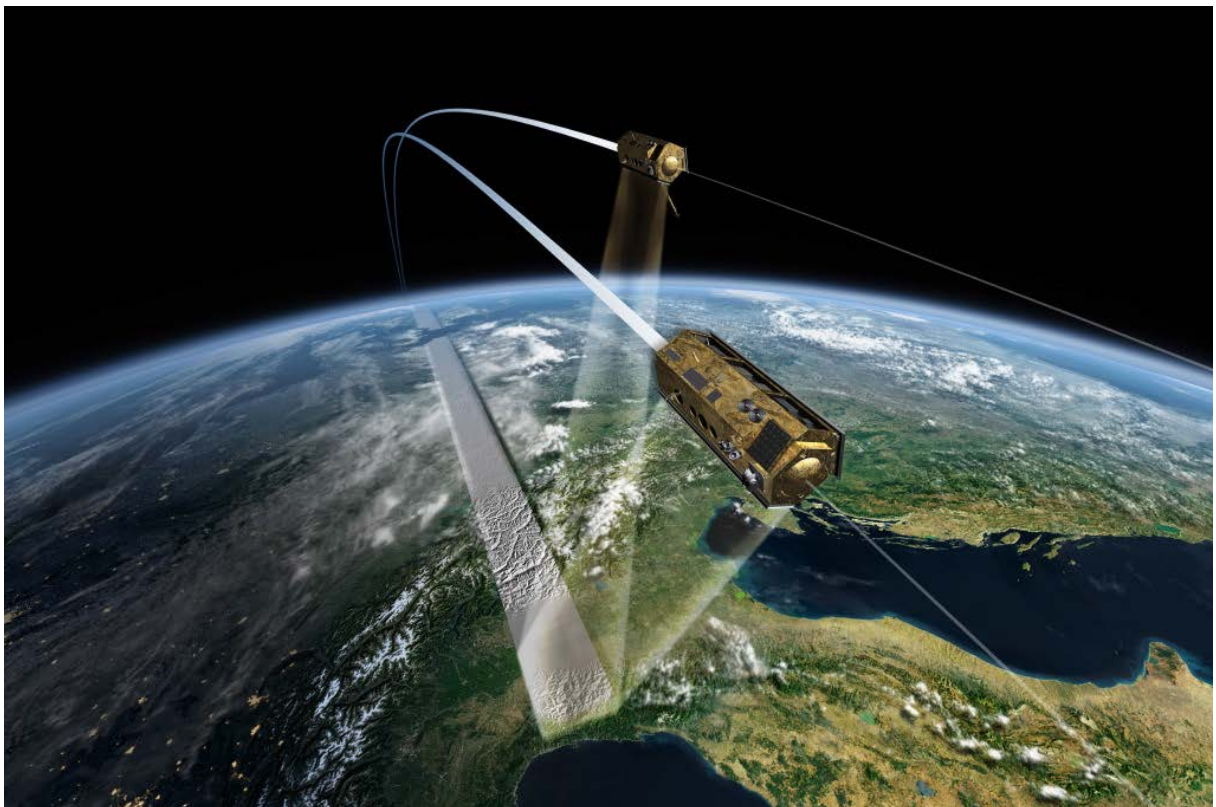




Analys av säsongsvariationer vid skattning av skogliga variabler med InSAR teknik

Analysis of seasonal variations for estimation of forest variables with InSAR technology



© DLR.

Edward Sjödin

**Arbetsrapport 458 2016
Examensarbete 30hp A2E
Jägmästarprogrammet**

**Handledare:
Henrik Persson**

Sveriges lantbruksuniversitet
Institutionen för skoglig resurshushållning
901 83 UMEÅ
www.slu.se/srh
Tfn: 090-786 81 00



ISSN 1401-1204
ISRN SLU-SRG-AR-458-SE

Analys av säsongsvariationer vid skattning av skogliga variabler med InSAR teknik

Analysis of seasonal variations for estimation of forest variables with InSAR technology

Edward Sjödin

Nyckelord: Skogsinventering, InSAR, TanDEM-X, TerraSAR-X, Radar

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

Förord

Jag vill framförallt tacka mina handledare, Henrik Persson, Mattias Nyström och Eva Lindberg för utomordentlig support. H. Persson för idé och huvudhandledning för detta examensarbete. Mattias Nyström för kontinuerlig teknisk support och stöd under hela studien. Eva Lindberg för statistik hjälp och rådgivning.

Tackar även Ljungbergsfonden för finansiellt stöd till Ljungbergslaboratoriet där studien har genomförts.

Ett tack går även till German Aerospace Center (DLR) för distribueringen av TanDEM-X data.

Sammanfattning

Skogen är viktig på många sätt, eftersom skog är en resurs både som råvara, energikälla och kolsänka. För kontroll av tillväxt, avgång och planering av skog och skogsskötsel har man historiskt genomfört inventering med manuella metoder genom fältpersonal, vilket både är kostsamt och endast ger en bedömning om skogens tillstånd just i de ögonblick skogen inventeras. De senaste tio åren har metoder baserade på fjärranalys implementerats på många sätt, för bättre och effektivare inventering. Skattningar av skogliga variabler med laserdata har uppvisat hög noggrannhet med god kvalitet, men det är ett dilemma att skanningen är kostsam och att utförd skanning snabbt blir oanvändbar när skogen förändras. Satellitburna sensorer som genererar tredimensionella data över skogen har potentialen att ge tillräckligt bra skattningskvalitet, inte minst för att skriva fram befintliga skattningarna, dessa data kan även kombineras med andra skattningstekniker och metoder. Fördelen med satellitburna sensorer är att de kontinuerligt återkommer över samma område på kort tid. I denna studie har data från satellitkonstellationen TanDEM-X använts. Interferometrisk Synthetic Aperture Radar (InSAR) är en radarteknik som satelliterna i TanDEM-X möjliggör. Studier som använt sig av InSAR teknik uppvisar mycket goda skattningsresultat för både höjd och biomassa (Persson & Fransson, 2014a). I flera tidigare studier diskuteras det om säsong- och vädervariationer eventuellt kan påverka kvalitén på InSAR data. Denna studies syfte har varit att analysera faktorer som kan tänkas påverka InSAR data för skogliga skattningar. Med belägg från andra studier (Solberg *m.fl.*, 2015) kan det i denna studie konstateras att temperatur påverkar skattningar av skogliga variabler med InSAR.

Nyckelord: Skogsinventering, InSAR, TanDEM-X, TerraSAR-X, Radar

Summary

The forest is important in many ways because it is a resource as raw material, energy and a carbon sink. For monitoring of growth, mortality and forest management activities, historically forest inventory has been done by field staff, which is costly and only provides an assessment of forest condition at the time of inventory. The last ten years, methods based on remote sensing have been implemented in many ways, for better and more efficient inventory. Estimates of forest variables with airborne laser scanning data have provided high accuracy with good quality, but it's a problem that scanning is costly and that the data quickly become useless when the forest is changing. Studies show that satellite-borne sensor techniques can provide good quality forest estimations, or can be combined with other estimation techniques and methods. The advantage of satellite-borne sensors is that they return to the same area over short time periods. In this study, data from the satellite constellation TanDEM-X is used. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) is a radar technique that is possible due to the configuration of the TanDEM-X satellites. Studies that use the InSAR technique exhibit very good estimation results of both height and biomass (Persson & Fransson, 2014a). In several previous studies it is discussed whether there are seasonal and weather variations that affect the quality of the InSAR data. The purpose of this study was to analyze the factors that may affect InSAR data for estimating forest variables. This study, together with evidence from previous studies (Solberg *m.fl.*, 2015) provides support for the conclusion that temperature affects the estimates of forest variables when using InSAR.

Keywords: Forest inventory, InSAR, TanDEM-X, TerraSAR-X, Radar

Innehållsförteckning

Förord	4
Sammanfattning.....	5
Summary.....	6
Inledning.....	8
Syfte.....	10
Material.....	11
Försöksområden	11
Genererade referensytor	11
Fältinventerade referensytor	13
Väderdata.....	14
Laserdata.....	14
InSAR registreringar	15
Bearbetning av radardata	16
Metod.....	18
Utförande av analys	18
Samband mellan skalfaktor i radarbilder och yttre faktorer	18
Olika trädslag, trädhöjd och yttre faktorer över tid	18
Modeller som inkluderar yttre faktorer	18
Utvärdering.....	19
Resultat	20
Samband mellan skalfaktor i radarbilder och yttre faktorer	20
Olika trädslag, trädhöjd och yttre faktorer över tid	21
Modeller som inkluderar yttre faktorer	26
Diskussion	30
Slutsatser.....	31
Litteraturförteckning.....	32
Appendix	34

Inledning

Global uppvärmning av jordens klimat är entydigt. Atmosfären, jordens yta och världens hav har blivit varmare. Mängden snö och is har minskat samtidigt som havsnivån och koncentrationen av växthusgaser har ökat. Många av de observerade förändringarna är utan tvekan förändringar som mänskligheten står för. En av växthusgaserna som har stor bevisad påverkan är koldioxid. Med bättre förståelse för kolcykeln kan mänskligheten anpassa sig för att begränsa utsläppen. Bättre förståelse kan i förlängningen bidra till ett mer hållbart utnyttjande av jordens naturresurser (Stocker *m.fl.*, 2013). Koldioxid påverkar den globala uppvärmningen negativt i form av ökad växthuseffekt. Det gör skogen ännu viktigare, eftersom uppbyggnaden av biomassa binder kol kan skogen betraktas som en kolsänka, vilket är positivt. I boreal skog är upp till 80% av det totala kollagret dött organiskt material i marken. Samtidigt som skogen binder kol är den också en kolkälla som ständigt frigör kol när skogen konsumeras (Gibbard *m.fl.*, 2005; Malhi *m.fl.*, 2002). Globalt minskade skogsarealen med 3% mellan 1990 till 2007, vilket indikerar en negativ utveckling av skogen som växande kolsänka (Pan *m.fl.*, 2011).

För att motverka den globala uppvärmningen krävs det att jordens naturresurser används på ett hållbart sätt. Ett hållbart skogsbruk bygger på kunskap om skogen, vilket innefattar både skogens aktuella tillstånd och hur skogen förväntas utvecklas. Idag används manuella metoder vid insamling av data om skogen, vilket huvudsakligen sker med objektiv och subjektiv inventering i fält. Dessa metoder är inte rationella eftersom de är väldigt tidskrävande och därmed också kostsamma.

Under de senaste åren har skogsbruket tagit stora steg in i den nya teknik som finns. Ett av de stora stegen beror på att Lantmäteriet i Sverige har låtit laserskanna hela Sveriges landareal med luftburen laserskanning (Airborne laserscanning, ALS) för att skapa en ny höjdmodell. Data från laserskanningen har även gett förutsättningar att kunna skatta olika skogliga variabler, såsom höjd, biomassa, diameter, grundyta och volym (Hyypä *m.fl.*, 2008; Reutebuch *m.fl.*, 2003; Nilsson, 1996). Laserdata har därmed potential att till och med användas vid den nationella taxeringen som Riksskogstaxeringen gör varje år (Bergström, 2009). Likt fältinventeringens återbesök måste även den nya tekniken kunna göra återkommande datainsamlingar, då är den luftburna laserskanningen väldigt kostsam. Laserdata erbjuder hög noggrannhet, men är kostsamt och det finns idag inga planer på att genomföra ytterligare skanningar trots att informationen snabbt blir gammal när skogen förändras med tillväxt, skogsskötselåtgärder eller stormskador. Därför är det önskvärt att man kan utnyttja laserdata i kombination med andra tekniker (Suárez *m.fl.*, 2005). Idag kan man till viss del skriva fram det skattade materialet med hjälp av tillväxtfunktioner, men ju längre tid som går desto osäkrare blir skattningarna. Laserskanning med flygplan är tidskrävande i jämförelse med satellitburna sensorer (Persson & Fransson, 2014b).

