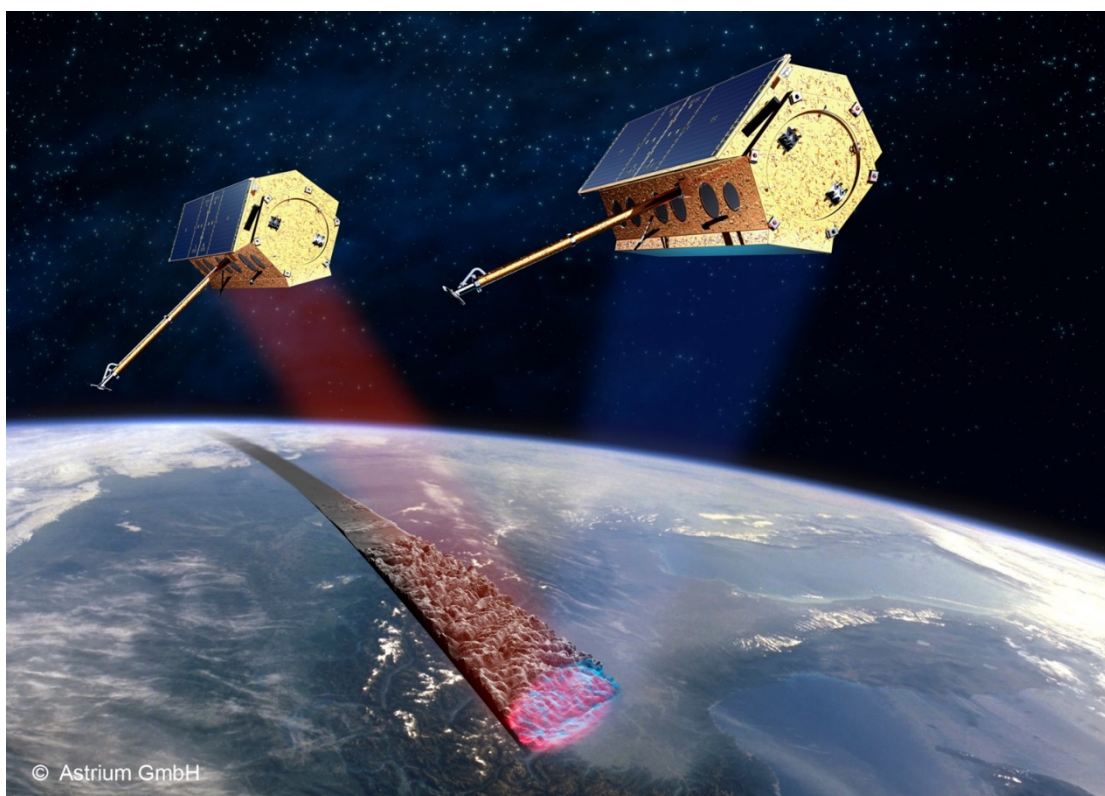


Framskrivning av ALS data med TanDEM-X

Forecasting of ALS data using TanDEM-X



TerraSAR-X and TanDEM-X in space. DLR, German Aerospace Centre

André Wästlund

Arbetsrapport 459 2016
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet

Handledare:
Henrik Persson

Framskrivning av ALS data med TanDEM-X

Forecasting of ALS data using TanDEM-X

André Wästlund

Nyckelord: Radar, interferometri, framskrivning, InSAR

Examensarbete i Skogshushållning vid institutionen för skoglig resurshushållning, 30 hp
EX0768, A2E

Handledare: Henrik Persson, SLU, institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Examinator: Håkan Olsson, SLU, institutionen för skoglig resurshushållning, fjärranalys

Sammanfattning

För att ha möjlighet att sköta skogen på ett hållbart sätt krävs att vi har tillgång till tillförlitligt data om det skogliga tillståndet. Fjärranalys är och kommer vara en allt viktigare teknik för att tillägna sig denna information på ett kostnadseffektivt sätt och med önskad kvalitet. Satellitburen radar har visat sig ha potential för insamling av information om det skogliga tillståndet. Satellitparet TanDEM-X och TerraSAR-X levererar InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) data med möjlighet till beräkning av en tredje dimension och potential för goda skattningar, med hög temporal upplösning.

I detta arbete presenteras en metod för att väga samman en tidsserie av radarbilder tagna med TanDEM-X konstellationen och utifrån bilderna skriva fram skattningar utförda med en laserskanning från år 2010. Genom att nyttja flera radarbilder förväntas skattningsresultatet förbättras, ett antagande som testades genom att längden av tidsserien med radarbilder varierades. Studien utfördes på försöksfastigheten Remningstorp i Västra Götaland och som referensdata användes cirkulära ytor med en radie av 10 meter och 40 meter, inventerade år 2010 och 2014.

Om 14 radarbilder tagna under perioden 2011 till 2014 används tillsammans med laserskanningen utförd år 2010, skattas den grundytvägda höjden med ett RMSE på 5,9% och volymen med ett RMSE på 18,2%, för skattningar på beståndsnivå år 2014. Skattningarna gynnades av en längre tidsserie bilder.

Framskrivningsmetodiken som är beskriven i denna rapport visar god potential för framskrivning av skogliga skattningar, men behöver utvecklas ytterligare före den kan rekommenderas för praktisk tillämpning inom skogsinventering.

Nyckelord: Radar, interferometri, uppdatering, InSAR

Summary

To be able to manage the forest in a sustainable manner, we need to have access to reliable data of the forest condition. Remote sensing is and will be an important technique to obtain this information in a cost effective way and with the required quality. Satellite-borne radar has shown to have potential for collecting this information. The Satellite mission TanDEM-X and TerraSAR-X delivers InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) data with potential for three dimensional calculations and good estimates, with high temporal resolution.

This work presents a method for updating forest parameters from a time series of radar images acquired with the TanDEM-X constellation and a laser scanning from 2010. By using a longer time series of radar images the estimation quality is expected to be improved, an assumption that was tested by changing the length of the time series of radar images. The test site in this study was Remningstorp in southern Sweden and as reference data circular plots with a radius of 10 meter and 40 meter, inventoried in 2010 and 2014, were used.

When 14 radar images acquired during the period 2011 to 2014 are used in combination with a laser scanning from 2010, the estimation quality for Lorey's mean height had a RMSE of 5.9% and for volume a RMSE of 18.2%, for estimation on stand level in 2014. The estimation quality improved when a longer time-series of radar images were used.

The method described in this article shows good potential for forecasting forest variables, but need further development before it can be recommended for practical use in forest inventory.

Keywords: Radar, interferometry, updating, InSAR

Innehåll

Sammanfattning.....	2
Summary.....	3
Inledning.....	5
Syfte.....	7
Material.....	8
Försökslokal	8
Provytor	8
Laserskanning.....	9
Radarbilder	9
Metod.....	10
Bearbetning av rådata radar.....	10
Höjdkalibrering.....	10
Hantering av uteliggare	10
Modellering	12
Sammanvägning av datakällor.....	14
Utvärdering av framskrivningar	15
Resultat	16
Utvärdering modeller.....	16
Enskilda datakällors skattningskvalitet	17
Framskrivning med olika lång tidserie radarbilder.....	18
Diskussion	22
Slutsatser.....	23
Tillkännagivanden	24
Litteraturlista.....	25

Inledning

Skogen har varit och är ett viktigt skafferi i strävan efter ett hållbart nyttjande av jordens resurser. Aldrig tidigare har större fokus lagts på att föra vårt samhälle in i en sundare relation med moder jord. Detta präglar vår syn på nyttjandet av naturtillgångar och det ställs större krav på att det utförs på ett hållbart och effektivt sätt. Det är inte bara en föränderlig tid vi verkar i. Skogen är en resurs som till sin karaktär alltid är i utveckling och en förutsättning för ett effektivt och hållbart nyttjande är att man ständigt har tillgång till data om dess tillstånd. Under lång tid har information om skogens tillstånd samlats och sammanställts manuellt i olika former av register. Man har delat in skogen i skötselenheter och givit dessa enheter ett generaliserat medelvärde för dess tillstånd. Både datats kvalitet och upplösning i tid har stått i direkt relation med arbetsinsatsen och därmed till prioriteringen av tid. På senare år har möjligheten att samla in data på ett mer effektivt sätt ökat radikalt. Utvecklingen inom fjärranalys går fort framåt och man har i dag möjlighet att automatiskt samla in heltäckande data med jämförbar kvalitet som manuella inventeringar (Kangas 2010). En viktig teknik för detta framsteg har varit luftburen laserskanning (ALS) (Koch 2010). En klar fördel med denna inventeringsmetodik är att man får data med betydligt bättre spatial upplösning på ett kostnadseffektivt sätt. Men det finns ytterligare ett problem att hantera. På samma sätt som vid manuell inventering krävs en investering av resurser för att upprätthålla upplösning i tid, så kallad temporalupplösning. För att ha möjlighet till upprepad datainsamling med tätare intervall, har intresset för satellitburna system väckts. När en satellit väl har trätt in i sin omloppsbanan, passerar de områden av intresse med regelbundna intervall. Utmaningen med satellitburna system är och har varit att finna en analysteknik som kan leverera tillräckligt med data av en sådan kvalitet att det går att nyttja för skattningar av skogliga variabler, samt de tekniska svårigheter som det innebär att konstruera satelliten.

