriga mottagare. För dessa tre mottagare var det genomsnittliga mätfelet cirka 1,5 m eller lägre på båda lokalerna medan mätfelet för övriga mottagare var minst dubbelt så stort. FIDS Zelo, Garmin Glo och iPad presterade inbördes likvärdigt inom försökslokalerna i Sundsvall och Moskosel. Mobiltelefonerna som utvärderades, Huawei P30 och Sony XZ2, testades inte fullt ut på alla skogstyper men resultaten för de två telefonerna indikerade ett likvärdigt eller något högre mätfel än för FIDS Zelo, Garmin Glo och iPad.

I Remningstorp (Figur 11) utvärderades tre mottagare: Arrow 200, Garmin Glo och Garmin G62. Arrow-enheten hade väsentligt lägre mätfel än de övriga två mottagarna. Relationen mellan mätfelen för Arrow 200 och Garmin Glo var liknande som för Arrow-enheterna och Garmin Glo i Moskosel/Sundsvall med drygt dubbelt så stort genomsnittligt mätfel för Garmin Glo jämfört med Arrow-mottagaren.



Figur 11. Genomsnittligt mätfel (RMSE) per mottagare på försökslokalerna i Moskosel, Sundsvall och Remningstorp.



Figur 12. Sambandet mellan det genomsnittliga antal satelliter per försökslokal som respektive satellitmottagare använde vid positioneringen och mottagarnas mätfel (RMSE).

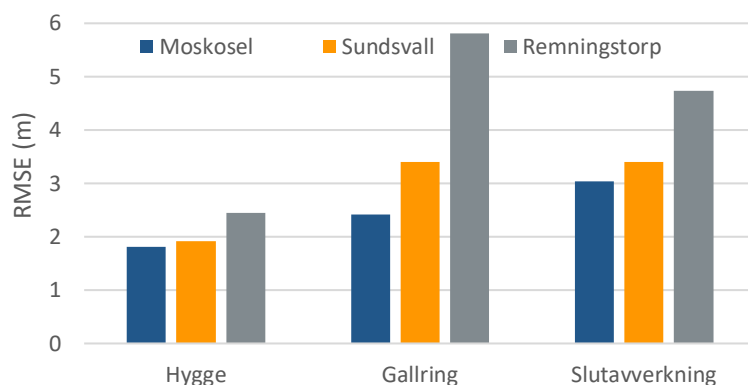
Det fanns en viss överensstämmelse mellan antalet satelliter som respektive mottagare använde vid positionsbestämningen och storleken på mätfelet (Figur 12). I Moskoseel och Sundsvall använde mottagarna med högst mätnoggrannhet, Arrow-enheterna och ppm 10xx, genomgående fler satelliter än övriga mottagare (Tabell 3). Sett över försökslokal användes likartat antal i Moskoseel och Sundsvall, cirka 25 stycken. I Remningstorp användes dock betydligt lägre antal satelliter, i genomsnitt 14 stycken för Arrow-mottagaren (Tabell 3). Orsaken till detta bedöms bero på att i Remningstorp var Arrow-mottagaren under försök 1 inställd för att enbart använda satelliter från satellitsystemen GPS, Glonass och Beidou till skillnad från försök 1 i Moskoseel och Sundsvall då även Galileo-satelliter användes.

Tabell 3. Genomsnittligt antal satelliter som användes av mottagarna på försökslokalerna i Moskoseel, Sundsvall och Remningstorp. För iPad-mottagaren och mottagaren Garmin G62 fanns inte tillgänglig information om antal utnyttjade satelliter.

Mottagare	Antal satelliter		
	Moskoseel	Sundsvall	Remningstorp
Arrow ¹⁾	24	21	14
ppm 10xx	29	25	-
FIDS Zelo	12	12	-
Huawei P30	22	20	-
Sony XZ 2	-	12	-
Garmin Glo	19	19	17
Garmin G62	-	-	-
iPad	-	-	-

¹⁾ För Arrow i Moskoseel och Sundsvall redovisas antalet satelliter som medelvärde för de två mottagarna.

För samtliga försökslokaler var mätfelet, som ett genomsnitt för samtliga satellitmottagare, högre vid mätning i gallrings- och slutavverkningsskog jämfört med mätning på hygge (Figur 13). Den störning trädskiktet inducerade medförde att antalet tillgängliga satelliter minskade (Tabell 4) vilket försämrar satellitgeometrin. Trädskiktet medför också att satellitsignalerna dämpas och att så kallade flervägsfel uppstår då signaler studsar på träd och förlänger signalernas gångtid från satellit till mottagare (Eriksson & Hedlund 2005).



Figur 13. Genomsnittligt mätfel (RMSE) för samtliga satellitmottagare per skogstyp (Hygge, Gallring och Slutavverkning) på de tre försökslokalerna.

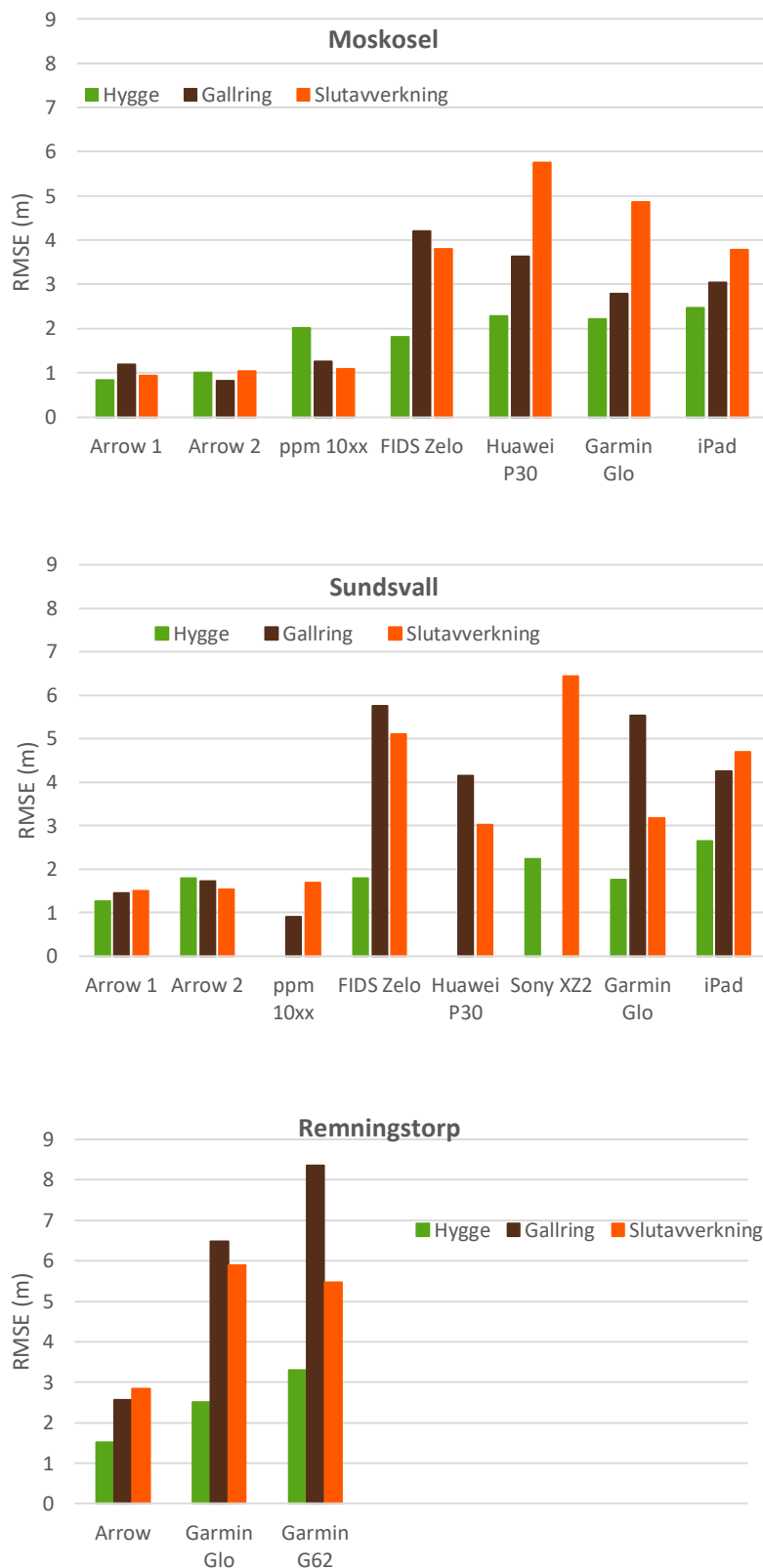
Tabell 4. Genomsnittligt antal använda satelliter per skogstyp (Hygge, Gallring och Slutavverkning) för de utvärderade satellitmottagarna på de tre försökslokalerna.