Satellitburna sensorer kan täcka väldigt stora områden samtidigt som de kan återkomma och inhämta ny data med väldigt korta intervall. Satelliten TerraSAR-X kan återkomma med 11 dagars mellanrum (Werninghaus, 2004). Satellitburna radarsystem bygger oftast på principen Synthetic Aperture Radar (SAR), som gör att bildernas upplösning kan förbättras genom att beräkningar av radarsvaret längs banspåret ersätter den mycket stora antenn som annars skulle behövas för att få samma upplösning (Vastaranta *m.fl.*, 2014). I dagsläget finns inga satelliter som kan laserskanna jordens yta med liknande precision som ALS, men det finns potential med andra metoder. Man kan med satellitdata skapa 3D data med

stereogrammetri, radargrammetri eller interferometri. Data från satelliter har under många år använts inom skogsbruket, främst optiska bilder. Med två eller flera högupplösta optiska bilder på samma objekt kan man skapa punktmoln med stereogrammetri (Persson *m.fl.*, 2013). Radargrammetri är en teknik som har potential att kunna skatta stora arealer med hög kvalitet. Från radardata kan man skapa modeller av ytan (Digital Surface Model, DSM) och i kombination med en befintlig digital terrängmodell (Digital Terrain Model, DTM) från ALS-data kan en kronhöjdsmodell (Canopy Height Model, CHM) skapas genom att man räknar bort terrängen. Informationen från CHM ger en relativ trädhöjd som kan användas för skattning av skogliga variabler såsom biomassa och höjd (Perko *m.fl.*, 2011). Radargrammetri är en teknik som har likheter med stereogrammetri, skillnaden är att man istället för våglängder i det synliga fältet har mikrovåglängder. Interferometrisk SAR (InSAR) bygger på fasskillnad mellan två SAR bilder tagna från två olika positioner. SAR och InSAR är bra metoder för att erhålla hög precision på data från radar (Ager & Bresnahan, 2009; Schubert *m.fl.*, 2008). Avståndet mellan de två positionerna när bilderna är tagna påverkar stereobilden. För att erhålla två bilder från samma satellit, måste satelliten passera två gånger, detta kallas multi-pass eller repeat-pass (Homer *m.fl.*, 2002). År 2007 skickade Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) upp den första av två satelliter, TerraSAR-X som ingår i TanDEM-X uppdraget från och med 2010. TanDEM-X uppdraget är en konstellation av två satelliter. Avståndet mellan de två satelliterna varierar och kallas för "baseline". I och med att de förflyttar sig tillsammans ger satelliterna möjlighet att erhålla mer högupplöst data när de kan ta emot signaler som är skickade av den andra vid endast en passering, single-pass (Krieger *m.fl.*, 2007; Moreira *m.fl.*, 2004).

I tidigare studier visar (Persson & Fransson, 2014a) att InSAR ger relativt bra skattningar i jämförelse med ALS. Biomassa skattades med 17,2% relativt Root Mean Square Error (RMSE) med InSAR och 14,6% med ALS. Höjdsfattningar med InSAR skattades med 7,6% relativt RMSE respektive 4,1%. I den ovan nämnda studien visade sig till och med höjd skattades bättre med InSAR, med ett relativt RMSE på 4,1% för InSAR och 4,4% för ALS. I studien användes data från juni månad under torra förhållanden utan nederbörd de 24 timmarna innan bilderna togs. Det har i den ovannämnda studien visat sig att CHM och koherens från radar har bra korrelation med sann höjd och biomassa.

För att erhålla hög kvalitet på skogliga skattningar med radar finns det studier som visar att väderförhållandena påverkar skattningarna. Enligt Santoro *m.fl.*, (1996) återges bästa skattningen av skog när marken är täckt av snö och därmed är i ett stabilt tillstånd. Regn och snösmältning tros också ha påverkan på skattningar. I en studie som Ulander & Askne (1995) gjort visar de att variabeln koherens är känslig för temperaturförändringar kring noll grader Celsius (°C) och mindre känslig för vindhastighet. Det skall klargöras att de omnämnda studierna använt sig av en repeat-pass satellit och där skattningarna gjorts i C-bandet (4-8GHz, 3,75-7,5 cm radiovåglängd). Trots olikheter med TanDEM-X satelliterna som använder sig av X-bandet (8-12 GHz, 2,4-3,75 cm radiovåglängd), bör det finnas likheter när det gäller yttre påverkande faktorer på de skogliga skattningarna.

Andra studier såsom (Le Toan *m.fl.*, 2011) styrker också att väderförhållandet påverkar skattningskvaliteten av skogliga variabler. Det stöds också med en studie (Solberg *m.fl.*, 2015) där det konstateras att observationer för skoglig höjd utifrån InSAR processade radarbilder blir lägre när temperaturen är under noll grader Celsius (°C).

Syfte

Syftet med studien är att undersöka vilka särskilda väderförhållanden som påverkar skattningskvalitén av skogliga variabler med satellitburen InSAR och dess omfattning. Studien ska ge kunskap om vilken tidpunkt och under vilka förutsättningar InSAR data är lämpliga att använda för att uppnå hög kvalitet på skattningar av skogliga variabler i olika åldersklasser.

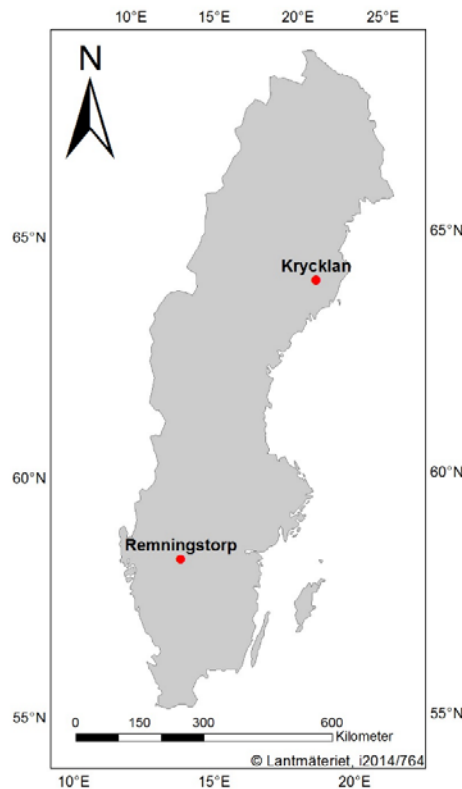
Material

Försöksområden

Två försöksområden har använts vid studien (Fig. 1), de är lokaliserade i Krycklan i norra Sverige (Lat. 64°16'N, Long. 19°46'E) och i Remningstorp i södra Sverige (Lat. 58°30'N, Long. 13°40'E).

Krycklans totala areal är 7800 hektar varav 6780 hektar består av produktiv boreal skogsmark. Skogen domineras av gran och tall. Krycklan har kuperad terräng med en topografi mellan 125 och 350 m.ö.h. Årsmedelnederbörd för 2011-2014 är 678mm (SMHI, 2016).

Remningstorps totala areal är 1520 ha varav 1229 ha är produktiv hemi-boreal skogsmark. Skogen domineras av gran, tall och björk. Remningstorp är generellt platt med en topografi mellan 125 och 145 m.ö.h (Ahlberg & Kardell, 1997). Årsmedelnederbörden för 2011-2014 är 776mm (SMHI, 2016).



Figur 1. Karta var försöksområdena är lokaliserade, Krycklan i norra Sverige (64°16'N) och Remningstorp i södra Sverige (58°30'N).

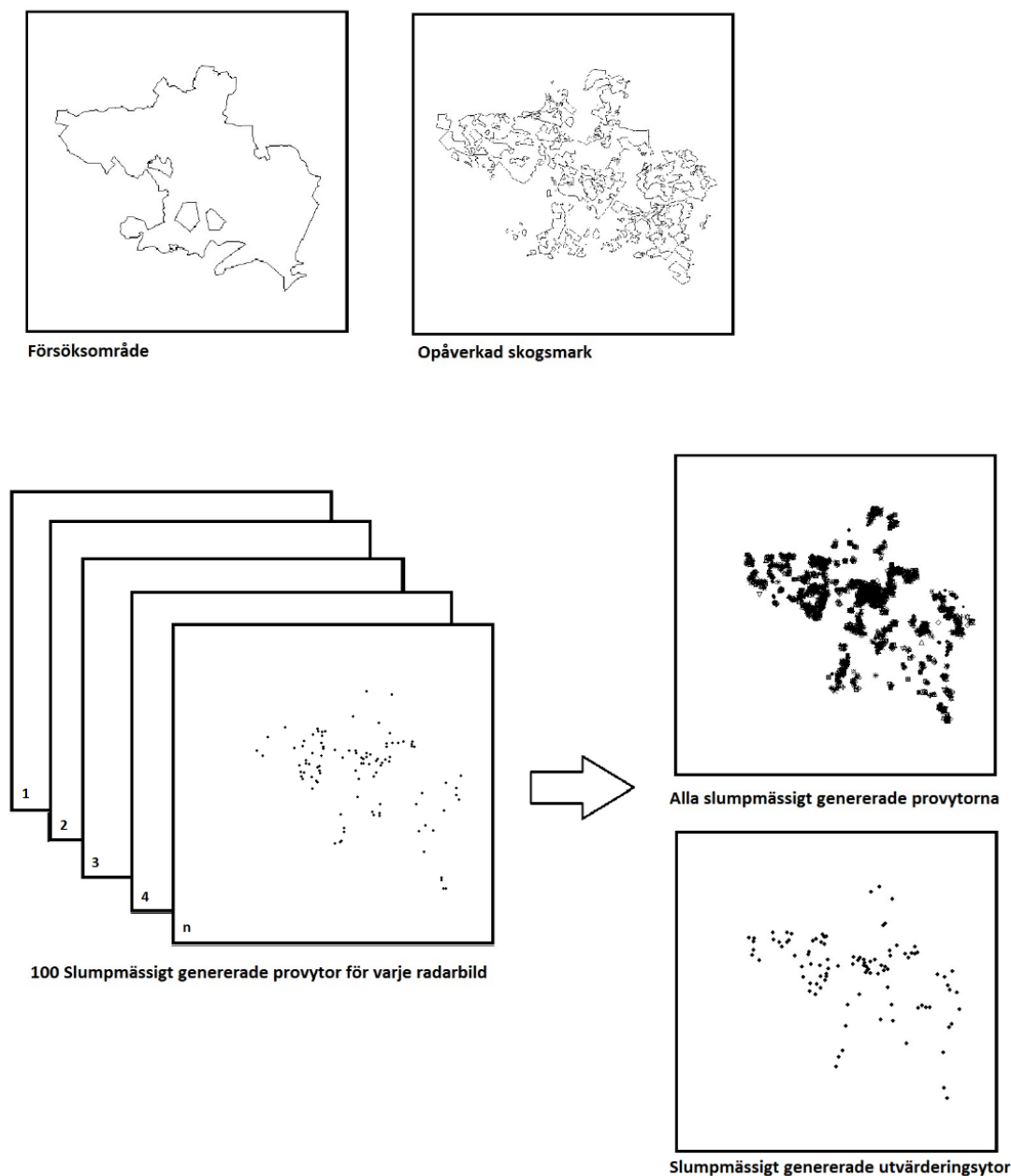
Figure 1. Map where the test sites are located in northern and southern Sweden, Krycklan (64°16'N) and Remningstorp (58°30'N).