Optiska satellitbilder har länge använts för att tillägna sig information om skogen, men då främst i tvådimensionell form, 1972 togs Landsat 1 i bruk. Många skogliga variabler, så som skogens höjd och volym, skattas betydligt bättre om man har ett system som beviljar en tredje dimension. En sådan teknik är stereofotogrammetri från högupplösta satellitbilder. Vid stereofotogrammetri utnyttjas den parallax som uppträder då man observerar ett föremål från skilda positioner. Utifrån förskjutningen kan man med trigonometriska samband beräkna föremålets orientering även i det vertikala planet. En betydande svårighet med optiska bilder är att de är beroende av klart väder. Användning av 3D data från optiska satelliter som tittar framåt och bakåt har tillsammans med en digital markmodell (DEM) gett skattningskvalitet för grundtevägd höjd med ett relativt RMSE av 15,3 % för skattningar från den optiska stereo-sensorn HRS på SPOT-5 satelliten och 12,9 % för skattningar från ALOS PRISM. Skattningskvaliteten avser skattningar på beståndsnivå. Motsvarande siffror för volymkattningar har angetts till 29,2 % för SPOT-5 bilder och 22,4 % för bilder från ALOS PRISM (Persson m.fl. 2013). I en tidigare studie (Wallerman m.fl. 2010) påvisade man att optiska bilder tillsammans med en DEM från laserskanning har god potential för skogliga skattningar. Från de optiska bilderna skapade man en kronhöjdsmodell (CHM). Metodiken påvisade skattningar på beståndsnivå med ett RMSE av 7,3% för grundtevägd höjd, 9% för diameter och 19% för skattningar av volym.

En annan sensorteknik som uppvisat god potential för noggranna skattningar av skog är satellitburen radar. Utvecklingen av radarteknik tog sin början under andra världskriget. Tillämpningen av tekniken var då avståndsmätning och lokalisering av föremål. Först i början av 60-talet presenterade La Prade (1963) möjligheten att nyttja radarbilder för stereotolkning.

Det är särskilt tredimensionella data som beräknats från par av radaregistreringar som gjorts från olika satellitbanor som visat sig ge bra resultat för skogliga skattningar. En sådan teknik är radargrammetri som bygger på samma teori som stereofotogrammetri från optiska bilder. Vid användning av radargrammetri förlitar man sig helt på intensiteten i varje pixel och genom att matcha pixlar med varandra från de olika observationspunkterna, kan man med hjälp av parallax och trigonometri beräkna även den tredje dimensionen i bilden. Flertalet artiklar har behandlat potentialen hos radargrammetri för skattning av skogliga variabler. En gemensam företeelse för flera av studierna har varit att skogens höjd har underskattats kraftigt (Perko 2010a, Perko 2010b, Perko 2010c, Perko 2011). En viktig orsak till underskattningen tros vara det frekvensberoende penetrationsdjupet. Beroende på radarns frekvens reagerar den olika på föremål beroende av dess storlek. Därav penetrerar den olika djupt i trädkronan beroende på frekvens. På senare tid har flera studier påvisat mer lovande skattningsresultat (Karjalainen 2012, Vastaranta 2014, Persson 2014). Genom att beräkna skillnaden mellan, en från radarbilder erhållen digital ytmodell (DSM) och en digital höjdmodell av markytan (DEM) framställd från laserskanning, kunde Persson m.fl. (2014) påvisa goda skattningsresultat på beståndsnivå. Volymen skattades i denna studie med ett relativt RMSE om 25-30 % och höjden med i storleksordningen 10 %.

En förutsättning för att stereotolkning ska vara möjligt är att man observerar samma område från två olika positioner. I detta sammanhang brukar man tala om två olika sätt att tillägna sig dessa data. Ett vanligt tillvägagångssätt har varit att ta en bild på området i fråga och sedan vänta till satelliten passerar nästa gång, så kallad repeat-pass. En nackdel med detta angreppssätt är att bilden inte är tagen vid samma tidpunkt. Förhållandena och förutsättningarna för skattningarna kan ha förändrats mellan tidpunkterna då bilderna tas. Några av faktorerna som omtalats har varit förändringar i atmosfären, men även faktorer som nederbörds mängd och vindförhållande tros inverka på skattningsresultatet från radarsensorer (Hagberg m.fl. 1995, Zebker m.fl. 1992). En bättre lösning är således att ta bilderna vid samma tidpunkt, så kallad singel-pass. På denna punkt har förutsättningarna förbättrats. Satellitparet TanDEM-X beviljar stereobilder tagna vid samma tidpunkt. Satellitparet består av två nästan identiska satelliter, som båda kan sända ut och ta emot radarsignaler. På detta sätt kan bilder från två åtskilda positioner erhållas med näst intill ingen tidsskillnad. Satelliterna åtskiljs med några få hundra meter vilket medger tillämpning av tekniken Interferometric synthetic aperture radar (InSAR) under förutsättningarna singel-pass.

Interferometri innebär att man beräknar fasskillnaden mellan två radarbilder. Genom att multiplicera radarbildernas pixlar med varandra erhålls produkten, vilken är fasskillnaden mellan bilderna. En metod som använts för att skatta skogliga parametrar, är den så kallade Water Cloud Model. En första ansats till tekniken presenterades av Attema och Ulaby (1978) och Interferometric Water Cloud Model (IWCM) introducerades av Askne m.fl. (1995). Tekniken bygger på att man föreställer sig vegetationen som ett moln med vattendroppar. En annan teknik som använts för att skatta skogliga parametrar är den så kallade Random Volume over Ground (RVoG). Modellen presenterades av Treuhaft m.fl. (1996). För att ha möjlighet att beräkna modellparametrarna krävs mer än en radarbild.

Modellen kräver tillgång till flera baslinjer, frekvenser eller polarisationer. Askne m.fl. (2013) jämförde IWCM och RVoG för skattningar av biomassa, från TanDEM-X data. De fann att biomassan skattades med ett RMSE av 17%-33% för IWCM och 17%-40% för skattningar med RVoG. Soja och Persson (2015) presenterade ytterligare ett angreppssätt för bearbetning och skattningar från Singel-pass InSAR data. Modellen kallas Two-Level model. Med denna teknik påvisade de potentialen för goda skattningar av skogliga variabler.

Syfte

Syftet med denna studie är att utreda huruvida satellitburen radar från satelliterna TanDEM-X och TerraSAR-X kan användas för att uppdatera och upprätthålla god kvalitet på datat om det skogliga tillståndet. Studien presenterar ett tillvägagångssätt för uppdatering och framskrivning av tidigare skattningar av skogens grundytvågda höjd och volym.

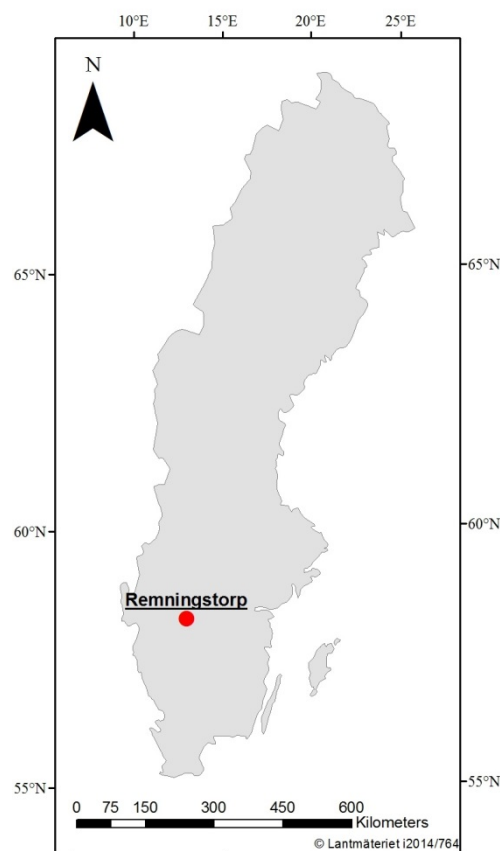
Material

Försökslokal

I den här studien har försökslokalen Remningstorp i Västra Götaland använts (Fig.1). Området utgörs av 1200 hektar hemi boreal skog och utgörs till största delen av gran och tall, men inslag av björk förekommer. Området är platt med höjdvariationer mellan 120 och 145 meter över havet (Ahlberg m.fl. 1997).