Lokal	Antal satelliter		
	Hygge	Gallring	Slutavverkning
Moskosel	23	22	20
Sundsvall	20	18	18
Remningstorp	17	15	14

I figur 14 redovisas satellitmottagarnas genomsnittliga mätfel per skogstyp för mätningarna på de tre försökslokalerna. I Moskosel och Sundsvall uppvisade de tre mottagarna med lägst genomsnittligt mätfel, Arrow-enheterna och ppm 10xx, en annorlunda utveckling av mätfelet över skogstyp än de övriga utvärderade mottagarna. För dessa tre mottagare fanns ingen tydlig trend till ökande mätfel i gallrings- och slutavverkningsskog jämfört med hygge. För övriga mottagare skedde däremot en kraftig förändring där mätfelet var två till tre gånger högre i gallrings- och slutavverkningsskogen jämfört med hygge. De skillnader i genomsnittlig mätnoggrannhet som noterats mellan de två grupperna av mottagare på dessa lokaler orsakades alltså framförallt av hur väl mottagarna presterade då det fanns ett trädskikt som störde mätningen.

I Remningstorp uppvisade samtliga mottagare en ökning av mätfelet i gallrings- och slutavverkningsskog jämfört med hygge. Ökningen var större för Garmin Glo och Garmin G62 men förekom även för Arrow-enheten. I Remningstorp använde Arrow-enheten genomgående färre satelliter än på de övriga två försökslokalerna (se tidigare diskussion) och i genomsnitt användes 12, respektive 13 satelliter under mätningarna i gallrings- och slutavverkningsskogen. Närmare granskning av mätfelen från positionsbestämningarna av de enskilda mätpunkterna i dessa skogstyper visade att risken för större mätfel ($RMSE > 2$ m) ökade markant när antalet använda satelliter var färre än 14 stycken. Vi tolkar den avvikande trenden för Arrow-enheten i Remningstorp, jämfört med Moskosel och Remningstorp, som en effekt av det generellt lägre satellitantalet och att antalet för en stor andel av mätpunkterna understeg den nivå då det förefaller vara kopplat till en kraftigt negativ påverkan på mätnoggrannheten.

I syfte att renodla mottagarnas grundläggande mätförmåga var samtliga mottagare under försök 1 konfigurerade för att genomföra mätningarna utan användning av något korrektionssystem. Undantaget utgjordes av Garmin Glo som är fabriksinställd för att använda EGNOS-korrektion, något som inte kan påverkas av användaren. I NMEA-filerna registreras för varje positionering information om mottagaren mottagit korrektion eller inte. För Garmin Glo var i genomsnitt 32 procent av mätningarna genomförda med korrektion från EGNOS (Tabell 5). I vårt material återfanns det dock ingen tydlig koppling mellan andel mätning med EGNOS-korrektion och storleken på mätfelet. Utifrån detta drar vi slutsatsen att mätresultatet för Garmin Glo inte var kraftigt påverkat av korrektion från EGNOS-systemet.

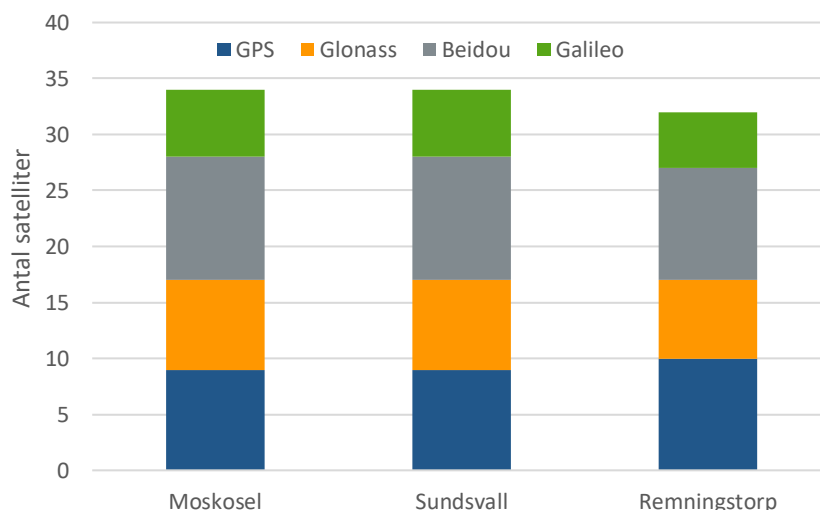


Figur 14. Genomsnittligt mätfel (RMSE) per satellitmottagare och skogstyp (Hygge, Gallring och Slutavverkning) på de tre försökslokalerna.

Tabell 5. Andel av mätningarna med Garmin Glo som genomfördes med korrektion från EGNOS-systemet inom de olika skogstyperna på de två försökslokalerna.

Lokal	Skogstyp	Andel
Moskosel	Hygge	0,38
Moskosel	Gallring	0,26
Moskosel	Slutavverkning	0,18
Sundsvall	Hygge	0,15
Sundsvall	Gallring	0,41
Sundsvall	Slutavverkning	0,51
<i>Medel:</i>		0,32

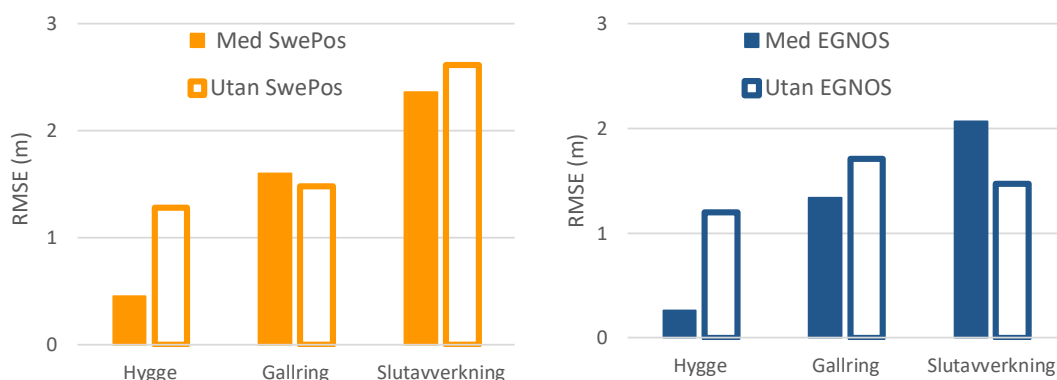
Sammanfattningsvis visar resultaten från vår studie på tydliga skillnader i mätnoggrannhet mellan de mer avancerade och de enklare satellitmottagarna. Skillnaderna förstärks vid mätning i skog då satellitsignalerna dämpas och antalet tillgängliga satelliter reduceras i förhållande till mätning utan påverkan från trädskiktet. De avancerade satellitmottagarna i studien (Arrow och ppm 10xx) kan förväntas ha ett medelmåtfel som understiger 2 m då mätning genomförs under ett trädskikt och då mottagarna är konfigurerade för mätning utan användning av korrektionssystem. Motsvarande medelmåtfel för mottagare som används i stor omfattning vid skoglig planering, till exempel iPad, FIDS Zelo och Garmin G62, uppgår till cirka 5 m. Vår studie ger generellt stöd för att antalet satelliter har en positiv påverkan på mätnoggrannheten vid mätning i skog. Vidare indikerar våra data att risken för större måtfel ökar markant när antalet tillgängliga satelliter är färre än cirka 14 stycken. Under de senaste åren har satelliter tillkommit från satellitsystemen Beidou och Galileo och där det största tillskottet kommit från det kinesiska systemet (Figur 15). Detta har inneburit att det totala antalet tillgängliga satelliter, på en mycket kort tid, har fördubblats! För satellitbaserad positionering i skog är detta en mycket gynnsam utveckling. För användare som står i begrepp att införskaffa mottagare är det viktigt att välja en modell som kan använda satelliter från alla satellitsystem.