Genererade referensytor

För försöksområdena har 100 provytor med 40m radie slumpmässigt genererats utan restriktioner för geografisk distribution (Ripley, 1981) för varje enskilt datum för radarbilderna. Studien berör 21 skilda tidpunkter för Remningstorp och 15 tidpunkter för Krycklan, för vilka provytorna har genererats (Tabell 1, 4 och 5). För alla genererade

provytor är referensdata höjdvärden från ALS-data, 95-percentilen. För båda försöksområdena genererades 100 utvärderingsytor med radien 40 meter utifrån ALS-data. Enskilda provytor för varje datum genereras för att systematiska fel inte ska förekomma när modellerna skapas (Fig. 2).

Genereringen av provytor har skapats inom ett justerat område för båda försöksområdena. Det justerade området avser att omfatta skog som under tidsperioden för datainsamlingen av radardata och laserdata inte har påverkats med någon form av skogsskötsel. Data från Skogsstyrelsen om faktiskt avverkade ytor har använts för identifiering av slutavverkningar och övriga utförda åtgärder är bortrensade med uppgifter från skogsförvaltaren på respektive försöksområde (Fig. 2).



Figur 2. Schematisk figur över de slumpmässigt genererade provytorna, inom opåverkad skogsmark. 100 ytor per radarbild har genererats och ytterligare 100 ytor för utvärdering.
Figure 2. Schematic figure of the randomly generated sample plots, in unmanaged forest. 100 plots for each radar image has been generated and a further 100 sample plots for evaluation.

Tabell 1. Slumpmässigt genererade provytor som används i studien*Table 1. Randomly generated sample plots used in this study*

Remningstorp		Krycklan	
Datum	Antal randomiserade provytor	Datum	Antal randomiserade provytor
2013-07-02	100	2013-08-18	100
2013-07-24	100	2013-09-20	100
2013-08-04	100	2013-10-23	100
2013-08-11	100	2013-11-03	100
2013-09-13	100	2013-11-14	100
2013-09-24	100	2013-12-06	100
2013-10-16	100	2013-12-28	100
2013-11-29	100	2014-01-19	100
2013-12-10	100	2014-02-10	100
2014-01-01	100	2014-04-28	100
2014-01-12	100	2014-05-31	100
2014-01-23	100	2014-06-22	100
2014-02-03	100	2014-07-14	100
2014-03-08	100	2014-07-25	100
2014-04-10	100	2014-08-16	100
2014-05-02	100		
2014-05-13	100		
2014-06-08	100		
2014-06-26	100		
2014-07-18	100		
2014-08-02	100		
Randomiserade utvärderingsytor	100		100
Unika ytor	2200		1600

Fältinventerade referensytor

Utöver det skapade referensdatat från laser finns också fältinventerade ytor med en radie på 40 meter, ytorna är subjektivt utlagda och är inventerade 2014. Inventeringsdatat består av information om position, trädslag, biomassavolym, grundyta, grundytavägd medelhöjd, stamantal och total volym.

Väderdata

Väderdata som har använts i studien kommer från Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI). De tillgängliga faktorerna som användes i studien är lufttemperatur, lufttryck, molnmängd och nederbörds mängd (Tabell 2 och 3). Närmaste väderstation har använts för väderdata.

Tabell 2. Tillgängliga data från SMHI för försöksområdet, Remningstorp

Table 2. Available data from Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) for the study area, Remningstorp

Insamlingsplats	Data	Avstånd från försöksområde (km)	Intervall	Enhet
Remningstorp	Lufttemperatur	0	Tim	°C
Hällum	Lufttryck	39	Tim	hPa
Hällum	Molnmängd	39	Tim	%
Remningstorp	Nederbörds mängd	0	Dygn	mm

Tabell 3. Tillgängliga data från SMHI för försöksområdet, Krycklan

Table 3. Available data from Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI) for the study area, Krycklan

Insamlingsplats	Data	Avstånd från försöksområde (km)	Intervall	Enhet
Vindeln -Sunnansjönäs	Lufttemperatur	9	Tim	°C
Vindeln -Sunnansjönäs	Lufttryck	9	Tim	hPa
Vindeln -Sunnansjönäs	Molnmängd	9	Tim	%
Vindeln -Sunnansjönäs	Nederbörds mängd	9	Dygn	mm

För lufttemperatur, lufttryck och molnmängd har observationer för närmaste heltimme använts för den tidpunkt radarbilden är tagen. Observationer om nederbörds mängd har använts för dygnet som radarbilden är tagen och även en ackumulerad beräkning från de två senaste dygnens nederbörd.

Laserdata

Laserdata har i studien utnyttjats som referensdata för sann höjd utöver de fältinventerade referensytorna. Laserskanningen för Remningstorp är utförd mellan 29 augusti och 9 september 2010 med en punkttäthet på minst 10 punkter per kvadratmeter. Laserskanningen för Krycklan är utförd 5-6 augusti 2008 med en punkttäthet på ungefär 5 punkter per kvadratmeter. Ur punktmolnen har den 95-percentilen (P95) beräknats till ett raster med pixelstorlek på 5 meter för Remningstorp och 10 meter för Krycklan.

InSAR registreringar

Satellitbilder som har använts i studien är tagna av TanDEM-X mellan 2013-07-02 och 2014-08-16 (Tabell 4 och 5). Alla bilderna är tagna i par, genom en enda passering som utnyttjar en bi-statisk konfiguration, single-pass. Tyska DLR är ägare och förvaltare av satelliterna.

Tabell 4. Satellitbilder som används vid studien på försöksområdet Remningstorp. Insamlingssensorer TanDEM-X (TDX), TerraSAR-X (TSX), vilken polarisation bilden är tagen med och height of ambiguity

Table 4. *Satellite image used in this study for test site Remningstorp. Acquisition date, acquisition sensors TanDEM-X (TDX), TerraSAR-X (TSX), which polarization the image is taken with and height of ambiguity*

Datum	Polarisation:	Huvudsatellit:	Height of ambiguity:
2013-07-02	VV	TSX	-50
2013-07-24	VV	TDX	60
2013-08-04	VV	TSX	-61
2013-08-11	VV	TSX	47
2013-09-13	VV	TSX	51
2013-09-24	VV	TSX	55
2013-10-16	VV	TSX	61
2013-11-29	VV	TSX	70
2013-12-10	VV	TSX	-64
2014-01-01	VV	TSX	-52
2014-01-12	VV	TSX	-50
2014-01-23	VV	TSX	-47
2014-02-03	VV	TSX	45
2014-03-08	VV	TSX	-40
2014-04-10	VV	TSX	-62
2014-05-02	VV	TSX	-98
2014-05-13	VV	TSX	-102
2014-06-08	VV	TDX	-38
2014-06-26	VV	TSX	-117
2014-07-18	VV	TSX	-133
2014-08-02	VV	TSX	-48

Tabell 5. Satellitbilder som används vid studien på försöksområdet Krycklan. Insamlingssensorer, TanDEM-X (TDX), TerraSAR-X (TSX), vilken polarisation bilden är tagen med och height of ambiguity

Table 5. Satellite image used in this study for test site Krycklan. Acquisition date, acquisition sensors, TanDEM-X (TDX), TerraSAR-X (TSX), which polarization the image is taken with and height of ambiguity

Datum	Polarisation:	Huvudsatellit:	Height of ambiguity:
2013-08-18	VV	TSX	-73
2013-09-20	VV	TSX	-76
2013-10-23	VV	TSX	-80
2013-11-03	VV	TSX	77
2013-11-14	VV	TSX	-92
2013-12-06	VV	TSX	-89
2013-12-28	VV	TSX	-74
2014-01-19	VV	TSX	-69
2014-02-10	VV	TSX	-65
2014-04-28	VV	TSX	-76
2014-05-31	VV	TSX	-78
2014-06-22	VV	TSX	-80
2014-07-14	VV	TSX	-86
2014-07-25	VV	TSX	-123
2014-08-16	VV	TSX	-145

Bearbetning av radardata

Radarbilder är tagna i par i en single-pass bi-statisk konfiguration av DLR. Bilderna är levererade som Single Look Complex (SLC) data i CoSSC format, med range och azimuth upplösning mellan 1,7m - 2,6m. Range och azimuth betecknar upplösningen vinkelrätt med och längs satellitens banspår. Bilder från två olika vinklar ger olika fasförskjutningar av returerna för samma objekt. Fassettnaderna mellan de två bilderna beräknas sedan med interferometri, därifrån kommer också begreppet InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar).

Height of ambiguity (HOA) är ett mått som är relaterat till avståndet mellan satelliterna när bilderna tas och de påverkar höjdkänsligheten i bilderna när man använder interferometri. HOA värdet ger därför en hänvisning om bilderna är lämpliga för höjdskartning. HOA är definierat enligt ekvation (1):

$$HOA = \frac{2\pi}{k_z} = \frac{\lambda R \sin\theta}{B_{\perp}} \quad (1)$$

Där k_z är vertikalt vågantal, λ är våglängden, R är det genomsnittliga avståndet till satelliterna, θ är den genomsnittliga infallsvinkeln och B_{\perp} är det vinkelräta avståndet mellan satelliterna. HOA-värdet för bilderna som använts i studien varierar mellan 37 och 184 (Tabell 4 och 5). De obearbetade radarbilderna (SLC data) är processade med en digital terrängmodell (DTM) skapad från laserdata. Radarbilderna har processats till en digital ytmodell (DSM) som sedan har subtraherats med DTM för att erhålla interferometrisk InSAR höjd (CHM). CHM och koherensen (COH) har beräknats och

processats till raster med pixelstorlek 5 meter. Koherens inom interferometri är en form av kvalitetsmått på hur väl returnerna av radarvågorna passar ihop, den varierar mellan 0 och 1.

Alla radarhöjdsraster har i första steget för denna studie korrigerats mot en känd öppen yta på båda försöksområdena. För varje radarhöjdsraster har det för den öppna ytan beräknats ett medelvärde för en yta med radien 20 meter. Detta medelvärde har sedan fått korrigera resterande del av rastret, antingen adderat eller subtraherat. Detta har gjorts för att alla radarraster ska ha samma nollnivå.

För att erhålla data för provytorna beräknades medelvärdet för pixlarna inom varje provyta. Radarhöjdsrastren (CHM), laserhöjdsrastret baserat på 95-percentilen (antas vara sant värde för höjd i studien) och koherensrastren (COH) är de raster som använts.

