

Utveckling av ny barkfunktion och utvärdering av mätprecision för björk i södra och mellersta Sverige

Development of a new bark function and evaluation of measurement precision for birch in southern and central Sweden



FOTO: LINE DJUPSTRÖM, SKOGFORSK

Summary

The aims of the study were to develop a bark function for birch adapted for use in the harvester, and to assess the harvester's measurement precision in length and diameter measurement when birch is felled. The results should help us assess whether harvester measurement can be permitted as a basis for payment when stands contain many deciduous trees.

In the study, two function expressions were adapted: i) a logistical function where the expression was taken from an earlier study (Petrauskas et al. 2014), and ii) a logarithmic function, developed in our study. The precision of the harvesters' dimension measurement was quantified on the basis of deviations between the harvesters' measurement and the manually checked measurements.

The results from the study can be summarised as follows:

- For the data as a whole, the two bark functions had a similar dispersion, and both were free of systematic errors.
- The random errors of the functions were 5.5 and 3.5 mm respectively for all measurements, and for the measurements of the top ends of the logs. The corresponding dispersion of the bark function for pine is approximately 1 mm lower. We interpret the higher dispersion for birch as reflecting that the bark measurements, as well as the application in the harvesters, applied to both silver birch and downy birch.
- Based on a detailed analysis, we recommend that our logarithmic function is used in harvesters to calculate the bark thickness of birch. In general, no systematic errors could be found in our data, and the systematic errors that did occur per individual breast height diameter class were negligible. The function therefore has potential to accurately determine volume under bark in harvester measurement.
- During the test period, the two thinning harvesters also satisfied the requirements of the quality assurance system for measurement precision for length and diameter of birch. For length measurements, 80 and 89 percent of the measurements were within ± 2 cm of the check measurements. For diameter measurements, 80 and 83 percent were within ± 4 mm of the check measurements, comparable figures to the measurement results for pine and spruce.

The evaluation shows no measurement-related barriers to basing payment to the forest owner on harvester-measured volumes of birch in thinning forest, providing the harvester is quality assured and the measurement system calibrated when necessary.

Förord

Denna rapport är utarbetad inom ramen för projektet ”Stampris i lövrika bestånd – utveckling av ny barkfunktion och utvärdering av mätprecision”. Projektet har finansierats av medel från Rundvirkesstiftelsen, Södras Stiftelse för Forskning, Utveckling och Utbildning samt av medel från Skogforsks ramprogram.

I studien har data över björkens barktjocklek samlats i södra Sverige av skördarrevisorer från (dåvarande) VMF Syd och VMF Qbera. Nedanstående personer utförde datainsamlingen.

Namn	VMF
Andreas Arvidsson	Syd
Tobias Gustafsson	Syd
Jonas Hemmingsson	Syd
Anna-Lena Hugosson	Syd
Jonas Olsson	Syd
Roland Carlson	Qbera
Krister Mellgren	Qbera
Jonny Karlsson	Qbera
Jonny Wigert	Qbera
Maria Östlund	Qbera

Insamling av data för utvärdering av skördarnas mätprecision vid dimensionsmätning av björk gjordes av skördarlagen Böle skogsentreprenad och Össmar skogsentreprenad. Båda skördarlagen körde under perioden på uppdrag av Södra skogsägarna och var kvalitetssäkrade för mätning av längd och diameter för trädslagen tall, gran och björk.

Planering av studien samt analys och avrapportering har gjorts av en arbetsgrupp bestående av Monika Strömgren, Biometria, samt av John Arlinger, Liviu Ene, Björn Hannrup och Maria Nordström, samtliga Skogforsk.

Denna rapport tillägnas framlidne statistikern Lennart Norell, verksam vid SLU och Uppsala Universitet.

Ett varmt TACK till alla som bidragit till studiens genomförande.

Björn Hannrup (projektledare)

Innehåll

Summary.....	2
Förord	3
Sammanfattning	5
Bakgrund	7
Mål och hypoteser	8
Material och metoder	9
Mätningar av barktjocklek.....	9
Val av funktion.....	11
Delstudie 1. Anpassning av logistisk funktion.....	11
Delstudie 2. Anpassning av logaritmisk funktion	12
Residualanalys och använd programvara	15
Skördarens mätning av längd och diameter	15
Resultat och diskussion.....	17
Medelvärden och parameterskattningar.....	17
Jämförelse mellan funktioner	19
Effekter på volymbestämningen.....	21
Skördarnas mätning av längd och diameter	23
Referenser.....	24
Bilaga A. Logaritmisk funktion – fullständig modell	25
Bilaga B. Residualplottar för logistiska funktionen.....	26
Bilaga C. Residualplottar för logaritmiska funktionen.....	28
Bilaga D. Implementering av den nya logaritmiska barkfunktionen.....	30

Sammanfattning

Barkfunktioner används i skördare för att skatta diametern under bark utifrån mätningar på bark. För björk saknas barkfunktion anpassad för användning i skördare och som substitut används någon av funktionerna för tall eller gran, vilka i båda fall genererar en systematisk underskattning av barktjockleken och därmed överskattning av björkens vedvolym. Avsaknaden av barkfunktion för björk, tillsammans med avsaknaden av studier som belyser skördarnas mätprecision vid mätning av lövträd, utgör i dagsläget begränsande faktorer för en ökad användning av skördarnas mätning som grund för vederlaget vid virkesförsäljning.

Målen med studien var att utveckla en barkfunktion för björk anpassad för användning i skördare, samt att kvantifiera skördarnas mätprecision för längd- och diametermätning vid avverkning av detta trädslag. De samlade resultaten bör därmed utgöra ett relevant underlag för bedömning ifall metodiken med betalningsgrundande skördarmätning kan tillåtas på sikt även för lövrika objekt.

I studien genomförde skördarrevisorer från dåvarande virkesmätningsföreningarna Syd och Qbera mätningar av barktjocklek på totalt 221 träd från 46 avverkningsobjekt i Götaland och södra halvan av Svealand. Provträden var hämtade från gallrings- och slutavverkningsobjekt och som helhet täckte materialet in huvuddelen av den variation i ålder och trädstorlek som förekommer vid avverkning inom det studerade området. Till utvärderingen av mätnoggrannheten för björk användes totalt 142 manuellt kontrollmätta björkstammar från två gallringsskördare som kvalitetssäkrats för björk. Huvuddelen av träden i materialet låg i diameterintervallet 5–20 cm i brösthöjd. Mätnoggrannheten för björk jämfördes med de två gallringsskördarnas kvalitetssäkrade mätning av tall och gran under samma period, vilken omfattade totalt 52 respektive 148 slumpade stammar.

I studien anpassades två funktionsuttryck till det insamlade materialet: i) en logistisk funktion där uttrycket hämtats från en tidigare studie (Petrauskas m. fl. 2014) och ii) en logaritmisk funktion, framtagen i vår studie. Mätprecisionen för skördarnas dimensionsmätning kvantifierades utifrån avvikelserna mellan skördarnas mätning och den manuella kontrollmätningen.

Resultaten från studien kan sammanfattas enligt följande:

- För materialet som helhet hade de två barkfunktionerna likartad spridning och de var båda fria från systematiska fel.
- Funktionernas tillfälliga fel uppgick till 5,5, och 3,5 mm för alla mätningar, respektive mätningarna för stockarnas toppändor. Motsvarande spridning för barkfunktionen för tall är cirka 1 mm lägre. Vi tolkar den högre spridningen för björk som en effekt av att barkmätningarna, liksom tillämpningen i skördare, omfattar både vårt- och glasbjörk.
- Baserat på en detaljerad analys rekommenderar vi att den framtagna logaritmiska funktionen används i skördare för att beräkna björkens barktjocklek. Den har i vårt material totalt sett inget systematiskt fel och de systematiska fel som förekommer per enskild brösthöjdsdiameterklass är försumbara. Funktionen har därmed förutsättningar för att kunna bidra till en korrekt bestämning av volymen under bark i skördare.
- De två gallringsskördarna uppfyllde under testperioden kvalitetssäkringssystemets krav på mätnoggrannhet för längd och diameter även för björk. Längdmätningen låg på 80 respektive 89 procent av mätningarna inom ± 2 cm från kontrollmätt och för diametermätningen var 80 respektive 83 procent inom ± 4 mm från kontrollmätt, vilket var jämförbart med mätresultaten för tall och gran. Utvärderingen indikerar sammantaget att det inte föreligger några mätningssmässiga hinder att basera betalning till skogsägaren på skördarmätta volymer av björk i gallringsskog, förutsatt att skördaren är kvalitetssäkrad och kalibrering av mätsystemet görs vid behov.

För att underlätta tillämpningen har den logaritmiska funktionen sammanfattats i ett separat avsnitt, se bilaga D.