Figur 15. Antal tillgängliga satelliter med elevationsvinkel $>10^\circ$ från satellitsystemen GPS, Glonass, Beidou och Galileo vid simulerad mätning 2019-10-22, klockan 12:00, på försökslokalerna i Moskosel, Sundsvall och Remningstorp. Data hämtade från GNSS Mission Planning (<http://gnssmissionplanning.com/>).

FÖRSÖK 2. EFFEKT AV KORREKTIONSSYSTEM

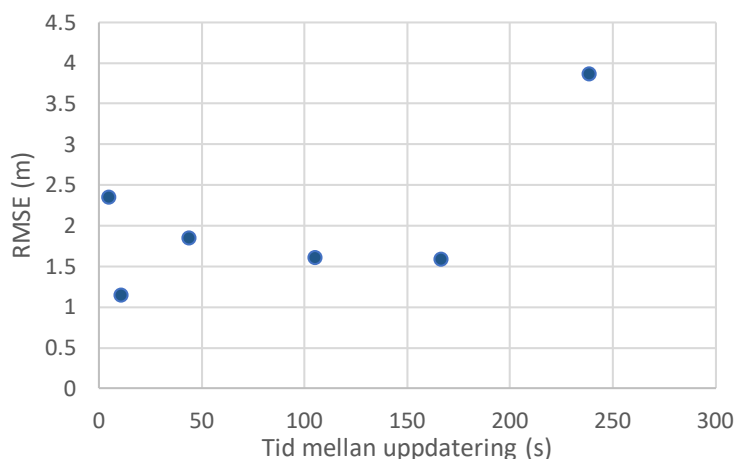
En central uppgift i studien var att belysa effekten av korrektionssystemen Swepos och EGNOS på mätnoggrannheten. I Remningstorp gjordes parallella mätningar med de två Arrow-mottagarna, konfigurerade för mätning utan respektive med korrektion. För båda korrektionssystemen noterades en tydlig minskning av mätfelet vid mätning på hygge, minskningen uppgick till cirka 90 cm (Figur 16). För mätning i gallrings- och slutavverkningsskog däremot fanns ingen tydlig trend utan mätfelet var i hälften av fallen högre då korrektion användes.



Figur 16. Genomsnittligt mätfel per skogstyp vid positionsbestämning med två parallella Arrow-mottagare i Remningstorp konfigurerade för mätning med respektive utan korrektion. Till vänster korrektion med Swepos och till höger EGNOS

En möjlig orsak till den diffusa effekten av korrektionssystemen i skog skulle kunna vara att trädskiktet tidvis förhindrat korrektionssignalerna från att nå satellitmottagarna. För korrektion med EGNOS visade analys av uppdateringsfrekvensen för korrektionssignalen att det i genomsnitt var kort tid mellan uppdatering på hygge och i gallringsskog (~ 10 s) men att det var betydligt längre tid (~ 90 s) mellan uppdateringarna i slutavverkningsskog. I slutavverkningsskogen hade mätpunkten med högst mätfel också den genomsnittligt längsta uppdateringstiden för korrektionssignalen (Figur 17). Vi betraktar det som sannolikt att det generellt högre mätfelet vid mätning i slutavverkningsskog med EGNOS-korrektion var orsakat av den förhöjda tiden för uppdateringen av korrektionssignalen.

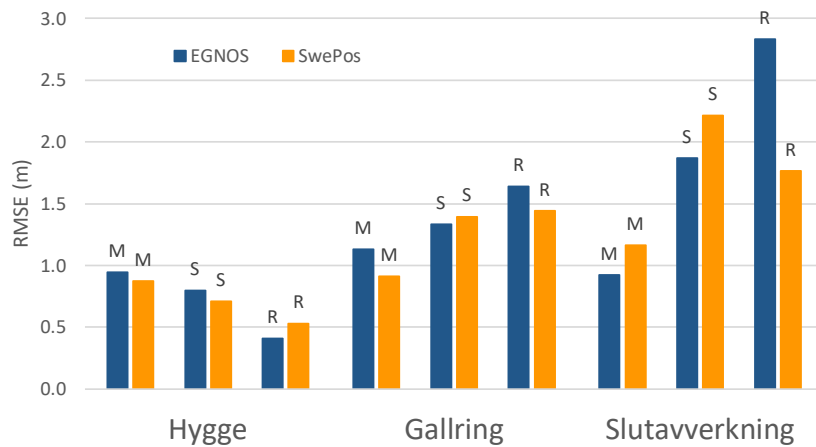
För mätningen med Swepos-korrektion visade en närmare granskning av den genomsnittliga uppdateringsfrekvensen av korrektionssignalen för de enskilda mätpunkterna kort tid (1,4 s) i 90 procent av fallen. För några mätpunkter var det något längre tid mellan uppdateringarna (~12 s). Dock fanns ingen tendens till ökat mätfel för dessa mätpunkter, det vill säga det är inte sannolikt att den svaga effekten av korrektionssystemen i skog orsakats av problem för korrektionssignalerna att penetrera trädskiktet. Vidare granskning av resultaten för mätningarna med Swepos-korrektion visade att de genomsnittliga mätfelen för gallrings- och slutavverkningsskog var starkt påverkade av enskilda mätpunkter, vilka hade markant högre mätfel ($RMSE > 6$ m). Antalet satelliter som utnyttjats vid positionsbestämningen av dessa punkter var i båda fallen mycket lågt (8 stycken). Det var också lägre än den parallella positionsbestämningen utan korrektion då 11 satelliter användes. Vi tolkar det som sannolikt att de höga mätfelen för dessa mätpunkter vid positionsbestämningen med Swepos-korrektion var kopplat till det låga antalet satelliter som användes.



Figur 17. Sambandet mellan genomsnittligt mätfel per mätpunkt (RMSE) och tid mellan uppdatering av korrektionssignalen vid mätning med EGNOS-korrektion i slutavverkning i Remningstorp.