Provytor

Som referens har ett antal provytor mätts in både i början och i slutet av försöksperioden. Vid inventeringen mättes ytor av två olika storlekar in. År 2010 inventerades 228 ytor med en radie av 10 meter och år 2014 inventerades 219 ytor med en radie av 10 meter, samt 40 ytor med en radie av 40 meter. År 2011 inventerades 32 ytor med en radie av 40 meter (Tabell 1). Ytorna med en radie av 10 meter lades ut systematiskt, med ett kvadratisk förband med sidan 200 meter. Utläggningen var den samma både för år 2010 och 2014 års inventering, varför inventeringen för de flesta ytorna var en återinventering. Några av ytorna förekommer bara vid ett av inventeringstillfällena. Ytorna med 40 meters radie lades ut subjektivt i bestånd med äldre skog.



Figur 1. Försökslokalen Remningstorp.
Figure 1. Test site Remningstorp.

Tabell 1. Provytor som använts som referensytor. Av tabellen framgår vilken radie ytan har och hur många ytor som inventerades vid given tidpunkt

Table 1. The sample plots used for validation. The table shows the radius of the plot and how many plots that were inventoried at the given time

Provyteradie	Antal	Inventeringsår
10 m	228	2010
10 m	219	2014
40 m	32	2011
40 m	40	2014

Laserskanning

För skattningar baserade på flygburen laserskanning har en skanning från 2010-09-29 och en från 2014-09-14 använts. Punkttätheten vid skanningen år 2010 var 10-30 punkter per kvadratmeter och vid 2014 års skanning var tätheten 30 punkter per kvadratmeter. Lasermolnets metriker redovisades i raster med pixelstorleken fem meter. Metrikerna som använts för skattning av skogliga parametrar är den 95:e höjpercentilen över 1,37 meter (P_{95}) och andelen av returerna som reflekterades över höjden 1,37 (DNS) (Tabell 2).

Tabell 2. Tabellen redovisar vilka lasermetriker som använts för skattningar och metrikernas innebörd

Table 2. The table shows the laser metrics used in the models and what they describe

Metrik	Beskrivning
P_{95}	Den 95:e höjpercentilen av de punkter som befinner sig över tröskelvärde 1,37 meter över marken.
DNS	Andelen av alla laserreturer över 1,37 meter över marken.

Radarbilder

Radarbilderna som använts i studien är tagna från TanDEM-X konstellationen, vilket är ett satellitpar med arbetsfrekvensen i X-bandet (G. Krieger m.fl. 2007). Bilder som uppvisat potential för god skattningskvalitet av skogens gundytevägda höjd och volym, har valts ut (Tabell 3). Detta för att undvika felkällor från yttre och okända faktorer. Rastren har pixelstorleken fem meter. HOA värdet beror av avståndet mellan satelliterna när bilderna tas och har betydelse för höjdkänsligheten, vid mätning av markobjekt, med interferometri.

Tabell 3. Tabellen redovisar tidpunkten då bilderna togs, samt dess specifikationer

Table 3. The table shows at which time the photos were taken, as well as their specifications

Datum	HOA (m)	Polarisation	Infallsvinkel (°)
2011-06-04	49	VH/VV	41
2011-08-09	52	VV	41
2011-08-20	54	VV	41
2012-02-01	80	VV	41
2012-02-12	79	VV	41
2012-02-23	79	VV	41
2012-06-01	32	VV	41
2012-08-28	37	VV	41
2013-07-02	50	VV	41
2013-07-24	60	VV	41
2013-08-04	61	VV	41
2013-08-11	47	HH/VV	34
2014-06-08	38	VV	41
2014-08-02	48	VV	41

Metod

Bearbetning av rådata radar

Fasen i en enskild bild är helt randomiserad, men genom att väga samman två bilder kan fasskillnaden mellan de två bilderna beräknas för varje pixel. Eftersom bilderna tas vid nästan samma tidpunkt och från en relativt liten baslinje i förhållande till avståndet till det observerade objektet, kan förändringar i atmosfären mellan de olika bilderna antas vara försumbara. Från rådata bilderna och en högupplöst markmodell beräknades en interferometrisk SAR höjd, med hjälp av programvaran Gamma Software. Höjden erhöles genom att en från radarn beräknad ytmodell subtraherades med markmodellen. Från radaratats erhöles också ett raster, vilket beskriver det uppmätta koherensvärdet. Metodiken för radarbearbetningen är mer ingående beskrivet av Persson och Fransson, (2014).

Höjdkalibrering

För att motverka att radarhöjderna är förskjutna i z-led har varje raster korrigerats mot en öppen yta på försökslokalen. Det innebär att den beräknade vegetationshöjden i radarrastren för denna yta ska ha höjden noll. I varje raster beräknades medelhöjden för en cirkelyta med radien 20 meter, varpå pixelvärdena i rastren korrigerades med den beräknade avvikelser.

Hantering av uteliggare

På försökslokalen bedrivs ett aktivt skogsbruk och skogstillståndet förändras således av de åtgärder som utförs. Ett antal av provytorna i studien har påverkats av skogliga ingrepp under den tidshorisont datat till denna studie samlats in. Förändringar av skogstillståndet har betydelse för studiens resultat om de inträffar mellan fältdatats och fjärranalysdatats insamling, eller mellan fjärranalysdatat och valideringsdatats insamlingstidpunkt. I studien förekommer flera sådana tidsintervall (Tabell 4).

Tabell 4. Tabellen redovisar de tidsintervall där en förändring får betydelse för skattningskvaliteten
Table 4. The table shows the time intervals where a change has an impact for estimation quality

Referensdata/Valideringsdata	Fjärranalysdata	Scenario
10 m provytor 2010	Radarbild 2011-06-04	1
10 m provytor 2010	Laserskanning 2010	2
40 m provytor 2011	Laserskanning 2010	3
10 m provytor 2014	Laserskanning 2014	4
40 m provytor 2014	Laserskanning 2014	5
40 m provytor 2014	Radarbild 2014-08-02	6
10 m provytor 2014	Radarbild 2014-08-02	7
40 m provytor 2014	Laserskanning 2010 och radarbilder	8
10 m provytor 2014	Laserskanning 2010 och radarbilder	9

Behovet och lämplig exkluderingsmetodik varierar mellan de olika scenarierna. Den huvudsakliga tekniken för exkludering av ytor bygger på standardavvikelse. När provytorna ämnas användas för modellering av samband har ytor som avviker mer än 2 standardavvikelser exkluderats och i de fall där de används för utvärdering har ytor som avviker mer än 3 standardavvikelser exkluderats. I de fall där detekteringen baserats på ytornas standardavvikelse och ingen modell beräknats, har en preliminär modell tillämpats. Den preliminära modellen används endast för att beräkna standardavvikelsen och residualerna. För att inte enskilda ytor med stor avvikelse ska påverka den preliminära modellen för kraftigt, har dessa ytor rensats manuellt. I Scenario 8 och 9 (Tabell 4), har påverkade ytor detekterats genom att skattningarna av grundytvägd höjd och volym, från 2010 och 2014 års laserdata, ställts mot varandra, varpå påverkade ytor blev uppenbara.

Fjärranalysdata som använts i studien har inte alltid varit heltäckande för studielokalen, vilket resulterat i att alla provytor inte fått mätvärden (NA) vid varje önskat tillfälle. Radarbilderna från 2011-08-20 och 2011-08-09, samt laserdata från 2010 års laserskanning, saknar täckning för några av provytorna inventerade år 2014. Detta har resulterat i att ytorna inte gått att använda i scenario 8 och 9 (Tabell 5 och 6).