Bakgrund

I Sverige skördas årligen cirka 90 miljoner m³sk virke (SVO 2019) och den helt dominerande andelen av denna volym avverkas med skördare. Vid upparbetningen mäts längd och diameter kontinuerligt längs stammarna och denna information utgör sedan grunden för optimeringen av stammarnas uppdelning i stockar. Mätningen av diameter sker på bark men eftersom det är virkesvolymen under bark som utgör det prisgrundande handelsmåttet sker en omräkning till diameter under bark i skördardatorn. Detta görs med hjälp av en funktion som beskriver barkens tjocklek. En precis längd och diametermätning tillsammans med en funktion som väl skattar barktjockleken är därför centrala komponenter för en effektiv aptering och för skogsbrukets förmåga att leverera produkter som motsvarar industrins beställningar. I de fall, där den av skördaren beräknade volymen används som grund för ersättning till skogsägaren, blir barkfunktionen viktig för att stammarnas volym ska kunna bestämmas på ett säkert sätt.

För tall och gran används barkfunktioner vilka är anpassade för användning i skördare (Hannrup 2004, Hannrup & Lundgren 2012). Som ingångsdata används information som kopplar till barkens variationsmönster och som är tillgänglig i skördarna, till exempel aktuell geografisk position, diameter och höjd i stammen. Funktionerna är kontinuerliga över landet och för tall kontinuerliga över barkslag, det vill säga samma funktion används för att beräkna barktjocklek för skorp bark, mellanbark och glansbark. För björk saknas barkfunktion anpassad för användning i skördare och som substitut används någon av funktionerna för tall eller gran, vilka i båda fall genererar en systematisk underskattning av björkens barktjocklek (Hannrup, B. opublicerat). För att undvika en systematisk underskattning och därmed överskattning av vedvolymen för björk är det därför angeläget att en barkfunktion för björk utvecklas.

Det finns få studier som belyser variationsmönstret för björkens barktjocklek. Data från Söderling (1992) indikerar att barktjockleken i brösthöjd vid samma stamstorlek ökar med trädets ålder och minskar med ökande latitud, höjd över havet och ståndortsindex. Den största variationen återfinns dock inom träd. Data från en nyligen publicerad litauisk studie (Petrauskas m. fl. 2014) samt data från ett mindre material från södra Sverige (Hannrup, opublicerat) indikerar en snabb minskning av barktjockleken de fem första metrarna av stammen följt av en utplaning mot ett asymptotiskt värde högre upp i stammen. Variationsmönstret liknar därmed det som förekommer för tall (Hannrup 2004).

Användning av skördarens mätning som grund för vederlaget vid virkesförsäljning (Möller & Sondell 2003) har från en låg nivå ökat mycket kraftigt under senare år (Jakob Edlund SDC 2017, Personlig kommunikation). Enligt de virkesmätningsbestämmelser som reglerar användningen av metoden kan skördarens mätning användas som grund för vederlag fullt ut i objekt där tall och gran utgör minst 90 procent av volymen (SDC 2015). För objekt där andelen andra trädslag överstiger 10 procent ska annan mätmetod användas för dessa trädslag vilket grundas på att skördarens mätprecision för andra trädslag bedömts vara otillräcklig samt att barkfunktioner saknas. Detta utgör en begränsning för ytterligare expansion av metoden framöver. Framförallt gäller detta gallringsskog där inslaget av björk vid tidpunkten för första gallring till exempel i Götaland i genomsnitt uppgår till drygt 20 procent av virkesförrådet (SLU 2017). Om det skulle vara tillåtet att använda betalningsgrundande skördarmätning fullt ut även för detta trädslag

skulle andelen objekt godkända för vederlagsgrundande skördarmätning kunna öka med 80 procent (Rosander 2016). En ny barkfunktion för björk, anpassad för användning i skördare, tillsammans med studier som belyser skördarens mätprecision vid mätning av lövträd är därför centrala komponenter för att potentiellt kunna använda skördarens mätning som grund för vederlag fullt ut också i lövrika objekt.

Mål och hypoteser

Målen med studien var:

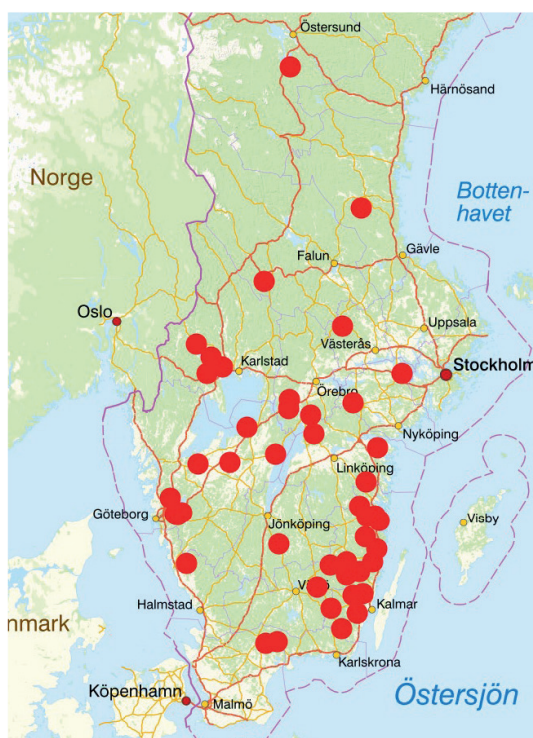
- Att utveckla en barkfunktion för björk anpassad för användning i skördare. Funktionen ska prediktera barktjockleken kontinuerligt längs stammarna och vara giltig för södra och mellersta Sverige.
- Att kvantifiera skördarnas mätprecision för längd- och diametermätning vid avverkning av björk.

På kort sikt förväntar vi att studien ska generera en barkfunktion som predikterar björkens barktjocklek utan systematiska fel samt en skattning av skördarnas mätprecision vid avverkning av björk. De samlade resultaten bör därmed utgöra ett relevant underlag för att bedöma om metodiken med betalningsgrundande skördarmätning kan tillåtas på sikt även för lövrika objekt. Den nya barkfunktionen för björk bör också kunna bidra till förbättrad tillredning av björktimmer och därmed öka värdet.

Material och metoder

MÄTNINGAR AV BARKTJOCKLEK

I studien gjordes mätningar på björkar i södra och mellersta Sverige. Materialet omfattade i huvudsak data från Götaland och södra halvan av Svealand (Figur 1). Norr därom fanns ett fåtal observationer upp till trakten av Östersund. Observationerna i Götaland hade en tyngdpunktsmässig förskjutning mot de östra delarna. Totalt ingick mätningar på 221 träd från 46 lokaler. I genomsnitt mättes 5 träd per lokal med en variation mellan 2 till 14 träd per lokal.



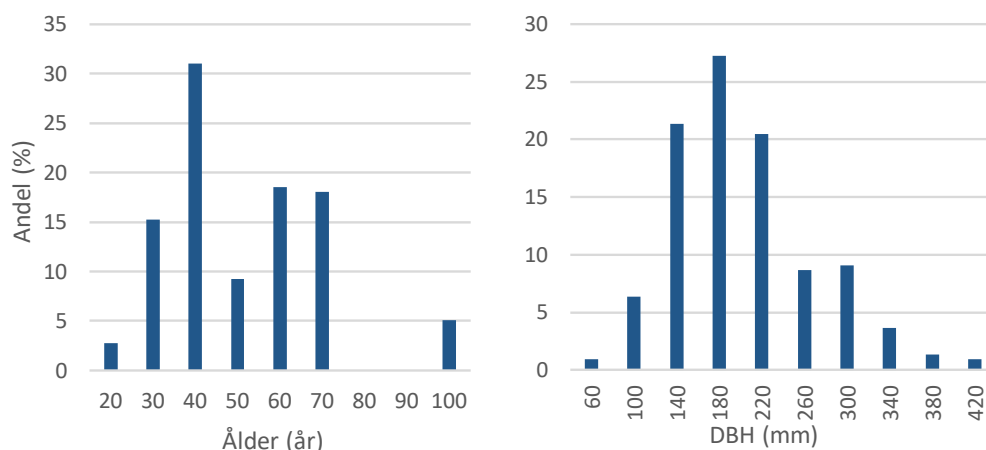
Figur 1. Karta över provtagningslokalerna i studien.

Totalåldern för de mätta björkarna var i genomsnitt 49 år med en variation mellan 20 och 100 år. Brösthöjdsdiametern var i genomsnitt 20 cm med en spännvidd från 6 till 42 cm (Tabell 1). Provträden var hämtade från gallrings- och slutavverkningsskog vilket framgår av deras ålders- och diameterfördelningar (Figur 2). Antalsmässigt övervägde gallringsträd men som helhet täcker materialet in huvuddelen av den variation i ålder och trädstorlek som förekommer vid avverkning inom det studerade området.