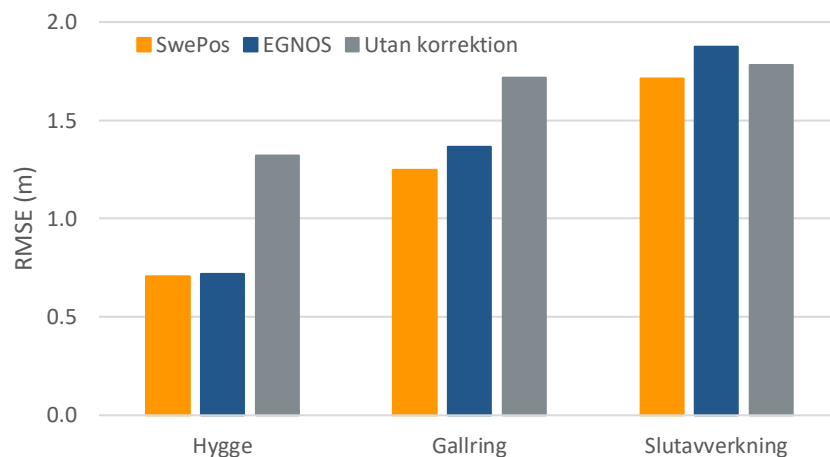
I syfte att jämföra de två korrektionssystemen genomfördes parallella mätningar på samtliga försökslokaler med de två Arrow-enheterna konfigurerade för mätning med korrektion från Swepos och EGNOS. Mätfelen vid användning av de två korrektionssystemen var generellt likartade inom skogstyp och försökslokal. I fem av de nio parvisa jämförelserna mellan korrektionssystemen medförde korrektion med Swepos ett lägre

måtfel än för EGNOS (medan det omvända gällde i fyra fall), se figur 18. Utifrån denna jämförelse drar vi slutsatsen att de två korrektionssystemen kan förväntas ge likartade resultat vid praktisk mätning i skogsmiljöer.



Figur 18. Måtfel vid positionsbestämning med två parallella Arrow-mottagare konfigurerade för mätning med korrektion från Swepos respektive EGNOS på hygge samt i gallrings- och slutavverkningsskog. Bokstäverna ovan staplarna indikerar försökslokal: M=Moskosel, S=Sundsvall och R=Remningstorp.

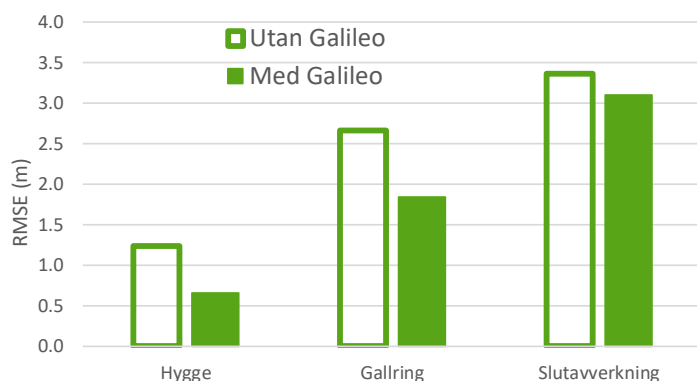
I figur 19 redovisas det genomsnittliga måtfel över försökslokal vid mätning med Arrow-enheter konfigurerade för mätning med korrektion från Swepos och EGNOS samt för mätning utan användande av korrektionssystem. Det bör poängteras att mätningarna utan korrektionssystem inte genomfördes samtidigt som mätningarna med de två korrektionssystemen aktiverade, vilket innebär att förutsättningarna för mätning kan ha varit olika (till exempel olika satellitgeometrier). Med detta sagt indikerar våra resultat att användande av korrektionssystem medförde ett lägre eller väsentligt lägre måtfel i gallringsskog och på hygge medan korrektion inte hade någon effekt i slutavverkningsskog. Vi tolkar dessa resultat på samma sätt som resultaten för Remningstorp redovisade ovan. Det vill säga korrektion med Swepos eller EGNOS kan förväntas ge en kraftigt positiv effekt på mätnoggrannheten vid mätning på hygge men denna effekt kan förväntas avta vid mätning i skog i takt med tilltagande täthet på trädskiktet.



Figur 19. Genomsnittligt måtfel per skogstyp för de tre försökslokalerna (Moskosel, Sundsvall och Remningstorp) vid mätning med Arrow-enheter konfigurerade för mätning med korrektion från Swepos, med korrektion från EGNOS samt utan korrektion.

FÖRSÖK 3. EFFEKT AV SATELLITSYSTEMET GALILEO

I figur 20 redovisas genomsnittligt mätfel per skogstyp i Remningstorp för mätning med respektive utan Galileo-satelliter inkluderade. För samtliga skogstyper var det genomsnittliga mätfelet lägre då Galileo-satelliter inkluderades vid positionsbestämningen. I genomsnitt uppgick skillnaden till 0,5 m med en variation över skogstyp från 0,3 till 0,8 m.



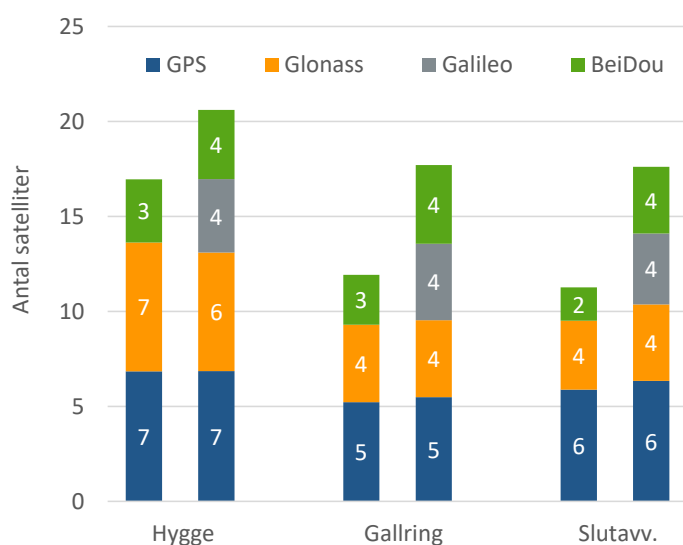
Figur 20. Genomsnittligt mätfel per skogstyp vid positionsbestämning med två parallella Arrow-mottagare i Remningstorp konfigurerade för mätning utan respektive med Galileo-satelliter.

Det genomsnittliga satellitantalet per skogstyp ökade med fyra till sex satelliter då Galileo-satelliter inkluderades vid positionsbestämningen (Tabell 6). För mätning utan Galileo-satelliter i gallring och slutavverkning var satellitantalet lägre än den kritiska nivån på cirka 14 satelliter då risken för större mätfel ökar (se tidigare diskussion). Inkludering av Galileo-satelliter medförde att satellitantalet översteg denna nivå.

Tabell 6. Genomsnittligt antal använda satelliter per skogstyp i Remningstorp vid positionsbestämning med två parallella Arrow-mottagare konfigurerade för mätning med respektive utan Galileo-satelliter.

	Antal satelliter		
	Hygge	Gallring	Slutavverkning
Med Galileo	21	18	18
Utan Galileo	17	12	11

Närmare granskning av fördelningen av satelliterna per satellitsystem (Figur 21) indikerade att den ökning av satellitantalet som skedde då Galileo-satelliterna inkluderades huvudsakligen berodde på att Galileo-satelliter tillfördes; satellit-antalet för övriga satellitsystem påverkades i liten utsträckning. Analysen av satellitsammansättningen styrker alltså att det minskade mätfelet orsakades av Galileo-satelliterna.