Metod

Utförande av analys

För att utvärdera de yttre faktorer som eventuellt påverkar skattning av skog med radardata från satellit genomfördes studien i flera steg både för att verifiera resultat och möjligheten att hitta fler samband. De yttre faktorer som tros påverka skogen vid insamling av radardata är temperatur, nederbörd, lufttryck och molnmängd. Dessa har studerats under cirka ett års tid på Remningstorp och Krycklan.

Samband mellan skalfaktor i radarbilder och yttre faktorer

Skattning av höjd genomfördes med en linjär regressionsmodell (2) för varje enskild radarbild, 21 bilder för Remningstorp och 15 bilder för Krycklan. De linjära regressionsmodellerna för varje enskild radarbild analyserades genom att samband söktes mellan koefficienterna k , m och de yttre faktorerna. Korrigeringskoefficienten för lutningen har beteckningen k och skärningspunkten för var modellen skär P95 när höjden av CHM är 0 betecknas som m .

$$P95 = k * CHM + m \quad (2)$$

Olika trädslag, trädhöjd och yttre faktorer över tid

För att finna samband mellan hur olika skogstyper ger varierande skattningsresultat orsakat av yttre faktorer valdes provytor selektivt. Provytor med hög andel av vardera specifikt trädslag, provytor med blandade trädslag, provytor med låg höjd respektive hög höjd valdes. För selektionen av trädslagsandel användes beståndsregister, de fältinventerade referensytorna och en visuell bedömning i IR-orthofoto. För alla enskilda provytor skapades linjediagram med radarhöjdsförändringar och förändringar av yttre faktor mellan 2013-07-02 till 2014-08-02 för Remningstorp och mellan 2013-08-18 till 2014-08-16 för Krycklan. Denna del av studien utfördes på 21 bilder för Remningstorp och 15 bilder för Krycklan för erhålla en tidserie på ett år. Bilderna för de ovan nämnda datumen hade reellt stabilt HOA värde, (Tabell 4 och 5). HOA kan anses vara ett mått på känsligheten för höjder i radarbilder, HOA mellan 20-50 m anses vara lämpligt för skoglig tillämpning (Solberg *m.fl.*, 2015). Bilderna för denna del av studien valdes utifrån så liten variation av HOA som möjligt, för att utesluta HOA som påverkande faktor. Värdet bör inte vara för stort, eftersom det ger mindre känslighet för låga objekt. I analysen där de fältinventerade ytorna används för att analysera korrelation mellan yttre faktorer och radarhöjd, har ingen åtgärd för uteliggare vidtagits eftersom de inte påverkar korrelation för andra ytor. Detta medför att enskilda ytor kan ge avvikande korrelation om de eventuellt är påverkade eller förändrade.

Modeller som inkluderar yttre faktorer

Modellerna för detta utförande omfattades av alla bilderna samtidigt. I detta utförande kommer poängen med att ha 100 enskilda provytor för varje enskilt datum, för att undvika systematiska fel i modellerna. Uppbyggnaden av datasetet vid genereringen av modellerna har satts ihop för att erhålla flera observationer för de yttre faktorerna (Tabell 6). Modellerna utvärderades genom att se vikten av att lägga till eller ta bort de yttre faktorerna i modellerna. P-värde för tillagd variabel och modellernas förklaringskraft ”adjusted R^2 ” (R^2_{adj}) ansågs som viktiga parametrar vid modellernas utvärdering, p-värdet ger information om tillförlitligheten hos koefficienten för den tillagda variabeln,

signifikans finns hos koefficienten om p-värdet är under 0,05. Modellernas R^2_{adj} jämfördes för att konstatera vilka modeller med inkluderad yttre faktorer som har påverkan och om faktorn tillför något till modellerna i form av bättre förklarandegrad.

Tabell 6. Exempel på datasetets struktur vid skapade av modeller som inkluderar alla datum i samma modell, denna för Remningstorp

Table 6. Example of dataset structure of the created models, which include all dates in the same model, this is for Remningstorp

Datum	Plot ID	CHM (m)	P95 (m)	Temp °C
2013-07-02	1_1	4,5	10,2	-11,2
2013-07-02	1_2	-0,6	1,7	-11,2
2013-07-02	1_3	13,7	21,8	-11,2
2013-07-02
2013-07-02	1_100	8,8	18,0	-11,2
2013-07-24	2_1	12,1	20,9	-2,1
2013-07-24	2_2	2,7	12,2	-2,1
2013-07-24	2_3	12,0	19,2	-2,1
2013-07-24
2013-07-24	2_100	2,7	9,6	-2,1
...
2014-08-02	33_100	12,7	18,5	19,3
Unika provtytor	2100	2100	2100	21 observationer

Utvärdering

För att utvärdera betydelsen av tillagd faktor i ett ytterligare steg genomfördes skattningarna där det relativa medelfelet (Root mean square error, RMSE) beräknades på 100 separata utvärderingsytor.

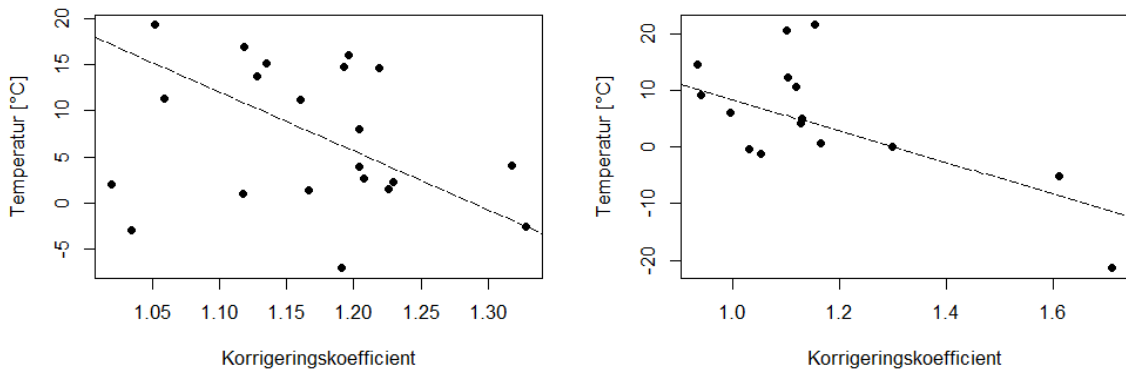
Beräkning av relativt RMSE utfördes med formel (3), där \hat{Y} = skattad höjd och Y = sann höjd.

$$\text{relativt RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y} - Y)^2}{\frac{\sum_{i=1}^n Y}{n}}} * 100 \quad (3)$$

Resultat

Samband mellan skalfaktor i radarbilder och yttre faktorer

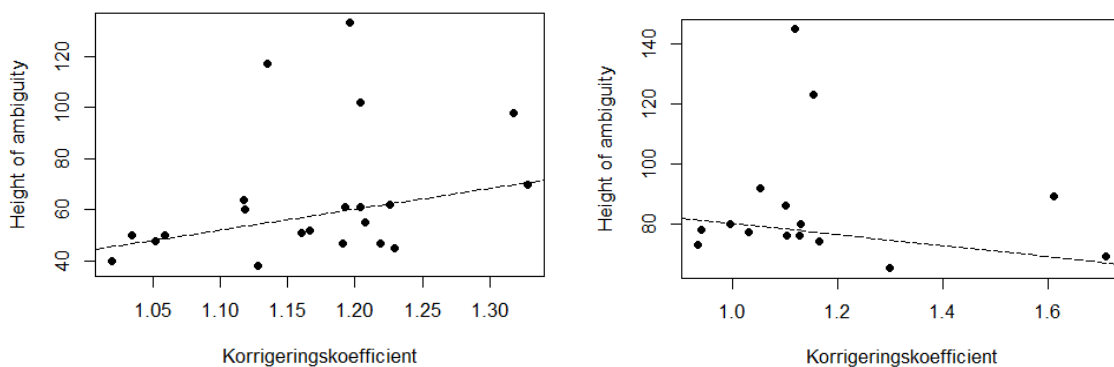
Den faktor som visar på starkast påverkandegrad för radar upptäcktes för temperatur. Det kan fastställas att korrigeringskoefficienten k för de linjära modellerna (2) förändras linjärt med temperatur (Fig. 3). Vilket innebär att vid lägre temperatur kompenserar den linjära modellen med större värde för korrigeringskoefficienten för CHM när modellen är uppbyggd som modell (2).



Figur 3. Temperatur mot korrigeringskoefficienten för CHM i modell (1) för varje datum. Försöksområde Remningstorp till vänster och Krycklan till höger.

Figure 3. Temperature against correction coefficients for CHM in the linear model (1) for each date. Test site Remningstorp to the left and Krycklan to the right.

Utöver de meteorologiska faktorerna analyserades den tekniska faktorn HOA på samma sätt (Fig. 4). På försöksområdet Remningstorp tenderar korrigeringskoefficienten för den linjära modellen (2) att öka med ökat HOA och mer eller mindre oförändrat för försöksområdet Krycklan.