Tabell 1. Medelvärden och spridningsmått för provtagningslokalernas geografiska position samt för provträdens ålder och brösthöjdsdiameter.

Variabel	N	Medel	Std. avv.	Min.	Max.
Latitud (°N)	46	58,2	1,3	56,3	62,8
Longitud (°O)	46	14,8	1,5	12,1	17,1
Ålder (år)	216	49	18	20	100
Brösthöjdsdiameter (mm)	220	201	68	61	423

Samtliga mätningar i studien utfördes av sködarrevisorer från dåvarande virkesmättningsföreningarna Syd och Qbera. Mätningarna gjordes i samband med revisorernas ordinarie fältkontroller inom ramen för kvalitetssäkringssystemet av skördarnas längd- och diametermätning. Mätningarna utfördes i gallrings- och slutavverkningsobjekt där det fanns tillgång till björk.



Figur 2. Provtädens ålders- och diameterfördelning.

För träden som ingick i studien mättes barktjocklek och korsklavad diameter på ett antal punkter längs stammarna. På rotstocken skedde mätningarna 50 cm och 120 cm från rotskåret samt i toppändan. På de övriga stockarna gjordes motsvarande mätningar enbart i rot- och toppändan. Vid varje mätpunkt registrerades avståndet från rotskåret det vill säga mätpunktens höjd i stammen.

Barkmätningarna gjordes med konventionell barkmätare (Figur 3) och två mått togs per höjdnivå från motstående sidor av stammen. Utifrån de två måtten beräknades den dubbla barktjockleken. Det är den dubbla barktjockleken som modelleras i den barkfunktion som utvecklats i vår studie, vilket också är fallet för de övriga barkfunktioner som används i skogsbruket (Zacco 1974, Hannrup 2004). För att underlätta läsningen används i den löpande texten dock framgent "barktjocklek" synonymt med "dubbel barktjocklek".



Figur 3. Barktjockleken mättes med barkmätare.

För varje lokal registrerades den geografiska positionen och höjden över havet med hjälp av GNSS-utrustning. Därutöver registrerades trädålder genom räkning av antalet årsringar i rotskåret, alternativt genom uppskattning i de fall årsringarna var svåra att urskilja.

VAL AV FUNKTION

Två alternativa barkfunktioner togs fram i två delstudier. I den första delstudien användes ett tidigare framtaget logistiskt funktionsuttryck (Petrauskas m. fl. 2014) och uttrycket anpassades till studiens datamaterial. I den andra delstudien gjordes en fri prövning av lämpligheten hos olika funktioner. Detta resulterade i att ett logaritmiskt funktionsuttryck valdes. Nedan beskrivs arbetsgången inom de två delstudierna.

Delstudie 1. Anpassning av logistisk funktion

I en studie från Litauen (Petrauskas m. fl. 2014) gjordes mätningar av barktjocklek för björk och för trädslagen ask, asp, ek, gran, gråal, klibbal och tall. Mätningarna gjordes på olika höjdnivåer för att möjliggöra modellering av barktjockleken längs stammarna. Den ansats som användes i studien var att försöka finna ett flexibelt funktionsuttryck som kunde användas för alla trädslagen och för ett sådant uttryck ta fram separata parameteruppsättningar anpassade för respektive träslag. Det uttryck som valdes i studien var det logistiska funktionsuttrycket

$$[1] \quad db = a + bD_{SZ}$$

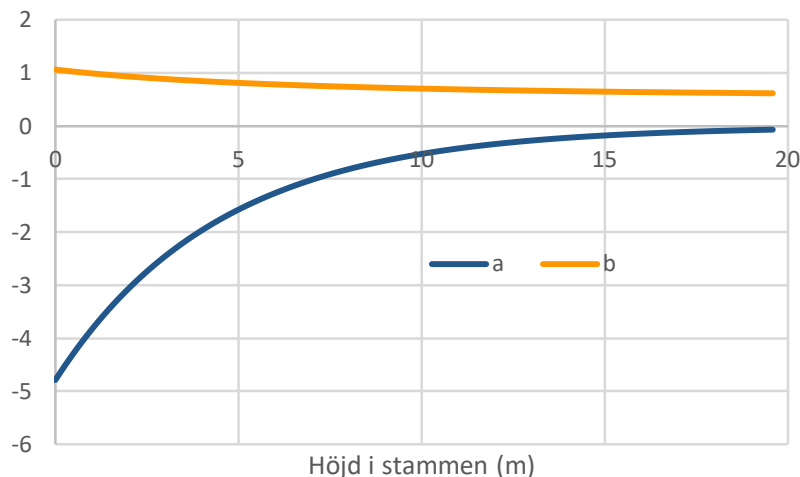
där db är den dubbla barktjockleken i mm, D_{SZ} är diametern på bark i cm och a och b är parametrar. De två parametrarna bestäms av uttrycken

$$[2] \quad a = \frac{a_3}{1 + (\frac{a_3}{a_1} - 1)e^{(-a_2 H)}}$$

$$[3] \quad b = \frac{b_3}{1 + (\frac{b_3}{b_1} - 1)e^{(-b_2 H)}}$$

där H är höjden i stammen (m) och parametrarna $a_1 - a_3$ och $b_1 - b_3$ skattas från data.

I funktionen modelleras barktjockleken utifrån de oberoende variablerna höjd i stammen och aktuell diameter på bark. Funktionens ingående parametrar uttrycker var för sig inte någon logisk förklaring av variationen i barkens tjocklek utan det är parametrarnas samlade effekt som kan ge funktionen en form som förklarar denna variation. I figur 4 illustreras hur värdena på a och b varierar längs stammen för en grövre björkstam med brösthöjdsdiameter på cirka 30 cm för värden på $a_1 - a_3$ och $b_1 - b_3$ skattade av Petrauskas m. fl. (2014).



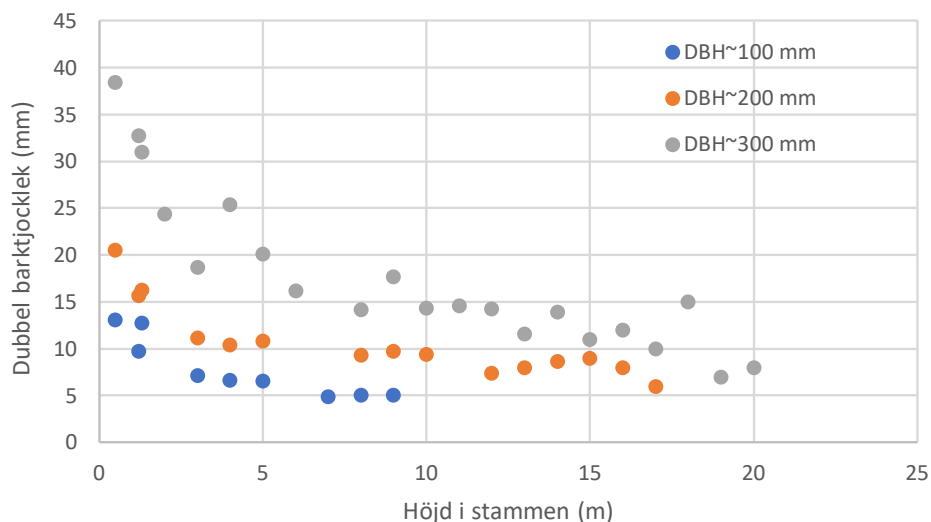
Figur 4. Illustration av hur parametrarna a och b i den logistiska funktionen utvecklad av Petruskas m. fl. (2014) varierar med höjden i stammen för en grövre björkstam (dbh~30 cm).

I studien skattades parametrarna $a_1 - a_3$ och $b_1 - b_3$ genom att anpassa den logistiska funktionen (ekvation 1) till datamaterialet. Anpassning skedde med hjälp av iterativ lösningsmetodik där Levenberg-Marquard algoritmen, implementerad i mjukvaran minpack.lm, användes (Timur m. fl. 2016). Startvärden för den iterativa lösningen generades genom att använda en metaheuristisk algoritm, implementerad i mjukvaran GenSA (Xiang m. fl. 2013).

Delstudie 2. Anpassning av logaritmisk funktion

I delstudien plottades inledningsvis barktjockleken trädvis mot höjd i stammen och mot aktuell diameter. Båda dessa variabler uppvisar samband med barktjockleken. Sambandet med höjd i stammen är dock genomgående starkare och denna variabel valdes därför som den primära oberoende variabeln i det fortsatta modelleringsarbetet.