Tabell 5. Tabellen redovisar hur många provytor som fanns tillgängliga vid varje scenario och hur stor del som exkluderades vid uteliggarsrensningen. Tabellen avser skattningar och utvärdering av grundytvägd höjd

Table 5. The table shows how many plots that were available in each scenario and the proportion that were excluded in the outlier removal. The table intends estimation and evaluation of Lorey's mean height

Scenario	Ursprungligt antal	Efter rensning	Andel exkluderat (%)
1	228	215	5.7
2	228	216	5.3
3	32	28	12.5
4	219	194	11.4
5	40	39	2.5
6	40	40	0
7	219	211	3.7
8*	A=31, F=36	A=30, F=34	A=3.2, F=5.6
9**	A=167, F=219	A=159, F=201	A=4.8, F=8.2

* 4 st NA vid utvärdering av skattningar med 2010 års laserskanning på 2014 års provytor (referensvärde för ingen framskrivning) (F) och 9 st NA vid utvärdering av framskrivna värden (A).

** 52 st NA vid utvärdering av framskrivna värden (A)

Tabell 6. Tabellen redovisar hur många provytor som fanns tillgängliga vid varje scenario och hur stor del som exkluderades vid uteligggarrensningen. Tabellen avser skattningar och utvärdering av volym

Table 6. The table shows how many plots that were available in each scenario and the proportion that were excluded in the outlier removal. The table intends estimation and evaluation of volume

Scenario	Ursprungligt antal	Efter rensning	Andel exkluderat (%)
1	228	211	7.5
2	228	214	6.1
3	32	30	6.3
4	219	192	12.3
5	40	37	7.5
6	40	39	2.5
7	219	209	4.6
8*	A=31, F=36	A=30, F=30	A=3.2, F=3.2
9**	A=167, F=219	A=159, F=199	A=4.8, F=9.1

* 4 st NA vid utvärdering av skattningar med 2010 års laserskanning på 2014 års provytor (referensvärde för ingen framskrivning) (F) och 9 st NA vid utvärdering av framskrivna värden (A).

** 52 st NA vid utvärdering av framskrivna värden (A)

Modellering

Det skogliga tillståndet beträffande grundtyevägd höjd (HGV) och volym skattades från 10 meters ytorna inventerade år 2010 (Tabell 1) och laserskanningen utförd samma år (Tabell 2). Detta utfördes med hjälp av linjär regression. Sambandet för höjden beskrevs med en linjär modell bestående av den 95:e höjdpercentilen (P_{95}) och den för provytan angivna grundtyevägd höjden. Höjden beskrevs med modell 1 och modellparametrarna omnämnda som 1_{10} (Tabell 7). På samma sätt skattades höjden utifrån 2014 års provytor och laserskanningen utförd samma år. Höjden beskrevs även i detta fall med modell 1 och modellparametrarna omnämnda som 1_{14} (Tabell 7). Modellerna erhöll ett R^2_{Adj} på 0,92 för skattningar av HGV år 2014 och för HGV år 2010 var motsvarande siffra 0,83 (Tabell 8).

$$HGV = \alpha * P_{95} + \beta \quad (1)$$

Volymen beskrevs, baserat på 2010 års provytor och laserskanningen samma år, med modell 2 och modellparametrarna beskrivna som 2_{10} (Tabell 7). Skattningarna av volymen för 2014 års laserskanning och provytor samma år beskrevs med modell 2 och modellparametrarna angivna som 2_{14} (Tabell 7). Modellerna skapades med multipel regression och erhöll ett R^2_{Adj} på 0,85 för skattningar av volym år 2014 och för volym år 2010 var motsvarande siffra 0,81 (Tabell 9).

$$Volym = (\alpha * P_{95} + \beta * P_{95} * DNS + \lambda)^2 \quad (2)$$

Från radarbilderna skattades volymen med hjälp av höjd och koherensvärdet för radarbilderna tagen 2011-06-04, samt volymen angiven för 10 meters ytorna inventerade år 2010. Regressionsmodellen som användes för skattning av volym var icke linjär och följde sambandet beskrivet med modell 3 och modellparametrarna beskrivna som 3 (Tabell 7).

$$Volym = \alpha * (Radarhöjd^\beta) * (koherens^\lambda) \quad (3)$$

Tabell 7. Tabellen redovisar de modellparametrar som använts i funktion 1-3. Indexeringen anger för vilket år modellparametrarna avses

Table 7. The table shows the model parameters used in the function 1-3. The Index indicates to what year the model parameters is aimed to be adapted

Modellparameter	α	β	λ
1 ₁₀	0,963	2,542	*
1 ₁₄	0,992	1,978	*
2 ₁₀	0,153	0,007	3,292
2 ₁₄	0,132	0,009	2,339
3	18,820	0,969	-0,273

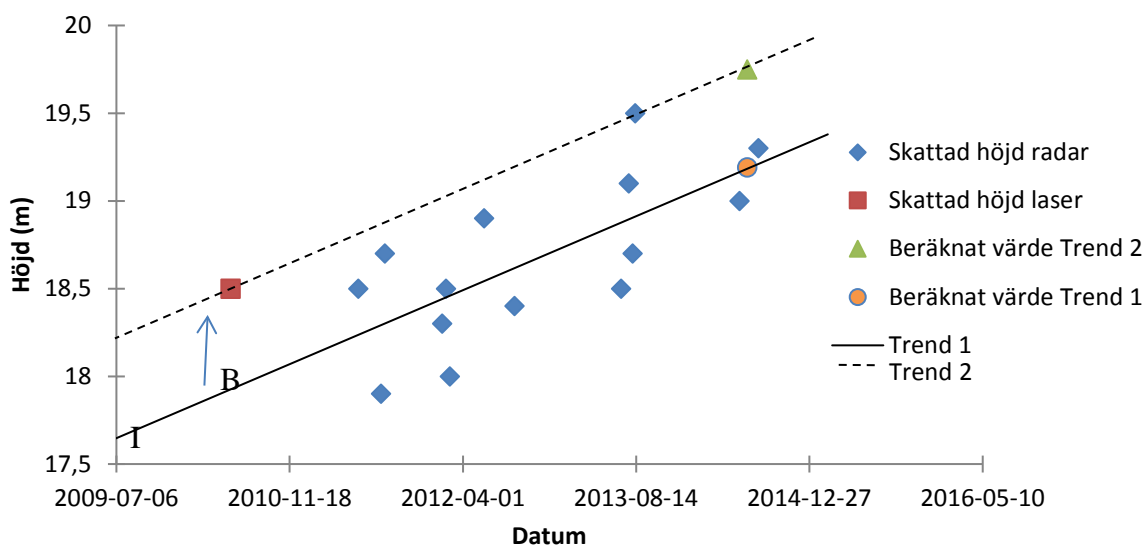
I ett inledande skede skattades även den grundytvägda höjden för radarbilderna med ett icke linjärt samband, likt modell 3. Denna modell uppvisade otillfredsställande residualplottar, varför en modell baserad på algoritmen Random Forest istället valdes. Random Forest är en icke parametrisk algoritm som bygger upp ett beslutsträd baserat på övningsmaterialets karaktär. Som ingående parametrar har den för provytan uppmätta grundytvägda höjden, tillsammans med radarhöjden, använts. Algoritmen gavs möjlighet att bygga upp 20 noder i regressionsträdet. Utifrån erfarenheten formulerad i beslutsträdet skattades HGV för radarbilderna. Random Forest algoritmen introducerades och beskrevs av Leo Breiman (2001). Algoritmen beskrivs mer ingående av angiven referens.

Sammanvägning av datakällor

För varje, med radar skattat raster, utfördes en spatial medianfiltrering. Filtreringen utfördes således för varje observationsdatum. Varje pixel tilldelades medianvärdet av det egna och de omkringliggande (24) grannpixlarnas värde. Filtreringsfönstret utgjordes av en kvadrat med sidan fem pixlar. Resultatet av bearbetningen blev en uppsättning raster filtrerade för extremvärden.

Tanken med det nedan beskrivna angreppssättet är att väga samman observationer över tid och på så sätt göra en bättre skattning av det sanna värdet vid en viss tidpunkt. Således har pixlarna med samma lokalisering geografiskt, i de olika rastren (observationstidpunkterna) en viktig koppling till varandra. För varje pixel söktes ett linjärt samband som beskrev den observerade höjden och volymen, som funktion av tiden. Vid modelleringen av sambandet mellan radarbilderna användes den robusta regressionsmetoden, Iterated reweighted least squares (IWLS). Från radarbilderna erhöles ett linjärt samband (Trend 1), med tillhörande intercept (I) och förändringshastighet (T). Eftersom vi för 2010 har tillgång till en laserskanning, vilket i tidigare studier påvisats ha god potential till noggranna skogliga skattningar, användes detta material som det initiala tillståndet för skogen i varje pixel. Informationen från laserdatat implementerades genom att interceptet (I) beräknat från de filtrerade radarbilderna korrigerades med biasen (B) mellan sambandet och värdet uppmätt i laserskattningen 2010. Det nya sambandet omnämns som "Trend 2" (Figur 2). Utifrån det korrigerade sambandet skattades det skogliga tillståndet för önskat datum (D) (2014-07-01), (modell 4).

$$\text{Beräknat värde} = T * D + (I + B) \quad (4)$$



Figur 2. I figuren illustreras ett fiktivt exempel på hur informationen i en enskild pixel bearbetas och ligger till grund för det framskrivna värdet för det önskade datumet.