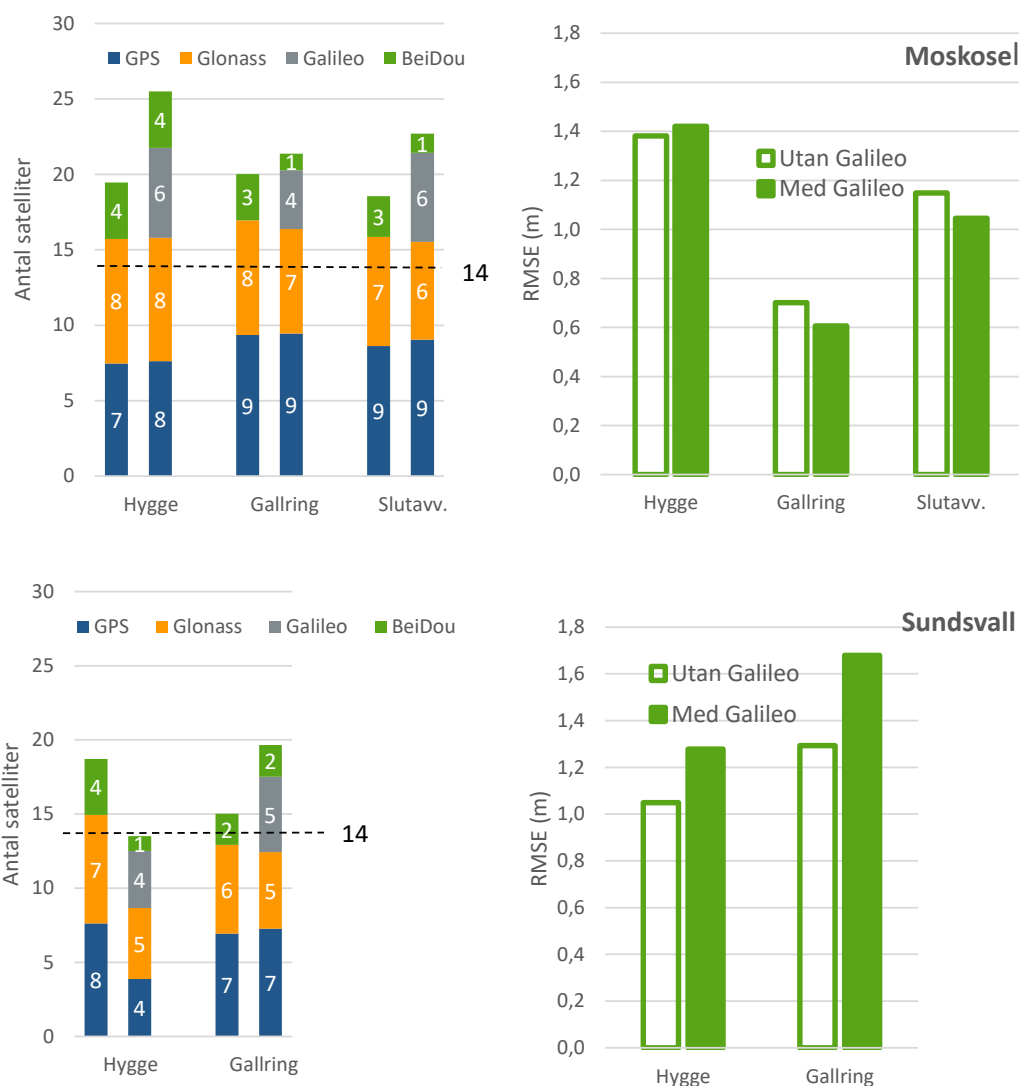


Figur 21. Genomsnittligt antal satelliter per satellitsystem och skogstyp vid mätning i Remningstorp med två parallella Arrow-enheter konfigurerade för mätning utan Galileo-satelliter (första stapeln) respektive med Galileo-satelliter (andra stapeln).

I Moskosel och Sundsvall fanns det ingen tydlig effekt på mätfelet av att inkludera Galileo-satelliter. Vid mätning med Galileo-satelliter var det genomsnittliga mätfelet i tre fall högre och i två fall lägre än vid mätning utan satelliter från detta system (Figur 22). Granskning av satellitantal och deras fördelning på satellitsystem visade att fyra till sex Galileo-satelliter använts och att antalet satelliter för de övriga satellitsystemen påverkats i liten utsträckning (Figur 22). Undantaget utgjordes av mätningarna på hygge i Sundsvall där inkludering av fyra Galileo-satelliter medförde en markant minskning av antalet satelliter från de övriga tre satellitsystemen.

För samtliga mätningar utan Galileo-satelliter i Moskosel och Sundsvall översteg satellitantalet den kritiska nivån på cirka 14 satelliter. Vi tolkar frånvaron av gynnsam påverkan från Galileo-satelliter på mätfelet på dessa lokaler som orsakad av detta förhållande. Det vill säga att satellitinformationen vid mätning utan Galileo-satelliter var "tillräcklig" under de aktuella förutsättningarna och att tillkommande Galileo-satelliter inte förmådde tillföra verkningsfull information.

Sammanfattningsvis visar våra resultat att en handfull tillkommande Galileo-satelliter kan minska mätfelet vid satellitbaserad positionering i skogsmiljöer med cirka 0,5 m. Effekten förefaller dock vara begränsad till mätningar då det totala antalet tillgängliga satelliter är relativt få.



Figur 22. Genomsnittligt antal satelliter per satellitsystem och skogstyp samt genomsnittligt mätfel per skogstyp samt vid mätning i Moskosel (övre figurer) och Sundsvall (nedre figurer) med två parallella Arrow-enheter konfigurerade för mätning med Galileo-satelliter respektive utan Galileo-satelliter. För slutavverkning i Sundsvall saknades relevant mätinformation.

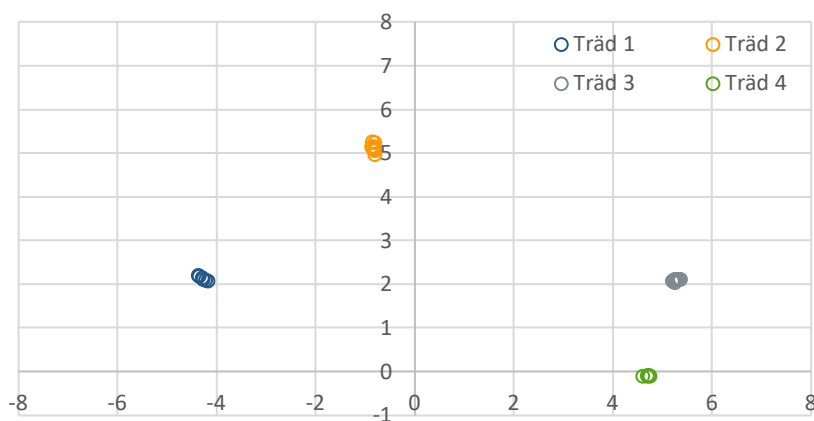
POSITIONERING AV ENSKILDA TRÄD

I tabell 7 redovisas den genomsnittliga standardavvikelsen för mätningarna av kranvinkel och utsträckt kranlängd för sekvenserna då skördaren greppat träden med aggregatet och hållit det stilla. Den genomsnittliga standardavvikelsen för de två parametrarna uppgick till 0,2 grader, respektive 6 mm. Motsvarande standardavvikelse för avståndet i markplanet, det vill säga då data över kranvinkel och utsträckt kranlängd omformats till punkter i ett tvådimensionellt koordinatsystem med kranfoten i origo, uppgick till 11 mm. Sammantaget indikerar de låga värdena på standardavvikelserna att givarna som används för att mäta kranvinkel och utsträckt kranlängd har en mycket hög precision.

Tabell 7. Enhet, antal observationer och genomsnittlig standardavvikelse för mätningarna av kranvinkel och utsträckt kranlängd samt för avståndet i planet då skördaren greppade enskilda träd och höll aggregatet stilla under cirka 5 sekunder.