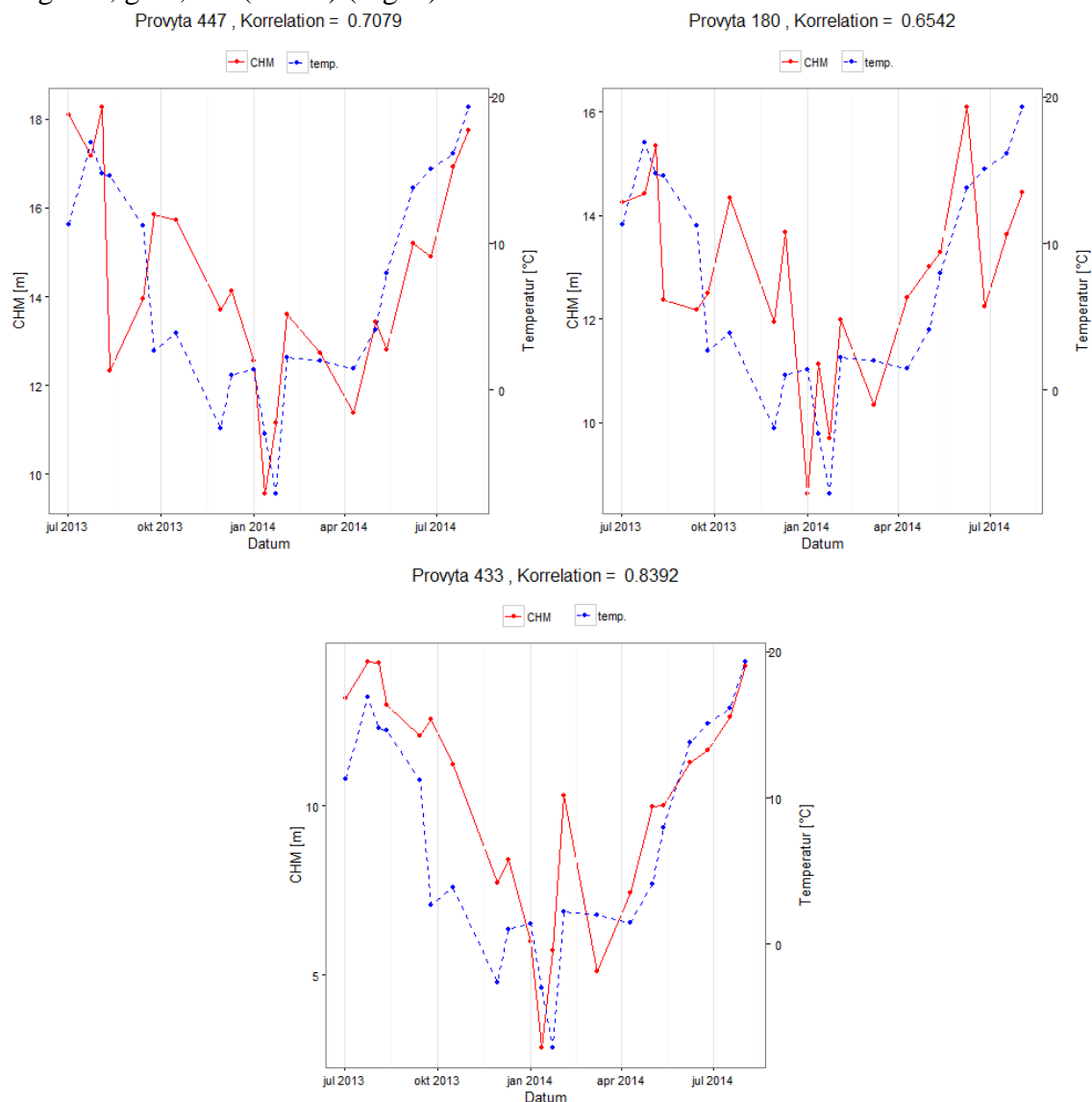


Figur 4. Height of ambiguity (HOA) mot korrigeringskoefficienten för CHM i modell (1) för varje datum. Försöksområde Remningstorp till vänster och Krycklan till höger.

Figure 4. Height of ambiguity (HOA) against correction coefficients for CHM in the linear model (1) for each date. Test site Remningstorp to the left and Krycklan to the right.

Olika trädslag, trädhöjd och yttre faktorer över tid

InSAR radarhöjd har under ett år från juli 2013 till juli 2014 visats ha samband på provytenivå med hur temperatur varierar på båda försöksområdena. Många ytor har väldigt god korrelation, med korrelationstal från 0,65 och uppåt (Tabell 7). Provytor med olika trädslagsandelar har liknande samband oberoende av trädslag. Trädslagsandel presenteras enligt tall, gran, löv (T:G:L) (Fig. 5).



Figur 5. InSAR radarhöjd och temperatur under ett år för tre olika provytor med olika majoritet av trädslag, uppe till vänster TGL 0:9:1, uppe till höger TGL 9:1:0, nedre TGL 0:1:9. Försöksområde Remningstorp.

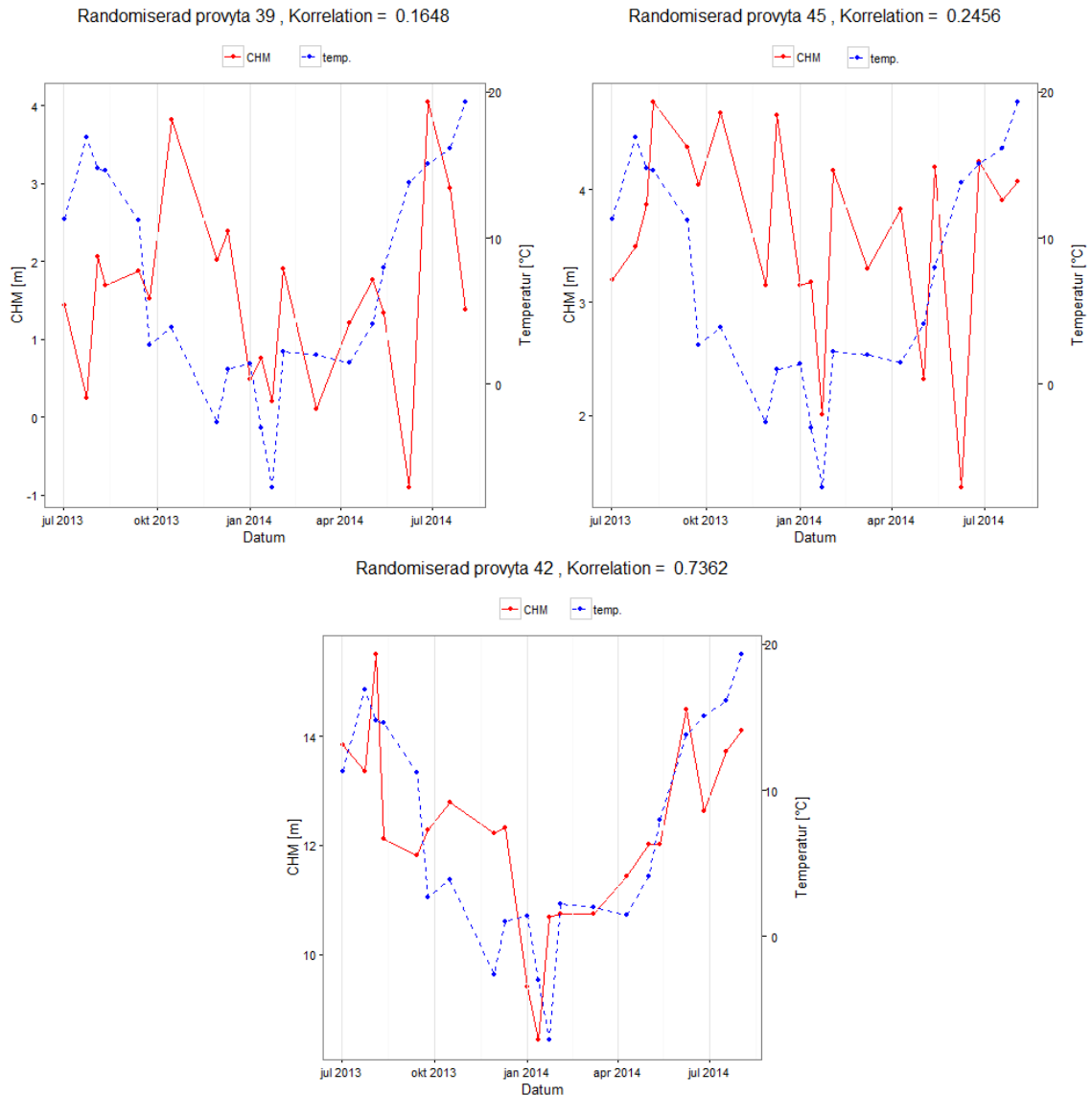
Figure 5. InSAR radar height and temperature during one year for three sample plots with different majority of tree species. The plot up to the left consist 90% spruce and 10% leaf. The plot up to the right consist of 90% pine and 10% spruce and the plot below consist of 10% spruce and 90% leaf. Test site Remningstorp.

Samband mellan radarhöjd och temperatur visas för utvalda ytor med olika trädslagsandel (Fig. 5). Trädslagsandel och korrelationstal för samtliga fältinventerade referensytor (Tabell 7).

Tabell 7. Korrelation mellan radarhöjd och temperatur för varje provyta över ett års tid
Table 7. The correlation between radar height and temperature during one year for each sampleplot

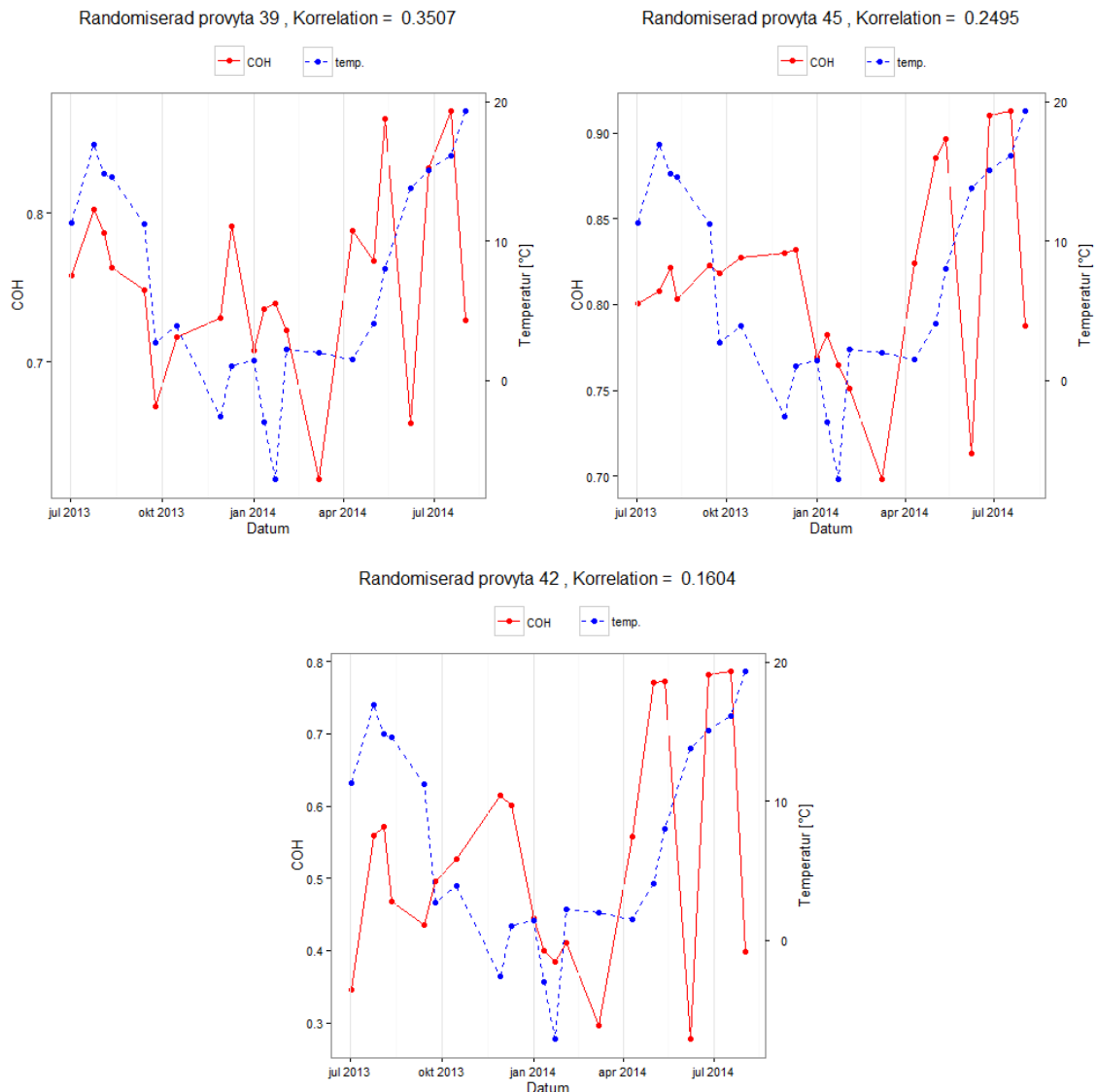
Provyta	Tall (%)	Gran (%)	Löv (%)	Korrelation mellan CHM och temperatur
10	0	99	1	0,80
13	0	99	1	0,12
32	0	95	5	0,76
87	0	80	20	0,82
113	0	100	0	0,44
116	0	100	0	0,35
151	0	99	1	0,53
165	19	81	0	0,80
167	60	39	0	0,66
180	91	9	0	0,65
203	0	84	16	0,67
206	68	30	2	0,29
211	0	90	10	0,53
212	0	65	35	0,80
226	0	96	4	0,64
269	100	0	0	0,60
316	0	98	2	0,64
325	0	96	4	-0,01
343	30	64	6	0,59
351	0	92	7	0,46
363	6	88	6	0,58
433	0	0	100	0,84
447	0	92	8	0,71
517	0	44	55	0,41
605	0	0	100	0,64
1005	98	0	2	0,33
1010	0	100	0	0,78
1015	0	9	91	0,82
1018	0	100	0	0,73
1287	0	97	3	0,67
1502	0	99	1	0,70
1857	0	85	15	0,54
1872	0	94	6	0,62
2127	99	0	1	0,36
2137	0	76	24	0,63
2547	0	97	2	0,60
2632	0	100	0	0,44
3122	0	99	1	0,69
3417	0	99	0	0,62
3938	0	97	3	0,50