Figure 2. The figure illustrates a fictitious example of how the information in a certain pixel is processed and been used for estimating the value for the date of interest.

Utvärdering av framskrivningar

Utifrån ovanstående metodik beräknades skogstillståndet för datumet 2014-07-01. Tillståndet skattades både med och utan korrigerings för det initiala tillståndet skattat från 2010 års laserdata. Metoden som endast beaktar de från radarbilderna skattade variablerna beskrevs med sambandet som omnämns som "Trend 1" (Figur 2). Skogstillståndet skattades även utifrån sambandet omnämnt som "Trend 2" (Figur 2). I detta fall har interceptet för sambandet korrigerats med det initiala tillståndet skattat från 2010 års laserdata. De uppdaterade värdena utvärderades mot 2014 års provytor. Utvärderingen skedde både för ytorna med 40 meters radie och de med 10 meters radie. I fallet med utvärdering på ytorna med 10 meters radie utfördes en Leave-one-out korsvalidering. Anledningen till att korsvalideringen utfördes för dessa ytor, var att de har samma position som ytorna inventerade år 2010 och därför bör likna varandra. Detta problem förekom inte för 40 meters ytorna, eftersom dessa ytor inte användes då modellerna byggdes. Metoden utvärderades på tre olika tidshorisonter, där endast radarbilder för aktuell period användes. De analyserade tidsintervallen var 2011-2014, 2012-2014 och 2013-2014. Utifrån de uppdaterade värdena och de för provytorna angivna värdena beräknades RMSE, relativ RMSE, BIAS och relativ BIAS (Funktion 5-8).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n} \quad (5)$$

$$rel. RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 / n}}{\sum_{i=1}^n (y_i) / n} * 100 \quad (6)$$

$$BIAS = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n \quad (7)$$

$$rel. BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i) / n}{\sum_{i=1}^n (y_i) / n} * 100 \quad (8)$$

Resultat

Utvärdering modeller

I detta arbete ligger tre datakällor till grund för de modeller varifrån de skattade skogliga parametrarna har beräknats. Den första är laserskanningen utförd år 2010, den andra är laserskanningen utförd år 2014 och den tredje är radarbilden tagen 2011-06-04. Från dessa datakällor och 10 meters provytorna inventerade år 2010 har modeller för beräkning av skogens HGV och volym skapats, varav den för skattning av HGV från radarbilder är skapad med Random Forest. Modellernas förmåga att skatta det sanna tillståndet utvärderades mot 10 metersytorna inventerade år 2010 och år 2014 (Tabell 8 och 9). Vid utvärderingen tillämpades Leave-one-out korsvalidering (Bro 2008).

Tabell 8. Tabellen redovisar den erhållna skattningskvaliteten då modellerna utvärderades mot 10 meters ytorna inventerade år 2010 och år 2014. Tabellen avser modell 1(laser) och modellen skapad med Random Forest (radar), för skattningar av HGV

Table 8. The table shows the obtained estimation quality when the models are evaluated against the 10 meter plots inventoried in 2010 and 2014. The table refers to function 1(laser) and the model created by Random Forest (radar). The table intends evaluation of Lorey's mean height

	1 ₁₀	1 ₁₄	Random Forest
RMSE (m)	2,2	1,4	2,3
Relativ RMSE	12,1	7,8	12,7
Bias (m)	0	0	0
Relativ Bias	0	0	0
R ² _{Adj}	0,83	0,92	-

Tabell 9. Tabellen redovisar den erhållna skattningskvaliteten då modellerna utvärderades mot 10 meters ytorna inventerade år 2010 och år 2014. Tabellen avser modell 2 (laser) och 3 (radar), för skattningar av volym

Table 9. The table shows the obtained estimation quality when the models are evaluated against the 10 meter plots inventoried in 2010 and 2014. The table refers to function 2(laser) and 3(radar). The table intends evaluation of volume

	2 ₁₀	2 ₁₄	3
RMSE (m)	58,9	57,1	79,2
Relativ RMSE	25,9	24,0	36,5
Bias (m)	0	-0,1	0
Relativ Bias	0	0	0
R ² _{Adj}	0,81	0,85	-

Enskilda datakällors skattningskvalitet

Av tabell 10 framgår vilken skattningskvalitet man erhåller om man använder endast den sista radarbilden (2014-08-02) som underlag för skattningen av grundytbevåg höjd (HGV). Tabellen redovisar också med vilken noggrannhet höjden skattas utifrån en laserskanning utförd vid tidpunkten i fråga. Som referensvärde har höjden år 2014 skattats med en laserskanning utförd år 2010. Den skattade höjden år 2010 ställdes i detta fall mot den inventerade höjden år 2014. Dessa värden kan ses som ett referensvärde för skattningarnas kvalitet om ingen framskrivning görs. Som valideringsdata har provytor från år 2014 använts. Utvärderingen skedde både på ytor med en radie av 10 och 40 meter. Av tabellen framgår att noggrannheten i skattningarna försämrades, då laserskanningen utförd 2010 användes för att skatta HGV år 2014, till skillnad från om laserskanningen 2014 nyttjades. Höjden skattas utifrån den sista radarbilden med en noggrannhet av 13 % för 10 metersytorna och 10,8 % för 40 metersytorna.

Tabell 10. Tabellen redovisar den skattningskvalitet som erhöles för skattningar av HGV år 2014, med given datakälla. Laserskanningen 2010 redovisas som en referens för vilken kvalitet som uppnås då ingen framskrivning skett

Table 10. The table shows the estimation quality obtained for estimates of Lorey's mean height in 2014, with a given data source. Laser Scanning from 2010 is presented as a reference for the quality achieved when no forecasting is performed

	RMSE (m)		Relativ RMSE (%)		Bias (m)		Relativ Bias (%)	
	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m
Laserskanning 2010	2,11	2,50	11,4	10,7	0	-2,17	0	-9,3
Laserskanning 2014	1,44	1,41	7,8	6,0	0	-0,81	0	-3,5
Radarbild 2014	2,46	2,05	13,0	9,0	0	-1,85	0	-8,1

I tabell 11 redovisas den skattningskvalitet som uppnåddes vid skattning av volymen. För utvärderingen användes samma uppsättning fjärranalysdata och valideringsbestånd, som för skattningen av höjd, beskrivet i ovanstående stycke. Referensvärdet erhållet från 2010 års laserskanning, uppvisar en försämrad noggrannhet av cirka 7,2 procentenheter för ytorna med 10 meters radie och 2,6 procentenheter för skattning av ytorna med 40 meters radie.

Tabell 11. Tabellen redovisar den skattningskvalitet som erhöles för skattningar av volym år 2014, med given datakälla. Laserskanningen 2010 redovisas som en referens för vilken kvalitet som uppnås då ingen framskrivning skett

Table 11. The table shows the estimation quality obtained for estimates of volume in 2014, with a given data source. Laser Scanning from 2010 is presented as a reference for the quality achieved when no forecasting is performed

	RMSE (m ³ sk/ha)		Relativ RMSE (%)		Bias (m ³ sk/ha)		Relativ Bias (%)	
	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m
Laserskanning 2010	87,14	71,09	37,5	21,1	-0,08	-25,75	0	-7,6
Laserskanning 2014	57,12	48,33	24,0	14,9	-0,07	26,55	0	8,2
Radarbild 2014	80,23	69,73	37,7	22,5	0,01	-8,24	0	-2,7

Framskrivning med olika lång tidserie radarbilder

I tabell 12 redovisas skattningskvaliteten för skattningar av HGV, som uppnått när uppdateringsmodellen tillämpas med olika lång tidserie radarbilder. Tabellen redovisar även den skattningskvalitet man erhåller om uppdateringen utförs endast med stöd av radarbilderna (Trend 1). I detta fall utförs ingen korrigering av sambandets intercept, med det från lasern beräknade initiala tillståndet år 2010. Av tabellen framgår att skattningskvaliteten missgynnas av en kortare observationstid för beräkningen baserad på Trend 2. För beräkningen baserat på endast radarbilder (Trend 1) är effekten mer otydlig. I tabell 12 framgår att den framskrivna höjden för 40 metersytorna uppvisar motsvarande kvalitet som skattningarna från laserskattningen utförd år 2014 (Tabell 10), då radarbilder från år 2011 till 2014 används.