Variabel	Enhet	Genomsnittlig standardavvikelse	N
Kranvinkel	grader	0,20	31
Utsträckt kranlängd	mm	6	31
Avstånd i markplanet	mm	11	31

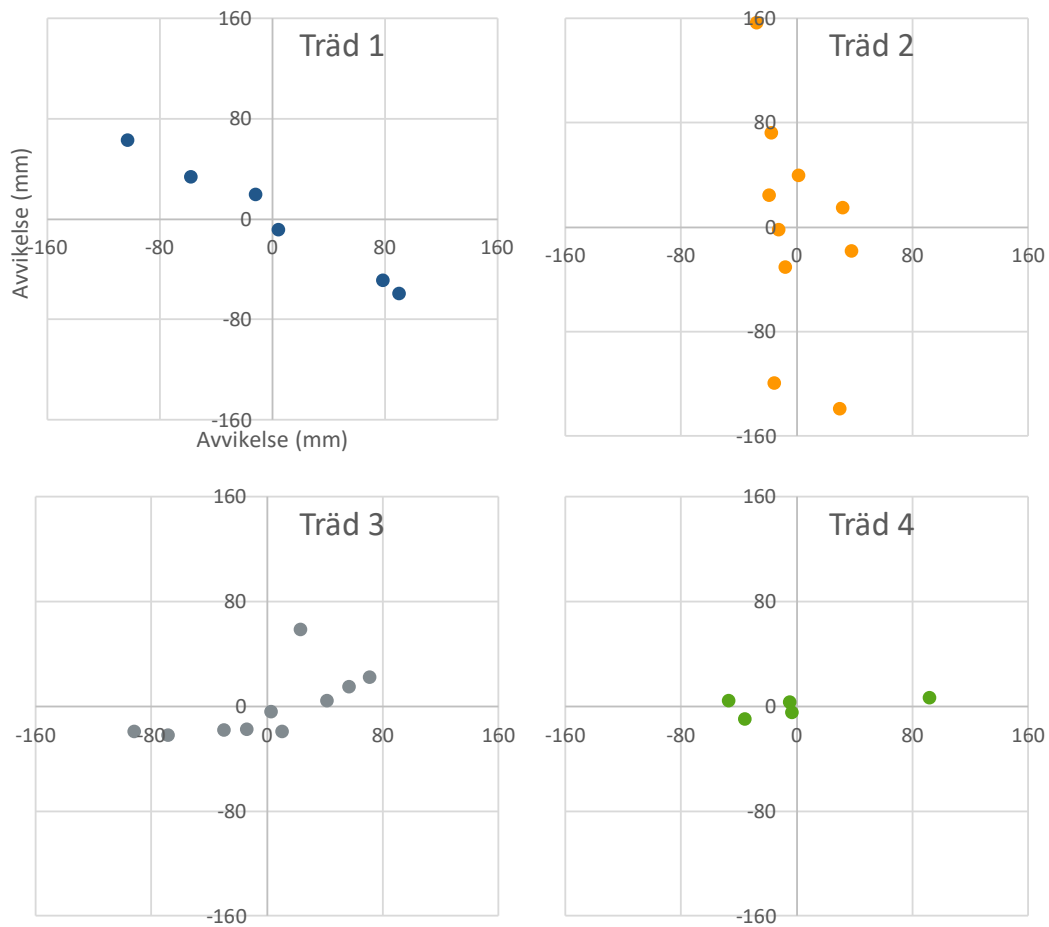
I figur 23 redovisas avstånden, uttryckt i meter från kranfoten, för mätningarna då skördaraggregatet greppade de fyra träden och aggregatet hölls stilla. För varje träd upprepades sekvensen med stillastående mätning fem till tio gånger och i figuren redovisas den genomsnittliga positionen för respektive sekvens inom träd. Som framgår av figuren låg positionerna från de olika sekvenserna mycket nära varandra för träden. Även kranrörelserna mellan träden som greppats följde ett logiskt mönster (se bilaga 2).



Figur 23. Genomsnittlig position per sekvens med stillastående mätning på de fyra träden. Positionerna är beräknade från mätning av kranvinkel och utsträckt kranlängd. I koordinatsystemet motsvarar origo läget för kranfoten.

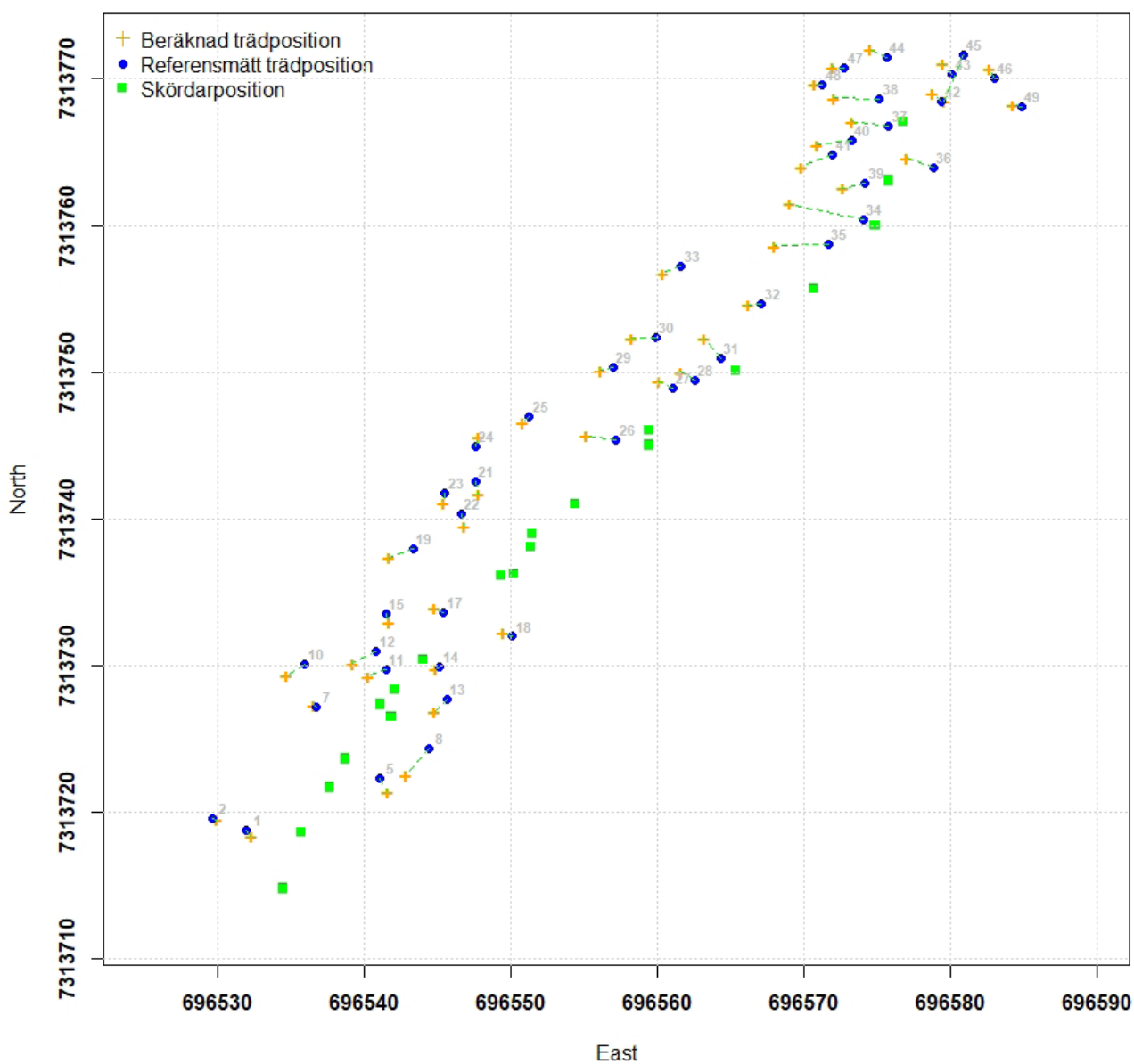
I figur 24 återfinns en inzoomning av mätdata för de olika träden och där den genomsnittliga positionen per sekvens är uttryckt som avvikelsen från den genomsnittliga positionen för samtliga mätningar per träd. Avvikelsen är uttryckt i mm och i genomsnitt uppgick avvikelsen till 60 mm. Vi betraktar detta som ett mått på repeterbarheten av den samlade mätinformationen från givarna som registrerar kranvinkel och utsträckt kranlängd. Måttet inkluderar spridningen från givarna (mindre del) samt sannolikt att aggregatet ansåts lite olika vid upprepad greppning av samma träd.