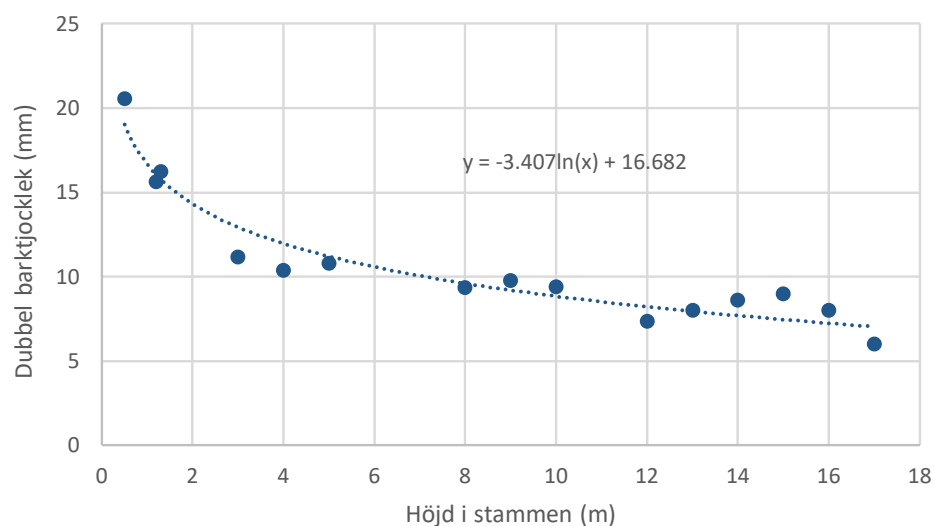
I figur 5 illustreras barktjockleken mot höjden i stammen för träd med brösthöjdsdiametrar inom intervallet 90–110 mm, 190–210 mm och 290–310 mm. Värdena som redovisas är genomsnittlig barktjocklek per höjdnivå för stammarna inom de tre storleksklasserna.



Figur 5. Plot av genomsnittlig barktjocklek mot höjd i stammen för stammar med brösthöjdsdiameter inom intervallen 90–100 mm, 190–210 mm och 290–310 mm.

För samtliga tre storleksklasser uppvisade barktjockleken en minskning med ökande höjd i stammen. Minskningen tenderade för samtliga tre klasser att vara icke-linjär i stampartiet närmast rotskåret för att sedan bli svagt monotoniskt avtagande för den återstående delen av stammen. Det fanns också en tendens att den icke-linjära avsmalningen pågick högre upp i stammen och var kraftigare för de grövre stammarna. Vi tolkar detta mönster som en återspeglning av björkens skorpbarksbildning, där skorpbarken successivt växer till sig i tjocklek och utsträckning upp i stammen när träden åldras och ökar i diameter.

Efter prövning konstaterades att det funktionsuttryck som bäst förklarade variationen i barktjocklek med ökande höjd i stammen var uttrycket för en avtagande logaritmisk funktion, se exempel för diameterklassen 190–210 mm i figur 6. Detta gällde samtliga tre storleksklasser och det fortsatta modelleringsarbetet inriktades mot att finna en generell funktion med en logaritmisk form.



Figur 6. Anpassning av en avtagande logaritmisk funktion för stammar med brösthöjdsdiametrar inom intervallet 190–210 mm.

En logaritmisk funktion styrs av två parametrar: interceptet respektive koefficienten för logaritmeringen av den oberoende variabeln (Figur 6). För sambandet mellan höjd i stammen och barktjocklek beskriver interceptet barktjockleken då det logaritmerade värdet för höjden i stammen är noll, det vill säga vid höjden 1 meter (alternativt 1 cm då höjden anges i cm). Värdet på koefficienten för den logaritmerade delen styr effekten av den icke-linjära delen, det vill säga logaritmeringen av den oberoende variabeln. För sambandet mellan höjd i stammen och barktjocklek styr koefficienten hastigheten av den icke-linjära minskningen av barktjockleken samt utsträckningen av minskningen, det vill säga vid vilken höjd minskningen övergår från att vara icke-linjär till att bli monotoniskt minskande.

Det fortsatta modelleringsarbetet genomfördes i två steg. I ett första steg anpassades trädvis den icke-linjära modellen

$$[4] \quad db = \alpha + \beta \ln(h) + \varepsilon$$

där db är den dubbla barktjockleken, h är den oberoende variabeln höjd i stammen (cm), ε det slumpmässiga felet och α och β är parametrar som ska skattas.

I ett andra steg användes plottar och multipel regressionsanalys för att studera sambandet mellan de trädvisa skattningarna av parametrarna α och β och de träd- och positionsvariabler som fanns tillgängliga, det vill säga brösthöjdsdiameter, ålder, latitud och longitud. De modeller som slutligen valdes var följande:

$$[5] \quad \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 dbh + \alpha_2 dbh^2 + \varepsilon$$

$$[6] \quad \beta = \beta_0 + \beta_1 dbh + \varepsilon$$

där α_0 och β_0 är intercept och α_1 , α_2 och β_1 är regressionskoefficienter. Brösthöjdsdiametern (dbh) angiven i mm hade en signifikant påverkan ($p < 0.0001$) på båda parametrarna. Vi valde att modellera effekten av brösthöjdsdiameter på parametern α som en icke-linjär effekt. I en första ansats prövades även genomgående linjära samband mellan brösthöjdsdiameter och parametrar. Denna ansats tenderade dock att generera systematiska underskattningar av barktjockleken för de klenaste stammarna i materialet, vilket inte var fallet då det icke-linjära sambandet för parametern α användes. Vi tolkar detta som att det icke-linjära sambandet bättre efterliknar björkens skorparksbildning, vilken tenderar att med accelererande hastighet bidra till en ökande barktjocklek först då brösthöjdsdiametern överstiger cirka 12 cm.

Även ålder hade en signifikant påverkan på båda parametrarna men eftersom uppgifter om ålder inte finns tillgängligt vid avverkning med skördare inkluderades inte denna variabel i den slutliga modellen. Dock redovisas parameterskattningar för en modell där ålder inkluderats i bilaga A. Latitud och longitud hade inte någon signifikant påverkan på parametrarna.

Resultaten från regressionsanalysen inarbetades i ekvation [4] vilket gav följande modell

$$[7] \quad db = \alpha_0 + \alpha_1 dbh + \alpha_2 dbh^2 + (\beta_0 + \beta_1 dbh) \ln(h) + \varepsilon.$$

Denna modell anpassades till hela materialet.

RESIDUALANALYS OCH ANVÄND PROGRAMVARA

Residualerna från modellerna plottades mot modelltermerna samt mot latitud, longitud och ålder för att åskådliggöra eventuella systematiska avvikelser.

Medelfelet eller spridningen till funktionerna, Root Mean Square Error (*RMSE*), beräknades som

$$[8] \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum(obs-pred)^2}{n}}$$

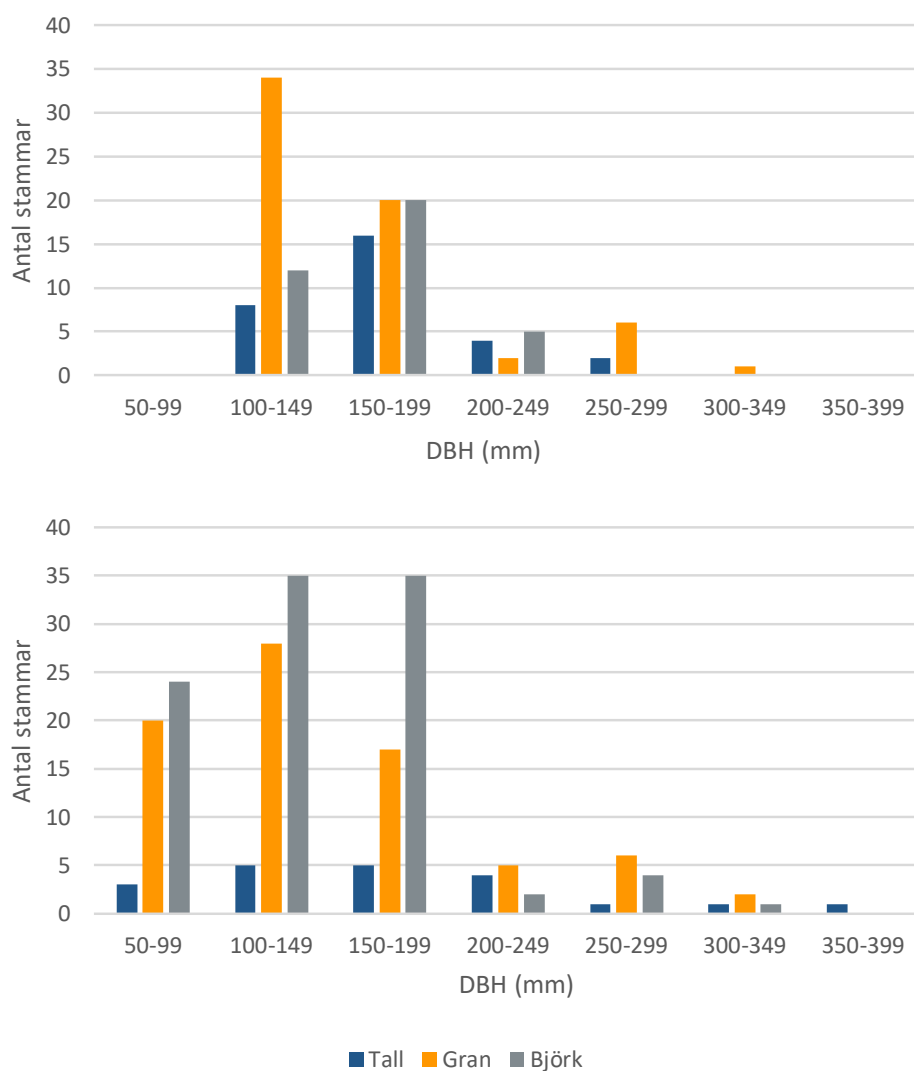
där *obs* och *pred* är de observerade och predikterade värdena på barktjockleken och *n* antalet observationer. Den genomsnittliga systematiska avvikelsen (*bias*) beräknades som