Tabell 12. Tabellen redovisar den skattningskvalitet som uppnåddes då provytans HGV beräknades med olika lång tidserie radarbilder. Kvaliteten redovisas både för uppdateringen med (Trend 2) och utan stöd av det initiala tillståndet skattat från 2010 års laserskanning (Trend 1)

Table 12. The table shows the estimation quality obtained when Lorey's mean height is estimated for the sample plot, given different lengths of the radar image time series. The quality is presented both for the estimation based on Trend 1 and Trend 2

	År	RMSE (m)		Relativ RMSE (%)		Bias (m)		Relativ Bias (%)	
		10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m
Trend 2	11-14	2,62	1,39	14,2	5,9	0	0,19	0	0,8
	12-14	3,09	2,21	16,7	9,4	0	1,49	0	6,4
	13-14	4,81	3,73	26,0	15,9	0,01	2,79	0	11,9
Trend 1	11-14	2,52	2,41	13,6	10,3	0	-2,01	0	-8,6
	12-14	2,60	2,18	14,1	9,4	0	-1,78	0	-7,6
	13-14	2,75	2,27	14,9	9,7	0	-1,86	0	-8,0

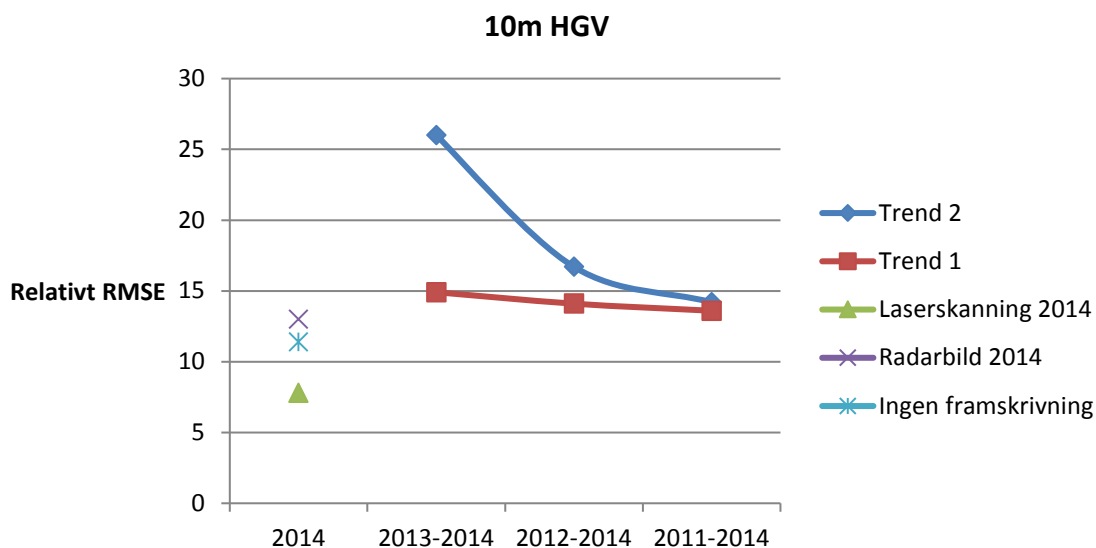
Tabell 13 redovisar den erhållna skattningskvaliteten för skattningar av volym, då olika lång tidserie av radarbilder används. Även i detta fall har beräkningen utförts både med Trend 1 och Trend 2. I tabellen framgår att skattningskvaliteten missgynnas av den kortare observationstiden för beräkningen baserad på Trend 2. För beräkningen baserat på endast radarbilder (Trend 1) är effekten mer otydlig.

Tabell 13. Tabellen redovisar den skattningskvalitet som uppnåddes då provytans volym beräknades med olika lång tidserie av radarbilder. Kvaliteten redovisas både för Trend 1 och Trend 2

Table 13. The table shows the estimation quality obtained when the volume is estimated for the sample plot, given different lengths of the radar image time series. The quality is presented both for the estimation based on Trend 1 and Trend 2

	År	RMSE		Relativ RMSE		Bias		Relativ Bias	
		(m ³ sk/ha)		(%)		(m ³ sk/ha)		(%)	
		10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m	10 m	40 m
Trend 2	11-14	84,89	63,50	36,8	18,2	-0,12	4,01	0,1	1,1
	12-14	98,95	83,21	42,6	24,7	-0,06	34,30	0	10,2
	13-14	116,44	118,53	50,2	35,1	0,09	-1,31	0	-0,4
Trend 1	11-14	91,04	84,08	39,4	24,3	-0,19	-37,71	0,1	-10,9
	12-14	97,11	81,49	41,8	24,8	-0,11	-19,97	0	-6,1
	13-14	98,87	85,25	42,6	26,0	-0,07	-28,20	0	-8,6

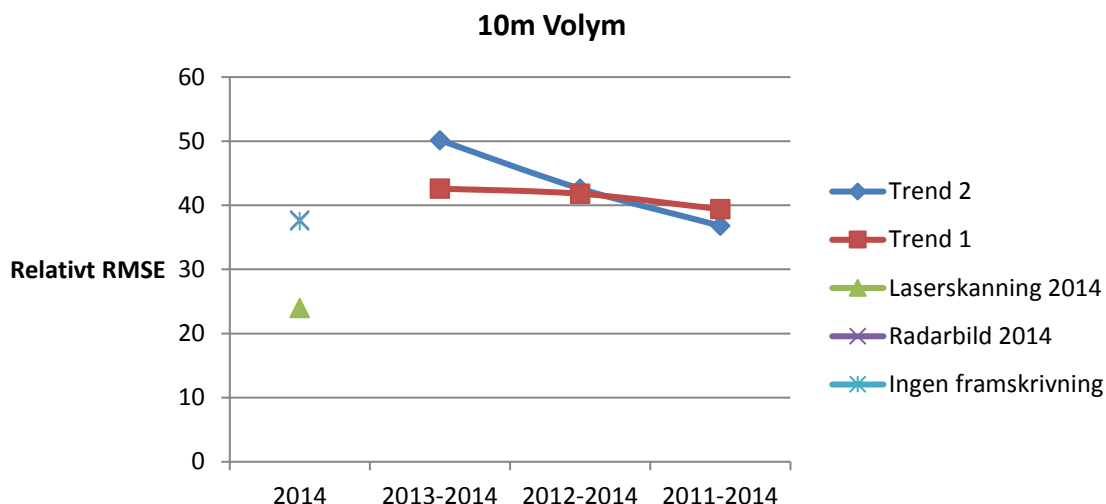
I figur 3 visas hur relativa RMSE utvecklas för skattning av HGV på 10 meters ytorna, när radarbilder från olika långa tidserier används. I figuren redovisas resultatet från beräkning med Trend 1, samt för beräkningen med Trend 2. Man kan också utläsa vilken skattningskvalitet som uppnås om man skattar 2014 års skogliga tillstånd med radarbilden tagen 2014-08-02, samt vilken kvalitet som uppnås med en laserskanning utförd år 2014. Som referens redovisas den skattningskvalitet som erhålls om ingen framskrivning sker. Detta referensvärde utgörs av en skattning av HGV år 2014 med laserskanningen utförd år 2010. Från diagrammet framgår att framskrivningen, där radar och laser kombineras, gynnas av en längre tidsserie, till skillnad från framskrivningen baserad på endast radarbilder, som inte tycks påverkas nämnvärt av seriens längd.



Figur 3. Figuren visar vilket relativt RMSE som erhålls vid olika lång tidserie av radarbilder. Figuren avser skattningar av HGV för 10 meters ytorna.

Figure 3. The figure shows the relative RMSE obtained when different length of the radar image time series is used. The figure shows the estimation quality of Lorey's mean height for the 10 meter sample plots.