Tre valda provytor från de 100 slumpmässigt genererade referensytorna med olika höjd (Fig. 6 och 7). Provytor med kalmark och lågskog/ungskog visar på dåligt samband mellan radarhöjd och temperatur. Sambandet mellan InSAR radarhöjd och temperatur har bäst korrelation i gammal skog. Dessa redovisas med grafer och korrelationstal (Fig. 6). För samma ytor gav de för radarkoherens inte några tendenser att temperatur har mer samband med koherens jämfört med sambandet mot radarhöjd (Fig. 7).



Figur 6. InSAR radarhöjd och temperatur under ett år för tre olika provytor med olika höjd. Slutavverkad yta uppe till vänster, ca 15år gammal blandningskog uppe till höger, nedre grafen är en yta med >100år gammal barrskog. Försöksområde Remningstorp.

Figure 6. InSAR radar height and temperature during one year for three different forest heights, the plot up to the left is a clear-felled area, the plot up to the right is a young forest area with an age of 15year, the plot below is an old forest area with older than 100 years old coniferous forest. Test site Remningstorp.



Figur 7. Radarkoherens och temperatur under ett år för tre olika provtytor med olika höjd. Slutavverkad yta uppe till vänster, ca 15år gammal blandungskog uppe till höger, nedre grafen är en yta med >100år gammal barrskog. Försöksområde Remningstorp.

Figure 7. Radar coherence and temperature during one year for three different forest heights, the plot up to the left is a clear-felled area, the plot up to the right is a young forest area with an age of 15year, the plot below is an old forest area with older than 100 years old coniferous forest. Test site Remningstorp.

Sambanden som uppvisas på det södra försöksområdet Remningstorp styrks genom liknande trender på det nordliga försöksområdet Krycklan. Det liknande resultatet för Krycklan styrks med två provtytor med tillhörande IR-orthofoto (Fig. 8). IR-orthofoto används som komplement till de slumpmässigt genererade provtytorna, eftersom det under tiden för insamlingen av fjärranalysdata har saknats tillförlitliga fältinventeringar. För provytan till vänster (Fig. 8), syns det tydligt att det är en äldre skog med lövinslag och ytan till höger en yngre och relativt homogen skog.

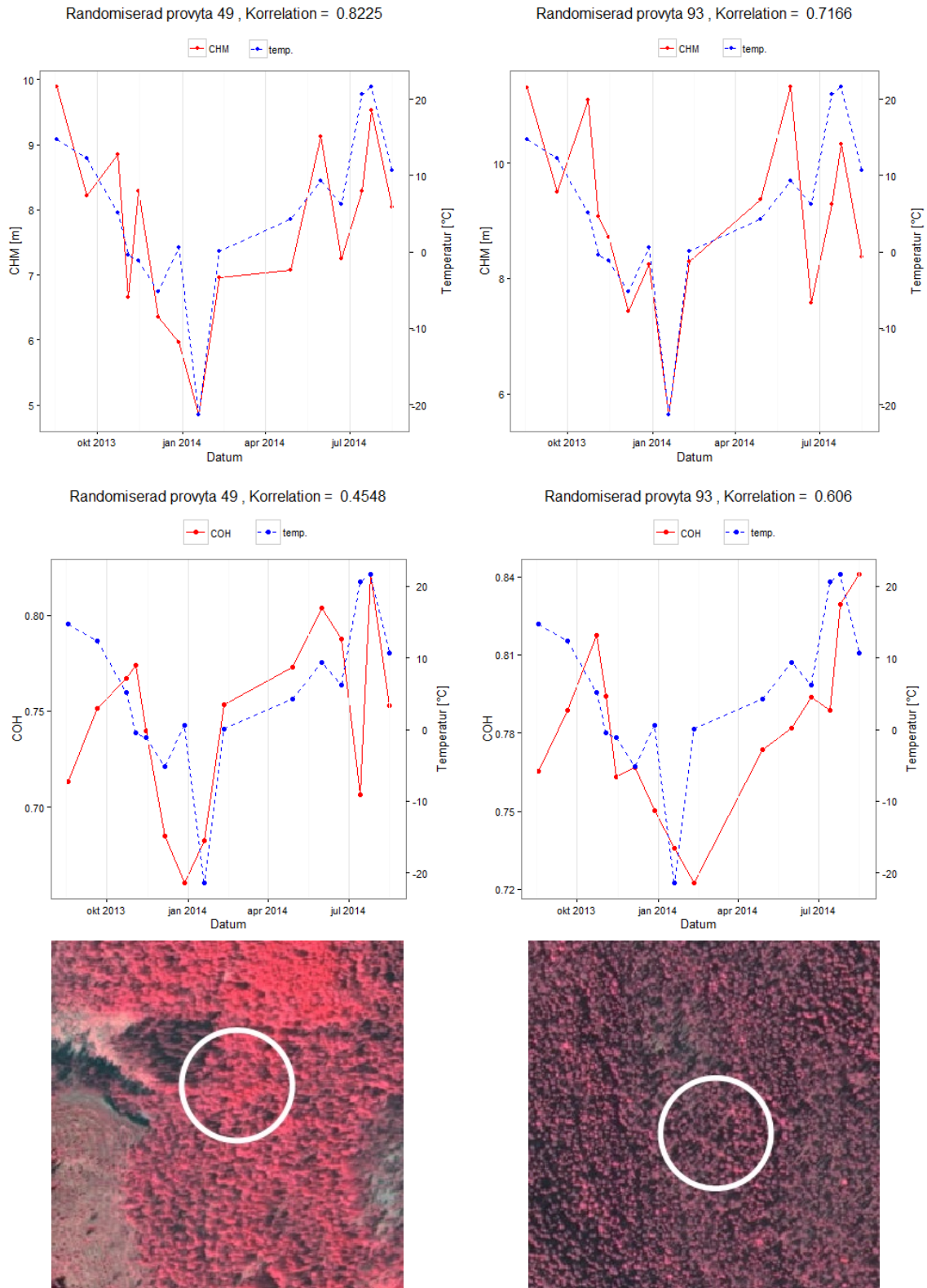
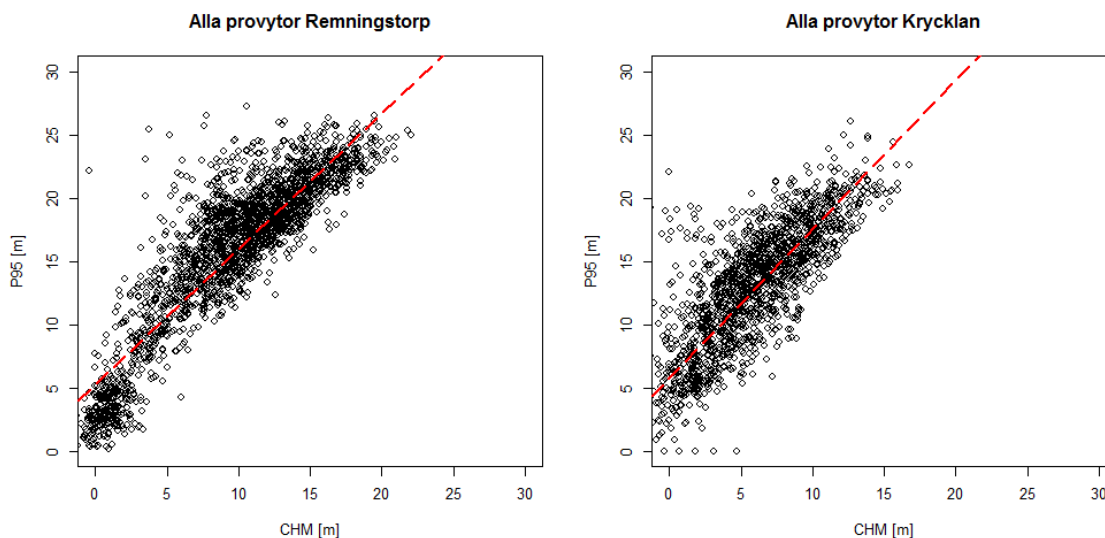


Figure 8. Two plots during one year with radar height, radar coherence and temperature variations at test site Krycklan. The pictures below the graphs is IR-orthophotos for the two sampleplots.

Modeller som inkluderar yttre faktorer



Figur 9. 95-percentilen för laserdata (sann höjd) mot radarhöjd (CHM) för alla provytor, Remningstorp till vänster och Krycklan till höger.

Figure 9. 95-percentile for laserdata (true height) against radar height (CHM) for all sample plots. Remningstorp to the left and Krycklan to the right.

Utfallet av de slumpmässigt genererade provytorna för båda försöksområdena visar att radarbilder återger en generellt för låg höjd (Fig. 9). Olika modeller har skapats för att utvärdera om tillagd yttre faktor kan förbättra skattningskvaliteten och förklaringsgraden för modellerna (Tabell 8).

Tabell 8. Modeller för skattning av höjd, med och utan yttre faktor. Modellerna med τ indikerar att yttre faktor inkluderas i modellen

Table 8. Models for estimate forest height, with and without weather factor. Models with τ indicate that weather factor is included in the model

Modell:	Formel:
1	$P_{95} = \alpha * CHM + \beta$
2 τ	$P_{95} = \alpha * CHM + \beta * \text{kelvin} + \delta$
3	$P_{95} = \alpha * CHM + \beta * COH + \delta$
4 τ	$P_{95} = \alpha * CHM + \beta * COH + \delta * \text{kelvin} + \mu$
5	$P_{95} = \alpha * CHM^\beta$
6 τ	$P_{95} = \alpha * (CHM^\beta * \text{kelvin}^\delta)$
7	$P_{95} = \alpha * (CHM^\beta * COH^\delta)$
8 τ	$P_{95} = \alpha * (CHM^\beta * COH^\delta * \text{kelvin}^\mu)$

Läggs temperatur till som förklarande variabel för höjd blir det för modellerna både på Remningstorp och Krycklan ingen större skillnad i R^2_{adj} värde (Tabell 9 och 10), vilket betyder att modellerna inte beskriver höjden för P95 nämnvärt bättre med temperatur inkluderat i modellerna. Det relativa RMSE värdet som är beräknat för varje modell är baserat på en korsvalidering (Bro *m.fl.*, 2008) för träningsdatasetet, 2100 ytor för Remningstorp och 1500 ytor för Krycklan.