Vår samlade slutsats från detta försök är att skördarens givare för registrering av kranvinkel och utsträckt kranlängd har en mycket hög precision och att de enskilda trädens position relativt kranfoten kan återges med mycket hög repeterbarhet, åtminstone för ett givet tillfälle. För bestämning av trädposition baserat på skördardata innebär det att bidraget från dessa två parametrar till det totala positioneringsfelet kan anses försumbart. Kranens systematiska fel har här inte studerats i detalj, men den goda repeterbarheten antyder den kan kalibreras med gott resultat.

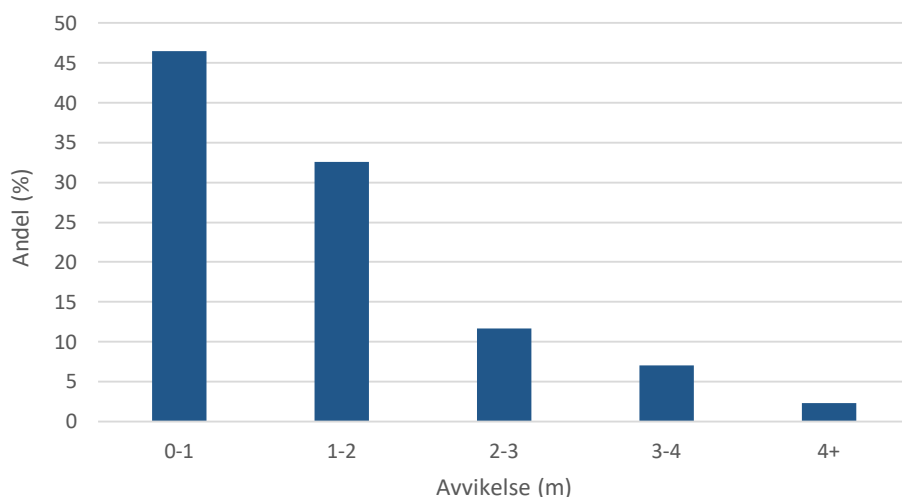


Figur 24. Data från försök med stillastående skördare och upprepad mätning på fyra träd. Punkterna representerar genomsnittlig trädposition per upprepning beräknad från skördarnas mätning av kranvinkel och utsträckt kranlängd. Positionerna är uttryckta som avvikelser (i mm) från den genomsnittliga positionen från samtliga mätningar på respektive träd.

Jämförelse mellan trädpositioner beräknade från skördardata med trädpositioner från den manuella referensmätningen visade på en generellt god överensstämmelse (Figur 25). Medelvärdet för avvikelsen mellan trädposition genererad från skördardata och trädposition från manuell referensmätning var 1,4 m, medan standardavvikelsen för motsvarande avvikelser uppgick till 1,0 m. Huvuddelen av avvikelserna låg inom 2 meter (Figur 26).



Figur 25. Jämförelse mellan trädpositioner beräknade från skördardata (gula plustecken) med trädpositioner från den manuella referensmätningen (blå cirklar). Positionen för skördarens GNSS-antenn då träden fälldes illustreras med gröna kvadrater.



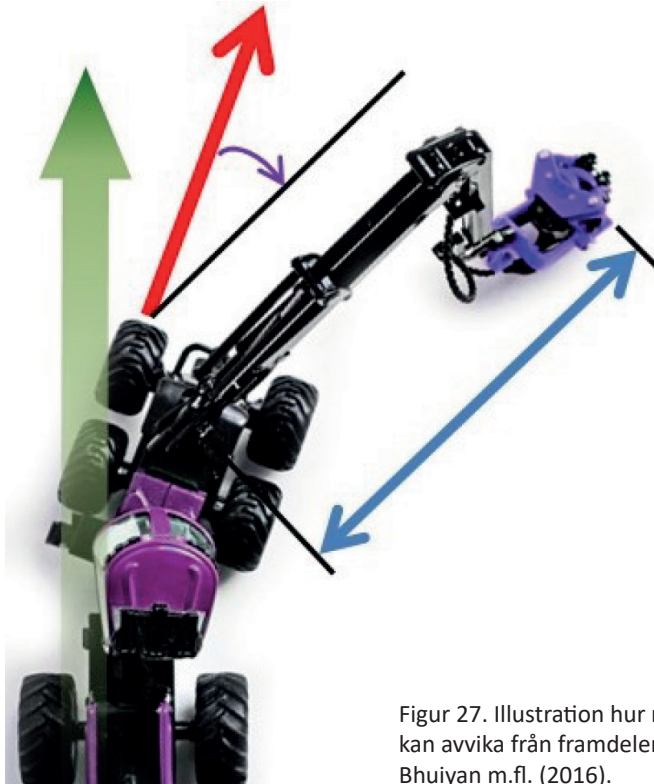
Figur 26. Fördelningen av avvikelser mellan trädposition beräknad från skördardata och trädposition från manuell referensmätning.

Vilken nivå på noggrannheten bör då krävas för att trädpositioner beräknade från skördardata ska vara användbara till exempel i fjärranalyssammanhang?

Ett riktvärde som föreslagits är 1 m (Personlig kommunikation: T. Gobakken, Norwegian University of Life Sciences, Norge). Detta baserat på att en sådan nivå skulle innebära att den beräknade trädpositionen borde finnas inom kronans täckning registrerad ovanifrån. Noggrannheten som skattats i vår studie nådde alltså inte upp till denna nivå fullt ut. De större felkällor som kan angripas diskuteras nedan.

- Global skördarposition.** I vår studie användes en Arrow 100 GNSS-mottagare från tillverkaren Eos. Positioneringen gjordes med kodmätning och realtidskorrektion med EGNOS-systemet. Baserat på data från vår studie kan mätfelet för denna typ av mätning skattas till intervallet 0,5–1,0 m. För att förbättra bestämningen av skördarens globala position kan mätning med nätverks-rtk användas. Vid rtk-mätning används på samma sätt som vid kodmätning tidsförskjutningen mellan satellit och mottagare, men därutöver information om fasförskjutningen för bärvågen. Korrektion för rådande atmosfäriska störningar görs med korrektionssignal genererad från Swepos fasta referensstationer. Sammantaget ger denna typ av mätning en mycket hög noggrannhet på cm-nivå. Mottagarna som krävs för att kunna mäta med rtk är dyrare och metoden är i sig känsligare för objekt som stör sikten mot satelliterna (träd). Vid slutavverkning bör dock det senare inte vara något avgörande hinder.
- Skördarens färdriktning.** Det finns ingen kompass i skördarna så i vår studie beräknades skördarens färdriktning med hjälp av en tidigare utvecklad algoritm (Bhuiyan m. fl. 2016) vilken baseras på data för basmaskinens koordinater vid fällning av stammarna. Denna beräkning av riktningen ger bra resultat för partier där skördaren rör sig stadigt framåt i samma riktning men mindre bra för partier med tvära riktningförändringar. Det finns etablerad teknik för att momentant beräkna färdriktningen med hög precision med hjälp av två GNSS-mottagare. Tekniken används på till exempel grävmaskiner (Leica 2019) och båtar.

- **Vridning i maskinens midja.** När maskinen svänger kommer maskinens beräknade färdriktning av vara annorlunda jämfört med riktningen för framdelen av maskinen, där kranfoten är placerad (Figur 27). Denna felkälla kan förmodligen vara betydande vid tvära riktningsförändringar. Information om vinkelutslaget i maskinens midja registreras i maskinens styrsystem och borde alltså vara användbar för att öka noggrannheten vid positionering av träd baserat på skördardata. Dock har det inom ramen för denna studie inte varit möjligt att ta del av sådan information.