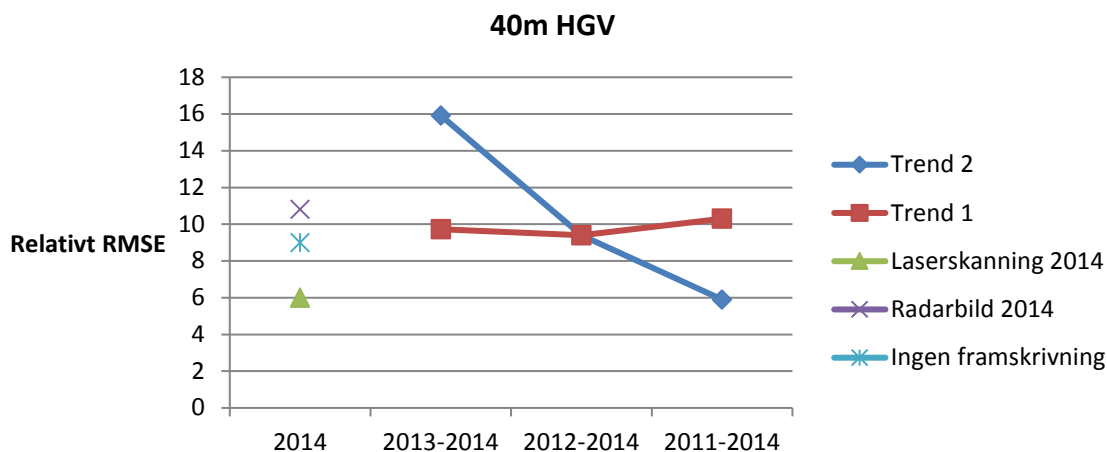
Figur 4 visar med vilket relativt RMSE volymen skattas för 10 meters ytorna, vid olika lång tidserie av radarbilder. Likt figuren ovan redovisas resultatet för framskrivningen med och utan laserdata från 2010, samt för radarbilden tagen 2014-08-02, laserskanningen utförd 2014 och ett referensvärde från 2010 års laserskanning. I figuren kan man utläsa att framskrivningen som tar stöd av laserdatat (Trend 2) gynnas av en längre tidserie.



Figur 4. Figuren visar vilket relativt RMSE som erhålls vid olika lång tidserie av radarbilder. Figuren avser skattningar av volym för 10 meters ytorna.

Figure 4. The figure shows the relative RMSE obtained when different length of the radar image time series is used. The figure shows the estimation quality of volume for the 10 meter sample plots.

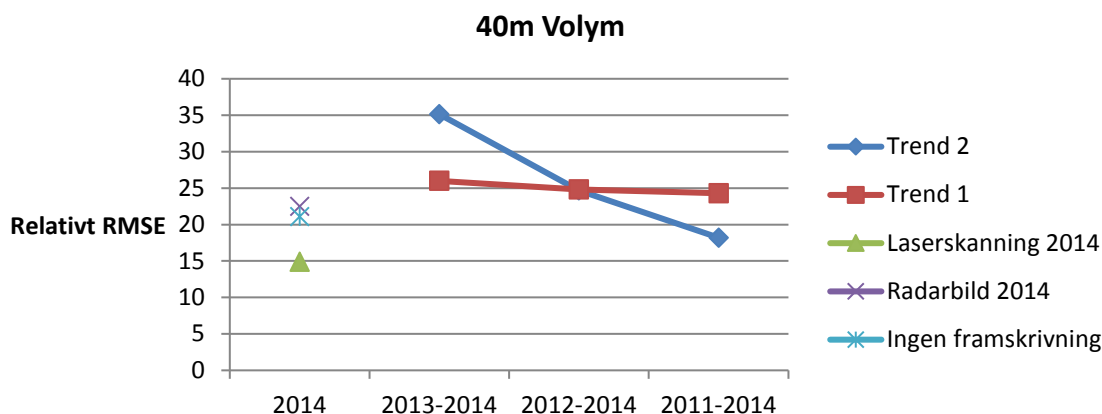
I figur 5 kan man utläsa vilket relativt RMSE som uppnåddes för HGV skattningar på 40 meters ytorna, med varierande längd på serien av radarbilder. Anmärkningsvärt i detta diagram är att framskrivningen baserad på endast radarbilder tenderar att blir sämre med längre serie av radardata. Man kan också notera att framskrivningen som tar stöd av laserskattningen år 2010 (Trend 2), kraftigt gynnas av en längre tidserie. Denna framskrivning uppvisar vid den längsta observationsperioden ett relativt RMSE motsvarande en ny laserskanning.



Figur 5. Figuren visar vilket relativt RMSE som erhålls vid olika lång tidserie av radarbilder. Figuren avser skattningar av HGV för 40 meters ytorna.

Figure 5. The figure shows the relative RMSE obtained when different length of the radar image time series is used. The figure shows the estimation quality of Lorey's mean height for the 40 meter sample plots.

Figur 6 visar samma information som i diagrammen ovan, men i detta fall för skattning av volym på 40 metersytorna. Likt ovanstående diagram påvisar framskrivningen understödd av 2010 års laserskanning (Trend 2), en förbättrad skattningskvalitet med längre observationsperiod. Trenden tycks ihållande utan större tecken på avmattning.



Figur 6. Figuren visar vilket relativt RMSE som erhålls vid olika lång tidserie av radarbilder. Figuren avser skattningar av volym för 40 meters ytorna.

Figure 6. The figure shows the relative RMSE obtained when different length of the radar image time series is used. The figure shows the estimation quality of volume for the 40 meter sample plots.

Diskussion

I en studie likt denna, kan metoden testas under kontrollerade former. Men vid en verklig tillämpning är fallet ett annat. Förändringar av skogstillståndet sker till följd av såväl skogsbruk som stormar och metoden behöver således ha kapacitet att hantera dessa förändringar. En svårighet med den beskrivna framskrivningsmetodiken är att avgöra när en avvikelse inte kan anses som en osäkerhet i skattningen, utan bör betraktas som en förändring i det verkliga tillståndet. Ett sätt att avgöra detta skulle kunna vara att bestämma en brytpunkt för hur mycket avvikelsen får skilja sig från det beräknade sambandets standardavvikelse. Under arbetets gång har jag studerat R^2_{Adj} värdet för sambandet som beskriver skogens höjd och volymutveckling över tid för varje pixel. Jag har i dessa observationer noterat att R^2_{Adj} värdet har god potential att signalera om en förändring har skett. Om en förändring har skett bör tidigare skattningar inte längre tas i beaktande och ett nytt samband bör sökas. Det går heller inte att bortse från att vi rimligen borde ha nytta av att se pixlarna som en del av ett större spatialt sammanhang. Om flera intilliggande pixlar uppvisar en liknande trend ökar sannolikheten för att en förändring har skett. Man behöver heller inte vara lika kräsen när det gäller bevisbördan på pixelnivå, när man söker efter förändringar, om man kan ta stöd av omkringliggande pixlar.

För att undvika extrema värden för enskilda pixlar och för att erhålla stabilare värden över tid, medianfilterades rastren. En metod som visade sig vara positivt för skattningskvaliteten vid framskrivningen. Nackdelen med att använda medianvärdet av omkringliggande pixlar är att variationen mellan pixlarna minskar. I de fall där variationen beror på osäkerhet i skattningen är detta ett mindre problem, men när det beror på skogens variation eller karaktär innebär det en försämring av datats upplösning.

I denna studie har höjd och volymskattningen från 2010 års laserskanning antagits vara det sanna värdet för skogens initiala tillstånd, i fallet med Trend 2. Skattningen från radarbilderna har i detta fall i själva verket endast använts för att kvantifiera utvecklingen av skogstillståndet över tid, det som i metoden omnämns som modellens lutningskoefficient. Givetvis bär radarn också på information om variablernas storhet. På denna punkt finns utvecklingspotential. Laservärdet för det initiala tillståndet bör inte enhälligt styra framskrivningsmodellens intercept, utan radarbildernas information om höjden bör också vägas in. Ett förslag på en sådan utveckling skulle kunna baseras på en metod som beaktar ett regionalt förhållande. Låt mig utveckla. I metoden beskriven i detta arbete korrigeras interceptet med biasen mellan laserskattningen och sambandet beräknat från radarbilderna. Om ett regionalt medelvärde för denna bias beräknades, skulle biasen för den aktuella pixeln kunna korrigeras med detta medelvärde. Tanken är att medelvärdet ska vara mer representativt för biasen i den aktuella skogstypen. Teorin skulle behöva undersökas i framtida studier.