Tabell 9. Koefficienter och skärningspunkt för modellerna, adjusted R² värde och förklarande RMSE för modellerna. Modeller baserade på 21 radarbilder, á 100 provytor för försöksområdet Remningstorp. Förklarande relativt RMSE är beräknat utifrån en korsvalidering på samma data
Table 9. Coefficients and intercept for the models, adjusted r2 value and explaining relative RMSE for the models. The models is based on 21 radar images with 100 sample plots at each image at the test site Remningstorp. The explaining relative RMSE is calculated with “leave on out” cross-validation

Modell	α	β	δ	μ	Adj. r ²	Förklarande relativt RMSE (%)
1	1,10	5,32			0,78	18,3
2 τ	1,12	-0,10	33,45		0,80	17,7
3	1,03	-11,39	13,56		0,85	15,5
4 τ	1,05	-10,69	-0,06	28,98	0,85	15,3
5	5,00	0,53				16,6
6 τ	7546,42	0,54	-1,30			16,2
7	4,56	0,52	-0,27			14,9
8 τ	419,68	0,53	-0,26	-0,80		14,7

Tabell 10. Koefficienter och skärningspunkt för modellerna, adjusted r2 värde och förklarande RMSE för modellerna. Modeller baserade på 15 radarbilder, á 100 provytor för försöksområdet Krycklan. Förklarande relativt RMSE är beräknat utifrån en korsvalidering på samma data
Table 10. Coefficients and intercept for the models, adjusted r2 value and explaining relative RMSE for the models. The models is based on 15 radar images with 100 sample plots at each image at the test site Krycklan. The explaining relative RMSE is calculated with “leave on out” cross-validation

Modell	α	β	δ	ϵ	Adj. r ²	Förklarande relativt RMSE (%)
1	1,03	6,86			0,60	23,0
2 τ	1,07	-0,06	23,74		0,62	22,6
3	0,92	-26,58	28,20		0,66	21,2
4 τ	0,95	24,88	-0,04	38,38	0,67	20,9
5 τ	6,32	0,43				26,0
6 τ	13400,98	0,45	-1,37			25,5
7	4,85	0,38	-1,33			24,5
8 τ	352,67	0,40	-1,22	-0,76		24,4

Modellerna tränades på ett dataset (Tabell 6) med 2100 ytor för Remningstorp och 1500 ytor för Krycklan, 100 specifika ytor för varje datum. 100 unika ytor, samma för alla datum, skilda från träningsdatasetet skattades. Resultatet av skattningarnas relativa medelfel för modeller har beräknats för Remingstorp (Tabell 11) och Krycklan (Tabell 12).

Tabell 11. Relativt medelfel (RMSE) för varje datum på Remningstorp med modellerna för skattning av höjd. Modellerna är skapade med ett träningsdata på 2100 ytor för datumen givna i tabellen. Träningsdatasetet är uppbyggt som tabell 6. Temperatur för varje datum redovisas också

Table 11. Relative RMSE for each date at Remningstorp with models for forest height estimations. The models is created with a training-dataset of 2100 plots for each date shown in the table. The training-dataset is build up as table 6. The temperature is also shown in the table

Datum:	Relativt RMSE %								Temp. (°C)
	1	2 τ	3	Modell		6 τ	7	8 τ	
				4 τ	5				
2013-07-02	13,2	12,0	11,8	10,8	12,5	11,5	10,8	10,1	11,3
2013-07-24	11,4	10,7	7,7	8,2	11,2	10,3	8,7	8,9	16,9
2013-08-04	13,8	10,7	9,4	8,1	13,1	10,8	10,1	9,1	14,8
2013-08-11	16,0	16,0	11,9	11,3	14,6	14,2	11,9	11,4	14,6
2013-09-13	14,8	14,1	11,6	11,1	13,4	12,7	11,0	10,6	11,2
2013-09-24	13,2	14,2	11,8	12,3	12,6	13,4	11,2	11,6	2,7
2013-10-16	17,2	18,6	14,6	15,4	17,8	18,7	15,8	16,3	3,9
2013-11-29	14,2	14,8	14,2	13,3	12,4	13,0	12,5	11,9	-2,6
2013-12-10	17,9	19,4	14,6	15,1	17,7	18,9	15,5	16,0	1
2014-01-01	20,5	19,1	15,5	15,2	17,4	16,5	14,6	14,3	1,4
2014-01-12	21,7	18,8	16,0	15,0	18,8	16,9	16,1	15,3	-3
2014-01-23	22,2	18,4	16,4	16,0	18,3	15,6	16,1	15,8	-7,1
2014-02-03	15,6	16,5	15,5	16,5	14,3	15,0	14,6	15,4	2,2
2014-03-08	22,3	21,5	16,7	17,3	22,0	21,7	20,4	20,9	2
2014-04-10	17,1	16,5	15,0	14,4	14,4	14,1	13,5	13,1	1,5
2014-05-02	13,4	13,1	17,3	16,2	11,8	11,7	13,6	12,9	4,1
2014-05-13	15,4	15,4	18,4	18,2	14,0	14,0	15,2	15,1	8
2014-06-08	12,5	15,3	11,2	9,6	12,3	13,9	12,0	11,1	13,8
2014-06-26	15,6	14,3	15,4	16,3	15,0	13,8	13,8	14,1	15,1
2014-07-18	16,8	15,3	16,1	17,0	16,0	14,6	14,6	14,9	16,1
2014-08-02	14,5	11,1	13,8	10,5	13,7	10,9	12,5	10,1	19,3

Tabell 12. Relativt medelfel (RMSE) för varje datum på Krycklan med modellerna för skattning av höjd. Modellerna är skapade med ett träningsdata på 1500 ytor för datumen givna i tabellen.

Träningsdatasetet är uppbyggt som tabell 6. Temperatur för varje datum redovisas också

Table 12. Relative RMSE for each date at Krycklan with models for forest height estimations. The models is created with a training-dataset of 1500 plots for each date shown in the table. The training-dataset is build up as table 6. The temperature is also shown in the table

Datum:	Relativt RMSE %								Temp. (°C)
	1	2 τ	3	Modell		6 τ	7	8 τ	
			4 τ	5					
2013-08-18	20,9	18,3	22,9	20,6	23,2	20,9	24,2	22,4	14,7
2013-09-20	16,3	15,4	16,1	15,4	18,3	17,7	18,1	17,7	12,3
2013-10-23	23,8	24,0	20,1	20,4	25,2	25,2	22,0	22,1	5,1
2013-11-03	16,9	16,1	15,7	15,3	22,3	21,7	21,5	21,2	-0,4
2013-11-14	19,6	20,8	16,5	17,2	21,2	22,2	18,6	18,9	-1,1
2013-12-06	25,4	23,0	20,7	19,3	24,7	22,1	20,7	19,6	-5,2
2013-12-28	19,3	18,4	15,4	15,2	24,9	24,2	22,1	22,1	0,6
2014-01-19	26,9	23,5	20,6	17,6	25,0	20,3	19,5	16,9	-21,4
2014-02-10	19,8	19,0	14,7	14,8	23,1	22,4	18,9	19,2	0,1
2014-04-28	17,8	17,4	16,5	16,2	21,2	20,8	19,6	19,4	4,3
2014-05-31	21,8	20,6	19,0	18,4	23,4	22,1	21,0	20,5	9,3
2014-06-22	20,5	20,7	18,8	19,0	27,5	27,9	26,4	26,6	6,2
2014-07-14	16,9	17,7	18,4	17,8	22,1	22,9	23,0	23,0	20,6
2014-07-25	18,4	17,0	19,2	19,8	21,2	20,6	22,2	22,8	21,6
2014-08-16	18,1	18,9	23,5	23,9	25,7	26,2	29,0	29,1	10,6

Med temperatur inkluderat i modellerna blir skattningsresultatet bättre för nästan alla modeller och datum, största förbättring erhålls för radarbilder tagna vid minusgrader. Den modell som bedöms ge bästa skattningskvalité för samtliga radarbilder är modell 4, både för Remningstorp och Krycklan (Tabell 11 och 12). Största förbättring med tillagd temperatur erhålls mellan modell 1 och 2 för 2014-01-23 på Remningstorp, 3,8 procentenheter (Tabell 11). Det samma gäller för Krycklan där största förbättringen erhålls mellan modell 1 och modell 2 för vinterbilden 2014-01-19, med 3,4 procentenheter (Tabell 12). För de givna datumen är radarbilderna tagna vid $-7,1^{\circ}\text{C}$ respektive $-21,4^{\circ}\text{C}$.

Diskussion

En yttre faktor som tycks ha inverkan vid skattning av skog med satellitradar är temperatur. Övriga faktorer som analyserats är lufttryck, molnmängd och nederbörd visar inga starka signaler att de påverkar radarbilderna i denna studie. De omnämnda faktorerna har analyserats med samma metod som temperatur men inte visat ge tillräckligt bra samband för att redovisas som resultat. För den tidsserie studien berör har det varit bristande nederbörd dagarna innan bilderna är tagna och även den dag bilden är tagen, därav är dataunderlaget för litet att kunna dra slutsatser om fuktigheten i denna studie. Det är däremot känt att returerna från radarvågor påverkas av de dielektriska egenskaperna som till stor del bestäms av flytande vatten. De dielektriska egenskaperna i vegetationen varierar både med förändring över årstiderna i växtfysiologi och variationer i väderförhållande. Vatten i flytande form har på barr och bladtytor en dämpande effekt för penetrationen av radarvågorna i trädkronor (Sarabandi, 1997; Way *m.fl.*, 1990). Dessa teorier styrker studiens resultat, då temperaturer under noll grader Celsius bidrar till ändrad fysisk form för vatten och därmed en mindre dämpning av radarvågorna. Höjden som återges i radarbilder tagna i minusgrader är därför betydligt lägre än vid plusgrader.

Datat som analyserats i sin helhet har berört ett års tid. För de fältinventerade och slumpmässigt genererade referensytorna har ingen hänsyn till fram- eller tillbakaskrivning vidtagits, eftersom studien berör ett kort tidsintervall bör tillväxten inte påverka studiens resultat nämnvärt vid skattningarna.

Laserdata har använts som primär referens när modellerna har skapats, detta för att laserdata möjliggör generering av obegränsat antal unika referensdata för höjd. När modellerna skapas för att ta hänsyn till de yttre faktorerna krävs att flera datum tas med i modellerna, eftersom det bara finns en observation för varje datum och faktor. För att inte få ett systematiskt fel med att använda samma referensyta över många datum genererades egna referensytor för varje datum. Antalet ytor bestämdes till 100 st per datum för att få ett tillräckligt dataunderlag och möjlighet att kunna ta bort dåliga ytor, vilket dock inte har gjorts i denna studie. En utveckling av studien kan vara att undersöka hur fenologi, påverkar skattningen, bland annat inverkan av lövsprickning på våren och lövfällning på hösten. Denna studie ger motargument för att fenologin påverkar, grafer med temperatur och radarhöjd för barrdominerade ytor talar emot att fenologin har inverkan i form av lövavfall, eftersom de barrdominerade ytorna ger liknande korrelation (Fig. 5).