$$[9] \quad bias = \frac{\sum(obs-pred)}{n}.$$

Vid framtagningen av den logistiska funktionen användes programvaran R genomgående. Vid utvecklingen av den logaritmiska funktionen gjordes alla statistiska analyser med programvaran SAS, version 9.4. Den trädvisa modellenpassningen och modellenpassningen för hela materialet utfördes med Proc Nlin. Den multipla regressionsanalysen utfördes med Proc Reg och Proc Nlin.

SKÖRDARENS MÄTNING AV LÄNGD OCH DIAMETER

Utvärderingen av mätprecisionen för björk hos skördare baserades på totalt 142 manuellt kontrollmätta björkstammar som samlades in av två gallringsskördare under perioden september 2018–april 2019. De två skördarna var under perioden kvalitetssäkrade av Biometria och kontrollmätningen genomfördes enligt rutin beskriven i Skogforsks handledning "Håll måttet" (Skogforsk 2015). Avsteg från rutinen gjordes dock när det gällde urvalet av stammar, då förarna själva valde ut stammar för kontrollmätning istället för att stammarna slumpades ut. Detta gjordes för att säkerställa ett tillräckligt stort material. Huvuddelen av björkstammarna låg i diameterintervallet 5–20 cm i brösthöjd (Figur 7). Mätresultatet för björk jämfördes med de två gallringsskördarnas kvalitetssäkrade mätning av slumpade tall- och granstammar under samma period.



Figur 7. De manuellt kontrollmätta stammarnas diameter i bröst höjd för skördare A (överst.) och B (underst.).

Mätresultatet för skördarna bestämdes genom att följande nyckeltal beräknades med hjälp av Skogforsks programvara ktrAnalys:

- Andel av skördarens längdmätningar (M1) inom ± 2 cm från manuellt kontrollmätt (M2) (procent)
- Genomsnittlig avvikelse (M1-M2) (cm)
- Standardavvikelse (M1-M2) längd (cm)
- Andel av skördarens diametermätningar (M1) inom ± 4 mm från manuellt kontrollmätt (M2) (procent)
- Genomsnittlig avvikelse (M1-M2) (mm)
- Standardavvikelse (M1-M2) diameter (mm)

Resultat och diskussion

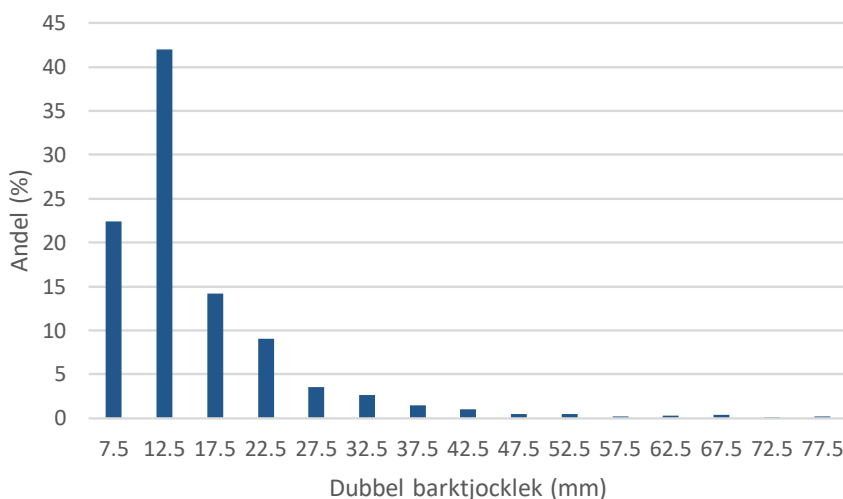
MEDELVÄRDEN OCH PARAMETERSKATTNINGAR

Medelvärden för den dubbla barktjockleken redovisas i tabell 2. Tabellen visar också medelvärden för höjd i stammen och aktuell diameter, vilka tillsammans med brösthöjdsdiameter var de primära oberoende variablerna i funktionerna som användes i studien.

Tabell 2. Antal observationer, aritmetiskt medelvärde, standardavvikelsen till medelvärdet samt min- och maxvärde för den dubbla barktjockleken (db), höjden i stammen (h) och diametern på bark (D).

Variabel	N	Enhet	Medel	Std. avv.	Min.	Max.
db	1364	mm	14,9	9,7	2	76
h	1364	m	5,8	4,8	0,5	23,4
d	1364	cm	17,1	6,8	3,5	45,7

Fördelningen av mätvärden för den dubbla barktjockleken redovisas i figur 8. Drygt 65 procent av mätvärdena återfanns för barktjocklekar < 15 mm.



Figur 8. Fördelningen av mätvärden för den dubbla barktjockleken.

I studien användes ekvationerna 1 och 7 för att beskriva björkbarkens tjocklek längs stammen för den logistiska, respektive logaritmiska, funktionen.

$$[1] \quad db = \frac{a_3}{1 + \left(\frac{a_3}{a_1} - 1\right)e^{(-a_2 H)}} + \left(\frac{b_3}{1 + \left(\frac{b_3}{b_1} - 1\right)e^{(-b_2 H)}}\right) D + \varepsilon$$

$$[7] \quad db = \alpha_0 + \alpha_1 dbh + \alpha_2 dbh^2 + (\beta_0 + \beta_1 dbh) \ln(h) + \varepsilon.$$

Parameterskattningarna till funktionerna samt tillhörande approximativa 95-procentiga konfidensintervall redovisas i tabell 3 och 4. Konfidensintervallen visar att samtliga modellparametrar var signifikant skilda från noll. Modellernas residualer plottades mot

höjd i stammen, diameter på bark, brösthöjdsdiameter, latitud, longitud och ålder (Bilaga B och C). Inga systematiska avvikelser noterades. Undantaget utgjordes av den logistiska modellen där residualplotten för brösthöjdsdiameter indikerade en systematisk underskattning av barktjockleken för stammar med diameter i brösthöjd lägre än cirka 12 cm.

Tabell 3. Parameterskattningar samt tillhörande approximativa 95-procentiga konfidensintervall för den logistiska funktionen (ekvation 1).

Parameter	Skattning	95 % konfidensintervall	
		Nedre gräns	Övre gräns
a_1	6,8374	-8,736	-4,939
a_2	- 0,4224	-0,792	-0,053
a_3	-8,0622	-12,999	-3,125
b_1	1,54554	1,410	1,681
b_2	0,31314	0,144	0,482
b_3	0,84401	0,764	0,925

Tabell 4. Parameterskattningar samt tillhörande approximativa 95-procentiga konfidensintervall för den logaritmiska funktionen (ekvation 7).

Parameter	Skattning	95 % konfidensintervall	
		Nedre gräns	Övre gräns
a_0	- 9,4175	-14,6408	-4,1942
a_1	0,207	0,1771	0,2369
a_2	0,000153	0,000103	0,000202
β_0	2,2748	1,4088	3,1408
β_1	-0,0322	-0,0361	-0,0284

JÄMFÖRELSE MELLAN FUNKTIONER

I tabell 5 redovisas systematiska (bias) och tillfälliga fel (RMSE) för den logistiska och den logaritmiska funktionen med parameterskattningar från vår studie samt för den logistiska funktionen med parametrar skattade i studien av Petrauskas m. fl. (2014). De systematiska och tillfälliga felen redovisas dels för hela materialet, dels för stampartiet ovan tre meter, det vill säga då det nedersta stampartiet med skorp bark och stor variation i barktjocklek, har exkluderats.