I en framtida tillämpning bör en mer gedigen undersökning av modellen för skattning av de skogliga variablerna från radarbilderna genomföras. I denna studie har endast den första radarbilden legat till grund för de samband som använts för beräkning av höjden och volymen. Man bör dock vara medveten om att denna bild kanske inte är representativ och att man skulle erhålla bättre skattningskvalitet för de framskrivna värdena, om man beaktar flera bilder. En bidragande orsak till detta antagande, grundar sig dels i mina egna observationer av variationen mellan bilderna, men även tidigare studiers misstankar om att yttre faktorer kan påverka egenskaperna hos bilderna. På denna punkt har metoden

beskriven i detta arbete förbättringspotential. Under arbetets gång har det konstaterats att bilderna inte följer samma samband, men på grund av att provytedata endast har funnits tillgängligt i försöksperiodens början och slut, tillämpades ovan beskriven metodik.

En svårighet i studien har varit att hantera provytedatat. Skogstillståndet påverkas av skogsbruksåtgärder, vilket innebär att utvecklingen av skogen inte följer modellerbara mönster. Förändringarna har betydelse för skattningskvaliteten om de inträffar mellan insamlingen av referensdata och tidpunkten för insamlingen av fjärranalysdata, eller mellan insamlingen av fjärranalysdata och insamlingen av valideringsdata. I studien förekommer 9 sådana tidsintervall. Åtgärderna behöver därför knytas till en tidpunkt och till berörda provytor. Detta arbete har varit behäftat med svårigheter, eftersom oklarheter i tidpunkten för åtgärderna förekommit. Det förekommer även oklarheter beträffande tidpunkten för inventeringarna. I studien jämförs de framskrivna värdena med andra datakällor, vars skattningskvalitet påverkas av skogsvårdsåtgärder utförda under ett annat tidsintervall. Risker finns att någon av datakällorna då gynnas av en omotiverat fördelaktig uteliggarrensning. Problematiken har hanterats genom att restriktiva exkluderingsvillkor legat till grund för rensningen.

En intressant företeelse i resultatet är att endast en liten eller ingen förbättring uppnåddes med en längre observationstid för framskrivningen baserad på endast radarbilder och en tydlig förbättring med en längre observationsperiod för framskrivningen som tar stöd av det initiala tillståndet skattat från 2010 års laserskanning. Denna företeelse var oväntad eftersom skillnaden mellan metoderna endast är en kalibrering av en förväntat lägre precision i skattningarna från radarbilderna. En förklaring av fenomenet ges inte i denna studie, utan frågan hålls öppen för fortsatt forskning. Den positiva trenden för skattningskvaliteten, hos framskrivningen som tar stöd av laserdata, tycks inte avmattas nämnvärt då alla tillgängliga observationer användes. Metoden skulle behöva utvärderas med en längre tidsserie av radarbilder för att en slutsats om dess potential ska vara möjlig att fastställa.

Slutsatser

Tillvägagångssättet beskrivet i denna rapport uppvisar potential för framskrivning av det skogliga tillståndet. Framskrivningen gynnas av informationen erhållen från laserskanningen år 2010 och med en längre tidsserie av radarbilder. Metoden behöver utvecklas vidare för att vara adaptiv för praktisk tillämpning.

Tillkännagivanden

Jag skulle vilja tacka Henrik Persson för handledningen genom detta examensarbete! Jag vill också tacka Nils Lindgren för hans roll som biträdande handledare, samt Mattias Nyström för teknisk vägledning! Jag vill också passa på att rikta ett tack till Ljungbergsfonden för finansiering av Ljungbergslaboratoriet och German Aerospace Center (DLR) för tillhandahållandet av TanDEM-X data.

Litteraturförteckning

- Ahlberg, O., Kardell, L. (1997). Från herresäte till skogslaboratorium, Skara, Sweden, Västergötlands Tryckeri AB.
- Askne, J., Fransson, J., Santoro, M., Soja, M., Ulander, L. (2013). Model-based biomass estimation of a hemi-boreal forest from multitemporal TanDEM-X acquisition. *Remote Sensing*, 5(11), 5574-5597.
- Askne, J. et al., (1995). Retrieval of forest parameters using intensity and repeat-pass interferometric SAR information. In *Proceedings of Retrieval of Bio- and Geophysical Parameters from SAR Data for Land Applications*. 10-13 October, 1995, Toulouse, 119–129.
- Attema, E.P. Ulaby, F.T. (1978). Vegetation modeled as a water cloud. *Radio Science*, 13(2), 357-354.
- Bro, R. (2008). Cross-validation of component models: A critical look at current methods. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 390, 1241-1251.
- Hagberg, J. O., Ulander, L. M. H., & Askne, J. (1995). Repeat-Pass SAR Interferometry Over Forested Terrain. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 33, 331–340.
- Kangas, A.S. (2010). Value of forest information. *European Journal of Forest Research*. 129, 863-874.
- Karjalainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Hyypä, J. (2012). Prediction of plot-level forest variables using TerraSAR-X stereo SAR data. *Remote Sens. Environ.* 117, 338–347.
- Koch, B. (2010). Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65, 581–590.
- Krieger, G., Moreira, A., Fiedler, H., Hajnsek, I., Werner, M., Younis, M., Zink, M. (2007). TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45, 3317-3341.
- La Prade, G. (1963). An analytical and experimental study of stereo for radar. *Photogrammetric Engineering*, 29, 294–300.
- Leo Breiman. (2001). Random Forest. *Machine Learning*, 45, 5-32.
- Perko, R.; Raggam, H.; Gutjahr, K.; Schardt, M. (2010). The Capabilities of TerraSAR-X Imagery for Retrieval of Forest Parameters. In *Proceedings of the ISPRC TC VII Symposium, Vienna, Austria, 5–7 July 2010*, 452–456.
- Perko, R.; Raggam, H.; Gutjahr, K.; Schardt, M. (2010) Deriving Forest Canopy Height Models Using Multi-Beam TerraSAR-X Imagery. In *Proceedings of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR), Aachen, Germany, 7–10 June 2010*, 568–571.
- Perko, R.; Raggam, H.; Gutjahr, K.; Schardt, M. (2010) Analysis of 3D Forest Canopy Height Models Resulting from Stereo-Radargrammetric Processing of TerraSAR-X Images. In *Proceedings of the 30th EARSeL Symposium, Remote Sensing for Science, Education, and Natural and Cultural Heritage, Paris, France, 31 May–3 June 2010*, 8.
- Perko, R.; Raggam, H.; Deutscher, J.; Gutjahr, K.; Schardt, M. (2011) Forest assessment using high resolution SAR data in X-band. *Remote Sens.* 2011, 3, 792–815.

- Persson, H., Wallerman, J., Olsson H., Fransson, J. (2013) Estimating forest biomass and height using optical stereo satellite data and a DTM from laser scanning data, *Canadian Journal of Remote Sensing* 39:3, 251-262.
- Persson H, Fransson J. (2014). Forest Variable Estimation Using Radargrammetric Processing of TerraSAR-X Images in Boreal Forests. *Remote sens.* 6, 2084-2107.
- Persson H, Fransson J. (2014). Comparison between TanDEM-X and ALS based estimation of biomass and tree height in boreal forests. 2014:84, Faculty of Forest Sciences, Department of Forest Resource Management, Swedish University of Agricultural Sciences, Umeå, Sweden.
- Soja, M., Persson, H., Ulander, L. (2014) Estimation of Boreal Forest Biomass from Two Level Model Inversion of Interferometric TanDEM-X Data. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 3398-3401.
- Soja, M., Persson, H., Ulander, L. (2015) Estimation of Forest Height and Canopy Density From a Single InSAR Correlation Coefficient. *Ieee Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 12(3), 646-650.
- Toutin, T och Amaral, S., (2000). Stereo RADARSAT data for canopy height in Brazilian forest. *Canadian journal of Photogrammetry and Remote sensing*, 55, 13-33
- Treuhaft, R.N., Madsen, S.N, Moghaddam, M., Van Zyl, J. (1996). Vegetation characteristicss and underlying topography from interferometric radar. *Radio Science*, 31(6), 1449-1485.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M. (2014) TerraSAR-X stereo radargrammetry and airborne scanning LiDAR height metrics in imputation of forest aboveground biomass and stem volume. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 52, 1197–1204.
- Wallerman, J, Fransson, J.E.S., Bohlin, J., Reese, H., Olsson, H. (2010). Forest mapping using 3D data from SPOT-5 HRS and Z/I DMC. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. 25-30 July, 2010, Honolulu, HI, USA, 64–67.
- Zebker, H. A., & Villasenor, J. (1992). Decorrelation in Interferometric Radar Echoes. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30, 950–959.