Figur 27. Illustration hur maskinens färdriktning (grön pil) kan avvika från framdelens riktning (röd pil). Figur från Bhuiyan m.fl. (2016).

Resultat från en nyligen publicerad norsk studie (Hauglin m. fl 2017) visar att det är möjligt att nå ett genomsnittligt fel på 1 m eller lägre vid positionering av träd med hjälp av skördardata. Skördaren som ingick i studien var utrustad med dubbla GNSS-mottagare, rtk-mätning och givare i krandelarna för att erhålla data över kranvinkel och utsträckt kranlängd. Skillnaden jämfört med vår studie var framförallt att rtk-mätning och dubbla GNSS-mottagare användes. Genom att jämföra resultaten från den norska studien med vår gör vi uppskattningen att det totala positioneringsfelet i vår studie till knappt hälften orsakades av osäkerhet i positionsbestämningen av skördarens globala position och i bestämningen av färdriktningen. Vår hypotes är att den andra halvan av det totala mätfelet till stor del orsakas av vridningen i maskinens midja.

Sammanfattningsvis drar vi följande slutsatser från tidigare studier samt våra två försök med trädpositionering baserat på skördardata:

- Det är möjligt att nå en relevant nivå på noggrannheten vid trädpositionering baserat på skördardata motsvarande 1 m eller lägre. Detta kräver dock att kompletterande teknik används och/eller att ny information tillförs.
- Skördarens givare för registrering av kranvinkel och utsträckt kranlängd har en mycket hög precision. För bestämning av trädposition baserat på skördardata kan bidraget från dessa två parametrar till det totala positioneringsfelet anses försumbart. De övriga, huvudsakliga felkällor som identifierats är bestämningen av skördarens globala position, beräkning av färdriktning och vridning i maskinens midja.
- Det är angeläget att nya studier görs för att finna kostnadseffektiva lösningar som möjliggör positionering av träd från skördardata med noggrannhet som harmonierar med kraven i skogliga tillämpningar.

Referenser

- Ahrenberg, M. & Olofsson A. 2005. En noggrannhetsjämförelse mellan nätverks-RTK och nätverks-DGPS. Examensarbete vid högskolan i Trollhättan/Uddevalla. LMV-Rapport 2005:3. 70 s.
- BeiDou 2019. <http://en.beidou.gov.cn/> Tillgänglig 191024.
- Bhuiyan, N., Möller, J.J., Hannrup, B. & Arlinger, J. 2016. Arealberäkning samt registrering av kranvinkel för identifiering av stickvägsträd och beräkning av gallringskvot. Arbetsrapport från Skogforsk, nr 899. 39 s.
- ESA 2019. European Space Agency. http://www.esa.int/Applications/Navigation/Galileo_and_EGNOS. Tillgänglig 191024.
- Hauglin, M., Hofstad Hansen, E., Naesset, E., Even Busterud, B., Glenn Omholt Gjevestad, J. & Gobakken, T. 2017. Accurate single-tree positions from a harvester: a test of two global satellite-based positioning systems. Scand. J. For. Res. 8: 774-781.
- Hellström, C. & Johansson, S. 1993. Exakta positioner och arealer med GPS. Resultat nr. 13 Skogforsk. 4 s.
- Kaartinen, H., Hyypä, J., Vastaranta, M., Kukko, A., Jaakkola, A., Yu, X., Pyörälä, J., Liang, X., Liu, J., Wang, Y., Kaijaluoto, R., Melkas, T., Holopainen, M. & Hyypä, H. 2015. Accuracy of kinematic positioning using global satellite navigation systems under forest canopies. Forest. 6: 3218-3236.
- Leica 2019. <https://leica-geosystems.com/sv-se/products/machine-control-systems/excavator>. Tillgänglig 191209.
- Lindroos, O., Ringdahl, O., La Hera, P., Hohnloser, P. & Hellström, T. 2015. Estimating the position of the harvester head – a key step towards the precision forestry of the future? Croat. J. For. Eng. 36: 147-164.
- Möller, J.J., Arlinger, J., Barth, A., Bhuiyan, N. & Hannrup, B. 2011. Ett system för beräkning och återföring av skördarbaserad information till skogliga register och planeringssystem. Arbetsrapport 756, Skogforsk. 56 s.
- Skogforsk 2017. <https://www.skogforsk.se/kunskap/kunskapsbanken/2017/jamforelse-av-gps-mottagare-visar-overraskande-resultat/>
- Swepos 2019. <https://www.lantmateriet.se/swepos>. Tillgänglig 191024.
- Willén, E. & Andersson, G. 2015. Drivningsplanering. En jämförelse mellan sju skogs-företag 2015. Arbetsrapport 885-2015. Skogforsk. 32 s.
- Willén, E. & Mohtashami, S. 2017. Kartering av fornminnen i skogen med fjärranalys. Arbetsrapport 923-2017. Skogforsk. 36 s.

Bilaga 1. Bilder på de utvärderade satellitmottagarna

Arrow 200 med extern antenn



ppm 10xx



Garmin GLO



Garmin 62



iPad



FIDS Zelo



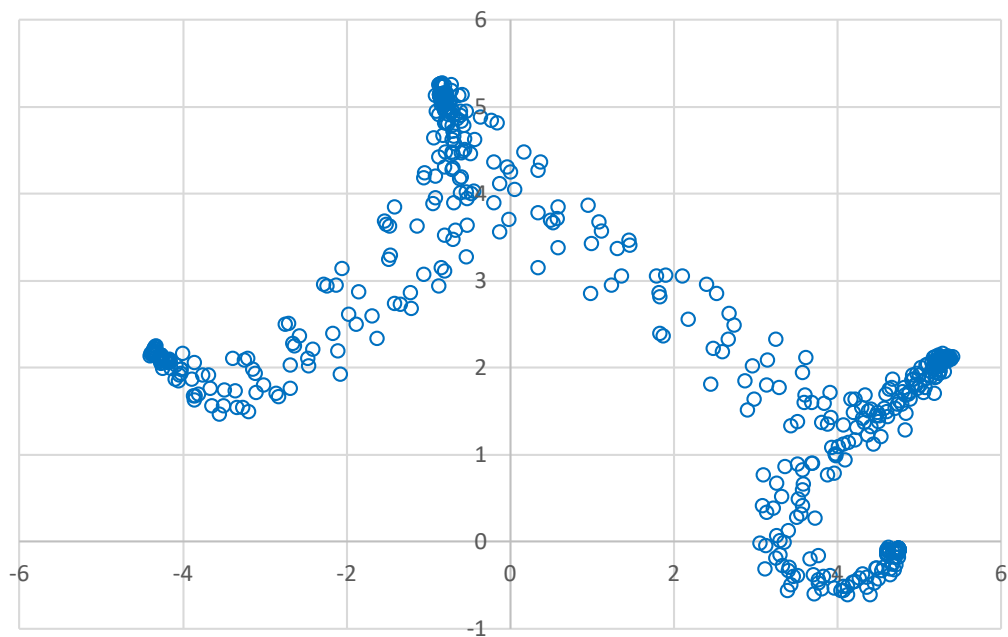
Huawei P30 Pro



Sony XZ2



Bilaga 2. Repeterbarhetstest för krangivare



Plot av aggregatpositionen från repeterbarhetsförsök där positionerna genererats från mätningar av kranvinkel och utsträckt kranlängd. I försöket greppade föraren fyra stammar med aggregatet upprepade gånger och höll aggregatet stilla vilket syns som punktsvärmar i figuren. Kranrörelserna mellan stammarna återges också i figuren.