Tabell 5. Antal observationer, indata samt systematisk (bias) och tillfällig avvikelse (RMSE) för avvikelserna mellan mätt och beräknad dubbel barktjocklek med funktionerna utvecklade i studien samt med logistisk funktion där parameterskattningarna hämtats från studie av Petrauskas m. fl. (2014).

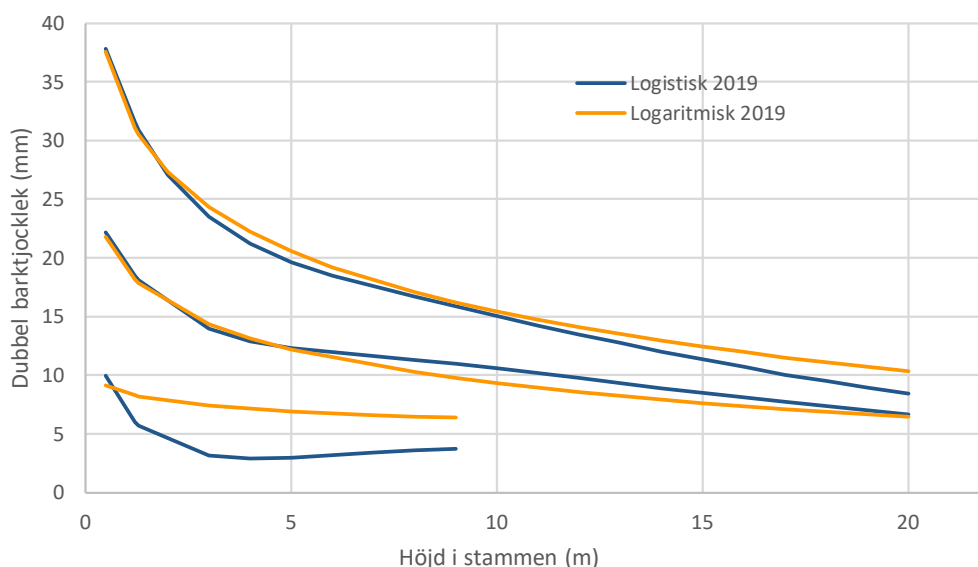
Indata	Funktion	n	bias (mm)	RMSE (mm)
Samtliga mätningar	Logistisk 2019	1364	0,09	5,55
Mätningar ovan 3 m	Logistisk 2019	901	0,13	3,57
Samtliga mätningar	Logaritmisk 2019	1364	0,00	5,54
Mätningar ovan 3 m	Logaritmisk 2019	901	-0,10	3,54
Samtliga mätningar	Logistisk Petrauskas m. fl. 2014	1364	2,19	5,95
Mätningar ovan 3 m	Logistisk Petrauskas m. fl. 2014	901	1,39	3,74

Baserat på samtliga mätningar uppträdde den logistiska och den logaritmiska funktionen från studien på likartat sätt: de hade ingen systematisk avvikelse och spridningen var närmast identisk (~5,5 mm). För den logistiska funktionen med parametrar skattade i den litauiska studien (Petrauskas m. fl. 2014) var spridningen något högre (~6,0 mm) och med ett positivt bias på 2,2 mm, det vill säga en systematisk underskattning av barktjockleken. Data från de två studierna ger alltså visst stöd för att barktjockleken från litauisk björk är något tunnare än björkbark från träd som vuxit i södra Sverige, några breddgrader längre norrut.

För funktionernas systematiska avvikelser för mätningar ovan 3 m noterades samma bild som avvikelserna för alla mätningar: en positiv bias för den logaritmiska funktionen med parametrar skattade från den litauiska studien medan de systematiska avvikelserna var nära noll för funktionerna från vår studie (Tabell 5). Samtliga funktioners spridning minskade markant (cirka 2 mm), då mätdata från de nedersta tre metrarna exkluderades. Vi tolkar denna kraftiga påverkan på funktionernas spridning av det nedre stampartiet som en effekt av en stor variation mellan träd när det gäller hur skorpbarken utbildas.

Bark från vårtbjörk och glasbjörk skiljer sig åt framförallt när det gäller bildandet av skorp bark. Vid barkmätningen i vår studie gjordes ingen åtskillnad mellan trädslagen, vilket heller inte görs vid praktisk avverkning. Den variation i barktjocklek som existerar mellan trädslagen kommer därför att yttra sig i form av en ökning av barkfunktionernas tillfälliga fel. För barkfunktionerna för tall och gran är de tillfälliga felen 1–2 mm lägre än för björk. Vi tolkar de högre tillfälliga felen för björk jämfört med dessa trädslag huvudsakligen som en effekt av att barkfunktionen för björk omfattar bark från två trädslag.

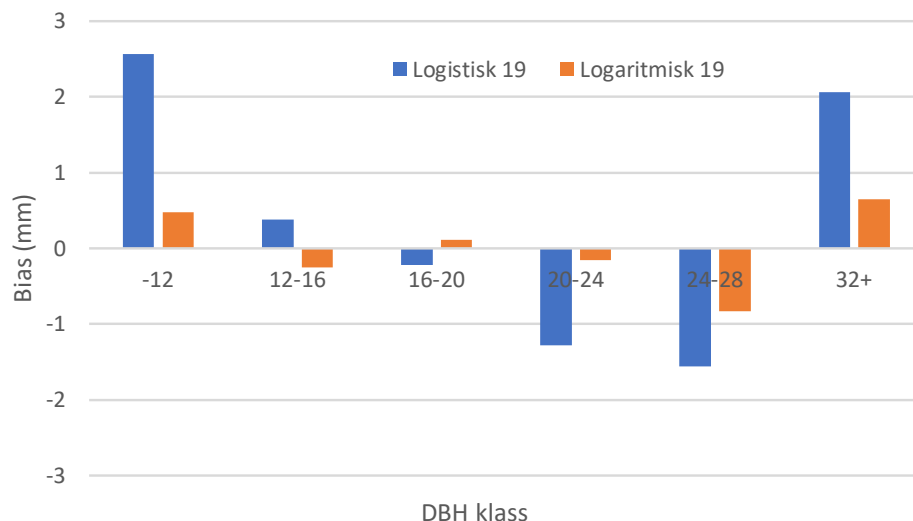
I figur 9 ges en mer ingående bild av hur den logistiska och logaritmiska funktionen från vår studie uppträdde, exemplifierat för stammar med brösthöjdsdiameter på 100, 200 och 300 mm. Funktionerna uppträdde mycket likartat för stammar med brösthöjdsdiameter på 200 och 300 mm. För de klenaste stammarna med brösthöjdsdiameter på 100 mm skilde sig funktionerna åt. Den logistiska funktionen gav väsentligt lägre skattningar av barktjockleken och tenderade att generera ett liknande mönster för barktjocklekens avsmalning längs stammen för dessa stammar som för de grövre, det vill säga en kraftig minskning för den nedersta stamdelen. Den logaritmiska funktionen var däremot monotoniskt avtagande för nästan hela stampartiet, det vill säga den beskriver i högre grad ett mönster där skorpbarken är väldigt svagt utbildad för de klenaste stammarna.



Figur 9. Dubbel barktjocklek plottad mot höjd i stammen för exempelstammar med brösthöjdsdiameter på 300 mm (överst), 200 mm (mitten) samt 100 mm (nederst). Barktjockleken är skattad med den logistiska (Logistisk 2019) och logaritmiska (Logaritmisk 2019) funktionen från studien.

Plottar av residualerna från modellerna mot trädens brösthöjdsdiameter indikerade att den logistiska funktionen systematiskt underskattade barktjockleken för stammar med brösthöjdsdiameter mindre än 120 mm, medan motsvarande tendens inte fanns för den logaritmiska funktionen (Bilaga B och C). En uppdelning av funktionernas genomsnittliga systematiska fel per brösthöjdsdiameterklass stödjer detta (Figur 10). Den logistiska funktionen underskattade systematiskt barkens tjocklek med 2,5 mm vilket motsvarar en överskattning av volymen under bark på cirka 5 procent. För praktisk användning i skördare är ett sådant systematiskt fel mycket olämpligt eftersom en stor andel av gallringsuttaget kan utgöras av sådana stammar vid förstagallring.

Baserat på denna analys rekommenderar vi att den framtagna logaritmiska funktionen används i skördare för att beräkna björkens barktjocklek. Den har totalt sett i vårt material inget systematiskt fel och de systematiska fel som förekommer per enskild brösthöjdsdiameterklass är försumbara. Funktionen har därmed förutsättningar för att kunna bidra till en korrekt bestämning av volymen under bark i skördare.