Korrigeringskoefficienterna för radarbilderna (Fig. 3) visar samband mellan låg temperatur och större korrigeringskoefficient. Det kan förklaras med stöd från de ovannämnda studierna där radarvågorna tillåts penetrera längre ner i trädkronorna när flytande vatten inte förekommer. Under studiens gång har det noterats att det generellt blir väldigt låga höjder från radarbilderna över hela studieområdet när temperaturen är låg, studien ger därigenom stöd för att underskattningen av höjd inte bara sker på små lokala ytor.

För skattning av skoglig höjd samt andra skogliga variabler som volym, diameter och grundyta med satellitradar ger denna studie belägg för när man kan förväntas erhålla bra kvalitet på skattningar. För alla enskilda radarbilder erhålls goda skattningar för skogliga variabler om man har en modell som är anpassad för förhållandena då radarbilden är tagen. Utifrån studiens resultat rekommenderas det att radarbilder tas under förhållanden när det är plusgrader. Eftersom höjden i radarbilder är väldigt låg vid låg temperatur oavsett hur

hög skogen egentligen är. Exempel för detta kan tas från provyta 447 (Fig. 3) som i fält är uppmätt till en grundtyevägd medelhöjd på 25,95 meter, men som i radarbilderna återges strax över 18 meter. I vinterbilderna kan man anta att det är liten mängd flytande vatten i vegetationen, för provyta 447 återges höjden i radarbilderna under 10m, vilket ger en skillnad på mer än 15 meter från fältmätt grundtyevägd medelhöjd. Detta är inte ett entydigt argument eftersom det är möjligt att korrigera radarbilder som har låg höjd med fältinventerade ytor om det finns bra samband, därför är stor skillnad i absolutavvikelse mellan radarhöjd och fältmätt höjd inte helt avgörande vad gäller skattningskvalitén.

Skogens faktiska höjd påverkar hur stabil höjden återges i radarbilderna, den slutsatsen stöds på att ytor som är rikligt beskogade (Fig. 6, randomiserad provyta 42) har relativ hög korrelation med temperatur. Ytor med ingen skog eller väldigt ung skog återger ojämna höjder från radarbilderna oavsett temperatur. I en finsk studie redovisas att radarvågor i X-bandet för InSAR penetrerar längre ner i trädkronorna på löv och blandskog jämfört med barrskog (Praks *m.fl.*, 2013), vilket indirekt resultatet i denna studie också visar (Fig. 5). Eftersom höjden i radarbilderna mer än halveras på lövdominerande ytor när förhållandena både är lövavfall och låg temperatur jämfört med de barrdominerande ytorna.

I del 3 i studien har temperatur lagts som en beskrivande variabel i regressionsmodellerna för skoglig höjd. Alla uppsättningar av modellerna uppvisar om inte mycket men bättre förklarandegrad när temperatur läggs till för båda försöksområdena. Utifrån resultatet att modellerna blir bättre har försök gjorts för att finna en korrigeringsmetod för att korrigera för temperatur när radarbilden är tagen. Alla modeller har använts (Tabell 11 och 12) för att skatta enskilda radarbilder, både modeller utan temperatur och andra med (τ). Här kan det konstateras att en generell modell för olika tidpunkter inte är optimalt. Samtidigt visar resultatet att tillagd temperatur ger största positiv inverkan på skattningskvalitén när temperaturen är långt under noll grader Celsius ($^{\circ}\text{C}$), radarbilderna tagna 2014-01-23 och 2014-01-19 uppvisar sådant resultat (Tabell 11 och 12) där största förbättringen i procentenheter för relativa RMSE blir med tillagd temperatur som beskrivande variabel.

Jämfört med den liknande studien (Solberg *m.fl.*, 2015) är resultatet att vid låga temperaturer återges höjd från radarbilder betydligt lägre än vid varmt klimat. I både denna och den angivna studien är slutsatsen att korrigeringskoefficienten i modellerna för radarhöjd ökar i takt med lägre temperatur vid skattning av skogliga variabler. Denna studie styrker sambandet för höjd medan Solberg styrker sambandet för skattning av biomassa.

Slutsatser

Tillägg av temperatur i en modell ger största förbättring vid minusgrader (Tabell 11 och 12).

Radarbilder som tas när temperaturen understiger 0 grader Celsius bör vid skattning av skogliga variabler med satellitburen radar beaktas. Skattningarna blir osäkrare vid låg temperatur eftersom penetrationen av radarvågorna är oregelbunden i olika trädslag, där också vattnets fysiska form har inverkan. Eftersom det kan konstateras att vattnets fysiska form påverkar, så bör mängden nederbörd också påverka radarbildernas kvalitet.

Litteraturförteckning

- Ager, T.P. & Bresnahan, P.C. Geometric precision in space radar imaging: results from TerraSAR-X. I: *Handlingar från Proc. ASPRS 2009 Annu. Conf*2009, ss. 9-13.
- Ahlberg, O. & Kardell, L. (1997). Remningstorp; från herresäte till skogslaboratorium. Hildur och Sven Wingquists stift. för skogsvetenskaplig forskning, Skara.
- Bergström, H., Melin, H. & Nicolausson, A. (2009). Höjddata – enförutsättning för klimatanpassning. *Gävle, Sweden: Swedish National Land Survey*.
- Bro, R., Kjeldahl, K., Smilde, A. & Kiers, H. (2008). Cross-validation of component models: A critical look at current methods. *Analytical and bioanalytical chemistry*, 390(5), ss. 1241-1251.
- Gibbard, S., Caldeira, K., Bala, G., Phillips, T.J. & Wickett, M. (2005). Climate effects of global land cover change. *Geophysical Research Letters*, 32(23).
- Homer, J., Longstaff, I., She, Z. & Gray, D. (2002). High resolution 3-D imaging via multi-pass SAR. *IEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, 149(1), ss. 45-50.
- Hyypä, J., Hyypä, H., Leckie, D., Gougeon, F., Yu, X. & Maltamo, M. (2008). Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), ss. 1339-1366.
- 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. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(11), ss. 3317-3341.
- Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., Plummer, S., Rocca, F., Saatchi, S. & Shugart, H. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), ss. 2850-2860.
- Malhi, Y., Meir, P. & Brown, S. (2002). Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360(1797), ss. 1567-1591.
- Moreira, A., Krieger, G., Hajnsek, I., Hounam, D., Werner, M., Riegger, S. & Settelmeier, E. TanDEM-X: a TerraSAR-X add-on satellite for single-pass SAR interferometry. I: *Handlingar från Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS'04. Proceedings. 2004 IEEE International*2004: IEEE, ss. 1000-1003.
- Nilsson, M. (1996). Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, 56(1), ss. 1-7.
- Pan, Y., Birdsey, R.A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P.E., Kurz, W.A., Phillips, O.L., Shvidenko, A., Lewis, S.L. & Canadell, J.G. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), ss. 988-993.
- Perko, R., Raggam, H., Deutscher, J., Gutjahr, K. & Schardt, M. (2011). Forest assessment using high resolution SAR data in X-band. *Remote Sensing*, 3(4), s. 792.
- Persson, H. & Fransson, J.E. (2014a). Comparison between TanDEM-X and ALS based estimation of biomass and tree height in boreal forests. *Doctoral Thesis No. 2014:84, Faculty of Forest Sciences, Department of Forest Resource Management*, Estimation of forest parameters using 3D satellite data.
- Persson, H. & Fransson, J.E. (2014b). Forest variable estimation using radargrammetric processing of TerraSAR-X images in boreal forests. *Remote Sensing*, 6(3), ss. 2084-2107.

- Persson, H., Wallerman, J., Olsson, H. & Fransson, J.E. (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), ss. 251-262.
- Praks, J., Demirpolat, C., Antropov, O. & Hallikainen, M. (2013). On forest height retrieval from spaceborne X-band interferometric SAR images under variable seasonal conditions.
- Reutebuch, S.E., McGaughey, R.J., Andersen, H.-E. & Carson, W.W. (2003). Accuracy of a high-resolution lidar terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 29(5), ss. 527-535.
- Ripley, B.D. (1981). Spatial Statistics. *Wiley, Chichester*, s. Chapter 3.
- Santoro, M., Askne, J., Dammert, P.B., Fransson, J.E. & Smith, G. (1996). Retrieval of biomass in boreal forest from multi-temporal ERS-1/2 interferometry. *Image*, 21, s. 55.
- Sarabandi, K. (1997). Δk -radar equivalent of interferometric SAR's: a theoretical study for determination of vegetation height. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 35(5), ss. 1267-1276.
- Schubert, A., Jehle, M., Small, D. & Meier, E. Geometric validation of TerraSAR-X high-resolution products. I: *Handlingar från Proc. 3rd TerraSAR-X Sci. Team Meeting 2008*, ss. 25-26.
- SMHI *Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, meteorologiska observationer*. <http://opendata-download-metobs.smhi.se/explore/> [2016-02-09].
- Solberg, S., Weydahl, D.J. & Astrup, R. (2015). Temporal stability of X-band single-pass InSAR heights in a spruce forest: Effects of acquisition properties and season. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 53(3), ss. 1607-1614.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. (2013). Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change*.
- Suárez, J.C., Ontiveros, C., Smith, S. & Snape, S. (2005). Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers & Geosciences*, 31(2), ss. 253-262.
- Ulander, L.M. & Askne, J. (1995). Repeat-pass SAR interferometry over forested terrain. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 33(2), ss. 331-340.
- Vastaranta, M., Holopainen, M., Karjalainen, M., Kankare, V., Hyyppä, J. & Kaasalainen, S. (2014). TerraSAR-X stereo radargrammetry and airborne scanning LiDAR height metrics in imputation of forest aboveground biomass and stem volume. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 52(2), ss. 1197-1204.
- Way, J., Paris, J., Kasischke, E., Slaughter, C., Viereck, L., Christensen, N., Dobson, M.C., Ulaby, F., Richards, J. & Milne, A. (1990). The effect of changing environmental conditions on microwave signatures of forest ecosystems: preliminary results of the March 1988 Alaskan aircraft SAR experiment. *International Journal of Remote Sensing*, 11(7), ss. 1119-1144.
- Werninghaus, R. TerraSAR-X mission. I: *Handlingar från Remote Sensing 2004: International Society for Optics and Photonics*, ss. 9-16.

Appendix

Tabell 11. Koordinater för provytorna som använts i resultatet
Table 11. Coordinates for sampleplots used in the result

Koordinater (SWEREF 99TM) EPSG:3006				
ID	X	Y	Radie (m)	Försöksområde
Randomiserad provyta 39	416818	6482216	40	Remningstorp
Randomiserad provyta 42	420264	6481658	40	Remningstorp
Randomiserad provyta 45	421395	6479899	40	Remningstorp
Provyta 180	420366	6481583	40	Remningstorp
Provyta 433	422028	6479970	40	Remningstorp
Provyta 447	420300	6480148	40	Remningstorp
Randomiserad provyta 49	735212	7131322	40	Krycklan
Randomiserad provyta 93	732849	7133070	40	Krycklan