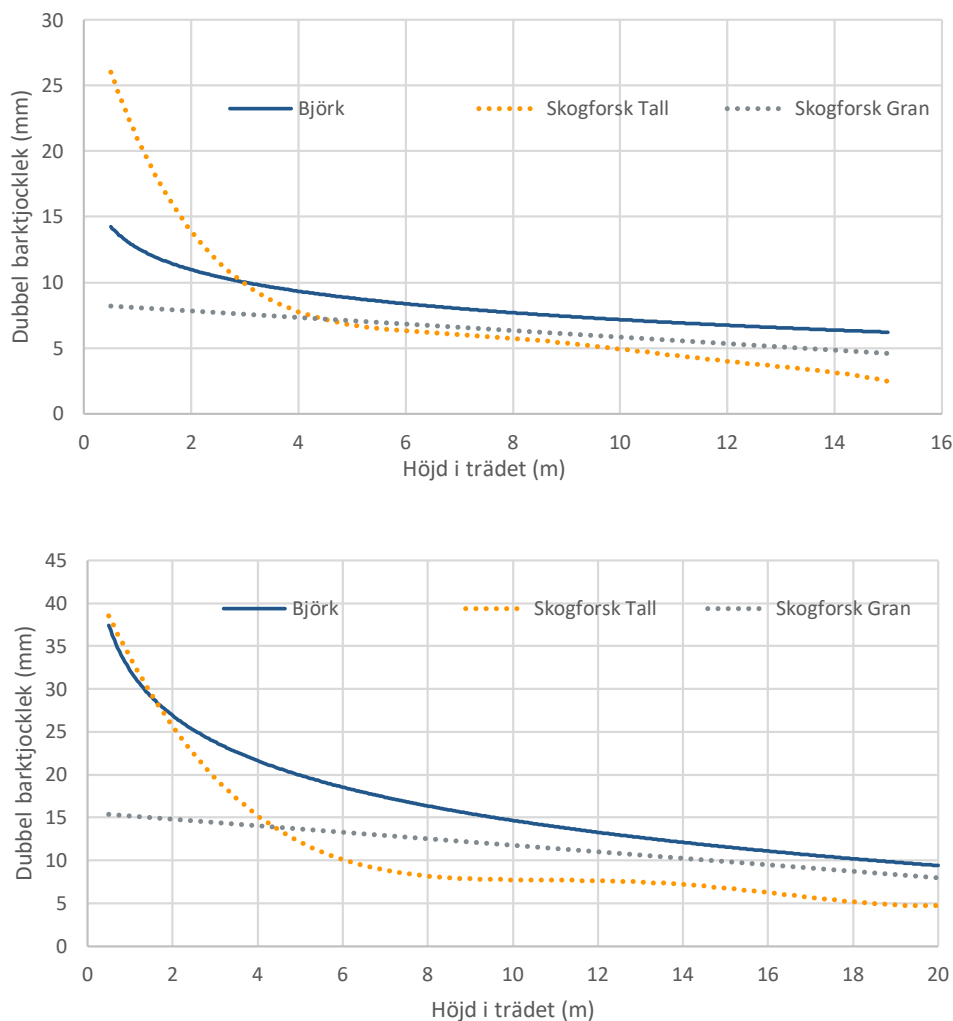


Figur 10. Systematiskt fel (bias) per brösthöjdsdiameterklass för den logistiska och den logaritmiska funktionen.

EFFEKTER PÅ VOLYMBESTÄMNINGEN

I skördarna används i dagsläget barkfunktionerna för tall eller gran som substitut för att beräkna diametern under bark för björkstammar. *Vad innebär detta för skördarnas volymbestämning av björk?*

I figur 11 redovisas barktjockleken för björk samt barktjockleken för tall och gran skattad med trädslagens barkfunktioner (Hannrup 2004) för stammar med brösthöjdsdiameter på 150 mm, respektive 300 mm.



Figur 11. Dubbel barktjocklek för björk (data från studien) och för tall och gran skattat med trädslagens barkfunktioner (Hannrup 2004) för stammar med brösthöjdsdiameter 150 mm (överst) respektive 300 mm (underst).

Då barkfunktionen för gran används som substitut för att beräkna diametern under bark för björk genereras en systematisk underskattning av barktjockleken och därmed en systematisk överskattning av diametern och volymen under bark (Figur 11). För tall, vars variation i barktjocklek längs stammen i högre grad överensstämmer med björkens, underskattas barktjockleken systematiskt för grövre stammar medan den samlade effekten är mindre för klenare stammar.

Den systematiska överskattningen av vedvolymen under bark uppgår till 3,8, respektive 6,9 procent då barkfunktionen för gran används som substitut för att beräkna diametern under bark för björk för stammar med brösthöjdsdiametern 150 mm, respektive 300 mm (Tabell 6). Motsvarande överskattning för tall uppgår till 0,3, respektive 5,6 procent. Sammanfattningsvis indikerar siffrorna att de funktioner för björkens barktjocklek som tagits fram i vår studie, och som är fria från systematiska fel, kan ge ett betydande bidrag till att förbättra bestämningen av volym under bark i skördare.

Tabell 6. Procentuell avvikelse för bestämningen av björkens vedvolym under bark då tall-ens och granens barkfunktioner (Hannrup 2004) används som substitut för beräkning av diameter under bark.

Brösthöjdsdiameter (mm)	Avvikelse (%)	
	Tall	Gran
150	+0,3	+3,8
300	+5,6	+6,9

SKÖRDARNAS MÄTNING AV LÄNGD OCH DIAMETER

De två gallringsskördarnas genomsnittliga mätresultat under testperioden redovisas för längdmätningen i tabell 7 och för diametermätningen i tabell 8. Skördarna uppvisade liknande resultat sinsemellan. Mätningen för björk uppfyllde under hela perioden kraven i kvalitetssäkringssystemet om minst 55 procent av diametermätningarna respektive minst 70 procent av längdmätningarna inom de tillåtna gränserna ± 4 mm respektive ± 2 cm. Längdmätningen var överlag något sämre för björk jämfört med tall och gran för båda skördarna. Diametermätningen var för skördare B väl i nivå med tall och gran, medan skördare A hade något sämre diametermätning för björk. För skördare A låg dock sannolikt en del av förklaringen till denna avvikelse i en större genomsnittlig avvikelse (-1,4 mm), vilken det finns potential att minska genom kalibrering av mätsystemet. Utvärderingen indikerar sammantaget att det inte föreligger några mätningssmässiga hinder att basera betalning till skogsägaren på skördarmätta volymer av björk i gallringsskog förutsatt att skördaren är kvalitetssäkrad och kalibrering av mätsystemet görs vid behov.

Tabell 7. Resultat för de två gallringsskördarnas längdmätning per trädslag under testperioden.

Trädslag	Skördare A			Skördare B		
	Andel längder inom ± 2 cm (%)	Medel- avvikelse (cm)	Standard- avvikelse (cm)	Andel längder inom ± 2 cm (%)	Medel- avvikelse (cm)	Standard- avvikelse (cm)
Tall	98,7	0,3	1,1	92,3	0,7	1,3
Gran	95,8	0,1	1,5	91,3	0,1	1,7
Björk	89,3	0,1	1,8	79,9	0	2,6

Tabell 8. Resultat för de två gallringsskördarnas diametermätning per trädslag under testperioden.

Trädslag	Skördare A			Skördare B		
	Andel diametrar inom ± 4 mm (%)	Medel- avvikelse (mm)	Standard- avvikelse (mm)	Andel diametrar inom ± 4 mm (%)	Medel- avvikelse (mm)	Standard- avvikelse (mm)
Tall	90,6	0	2,8	77,8	0,4	4,2
Gran	85,4	0	3,2	81,2	0,1	3,7
Björk	79,5	-1,4	3,2	83,4	0,5	3,7

Referenser

- Hannrup, B. 2004. Funktioner för skattning av barkens tjocklek hos tall och gran vid avverkning med skördare. Arbetsrapport 575. Skogforsk, Uppsala. 33 s.
- Hannrup, B. & Lundgren C. 2012. Utvärdering av Skogforsks nya barkfunktioner för tall och gran – en uppföljande studie. Arbetsrapport 762. Skogforsk, Uppsala. 14 s.
- Möller, J. J. & Sondell, J. 2003. Betalningsgrundande skördarmätning. Resultat nr 10. Skogforsk Uppsala. 4 s.
- Petrauskas, E., Rupšys, P., Memgudas R. & Bosas, G. 2014. Bark thickness variability models for prevailing tree species of Lithuania. https://www.researchgate.net/publication/334626442_Bark_thickness_models_for_main_tree_species_of_Lithuania. Tillgänglig 190916.
- Rosander, G. 2016. Skördarmätning i gallring. Examensarbete vid Skogsmästarprogrammet. Rapport 2016:27. 35 s.
- SDC 2015. Ersättningsgrundande virkesmätning med skördare. SDC:s instruktioner för virkesmätning. 14 s.
- Skogforsk 2015. Håll måttet!Handledning. 22 s.
- Skogsstyrelsen 2019. <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/>. Tillgänglig 190806.
- SLU 2019. https://www.slu.se/globalassets/ew/org/centrb/rt/dokument/skogsdata/skogsdata_2019_webb.pdf. Tillgänglig 190916.
- Söderberg, U. 1992. Funktioner för skogsindelning: höjd, formhöjd och barktjocklek för enskilda träd. SLU, Inst. för Skogstaxering. 87 s.
- Timur V. Elzhov, Katharine M. Mullen, Andrej-Nikolai Spiess & Bolker, B. 2016. minpack. lm: R Interface to the Levenberg-Marquardt Nonlinear Least-Squares Algorithm Found in MINPACK, Plus Support for Bounds. R package version 1.2-1. <https://CRAN.R-project.org/package=minpack.lm>. Tillgänglig 191004.
- Xiang, S. Gubian. B. Suomela & Hoeng J. 2013. Generalized Simulated Annealing for Efficient Global Optimization: the GenSA Package for R. The R Journal, Volume 5/1, June 2013. <https://journal.r-project.org/archive/2013/RJ-2013-002/index.html>. Tillgänglig 191004.
- Zacco, P. Barktjockleken hos sågtimmer. Rapport nr. 90. Inst. för Virkeslära, Skogshögskolan. 53 s.

Bilaga A.

Logaritmisk funktion – fullständig modell

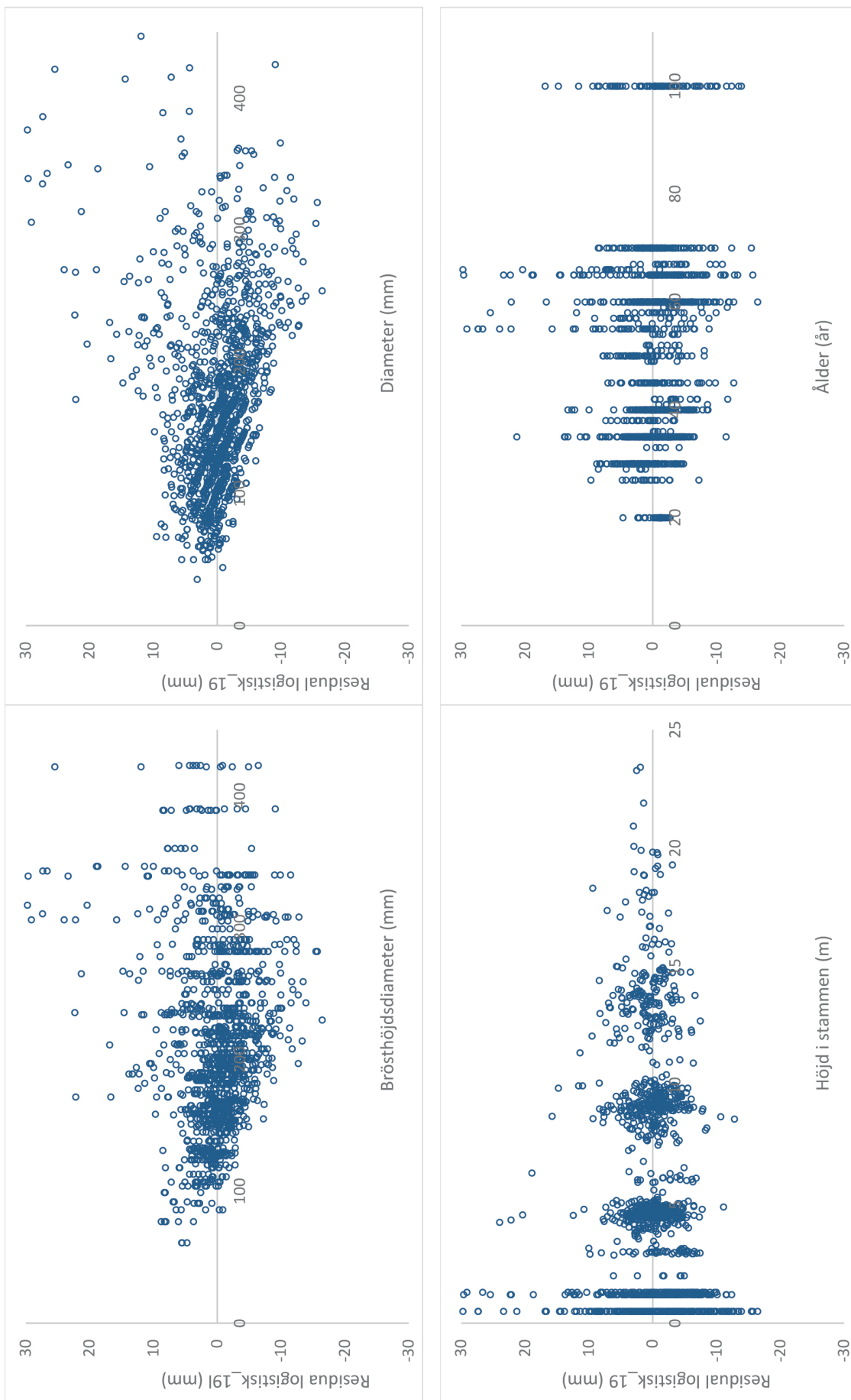
Trädens ålder hade en signifikant inverkan på barktjockleken. Dock inkluderades inte denna variabel i den slutliga versionen av den logaritmiska funktionen (ekvation 7) då detta inte påverkade spridningen från funktionen. I tabell A.1 redovisas parameterskattningar för en fullständig modell, där ålder inkluderats som oberoende variabel (ekvation 7a).

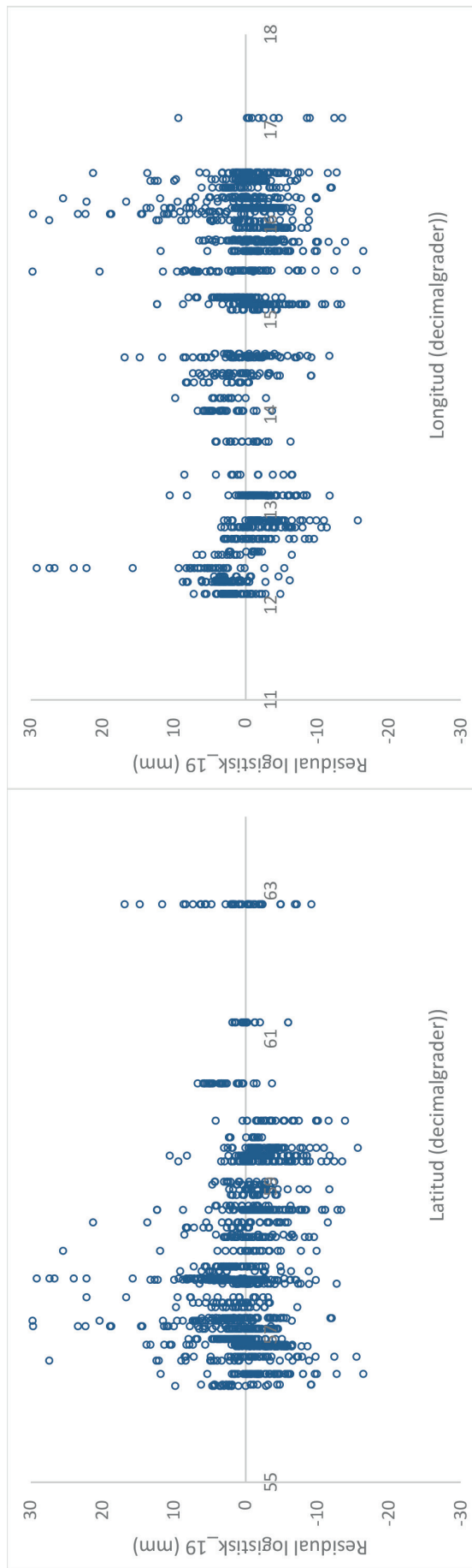
$$[7a] \quad db = \alpha_0 + \alpha_1 dbh + \alpha_2 \text{alder} + (\beta_0 + \beta_1 dbh + \beta_2 \text{alder}) \ln(h) + \varepsilon.$$

Tabell A.1. Approximativa 95-procentiga konfidensintervall för de skattade parametrarna för den logaritmiska funktion där ålder inkluderats som oberoende variabel (ekvation 7a) samt funktionens systematiska fel (*bias*) och spridning (*RMSE*).

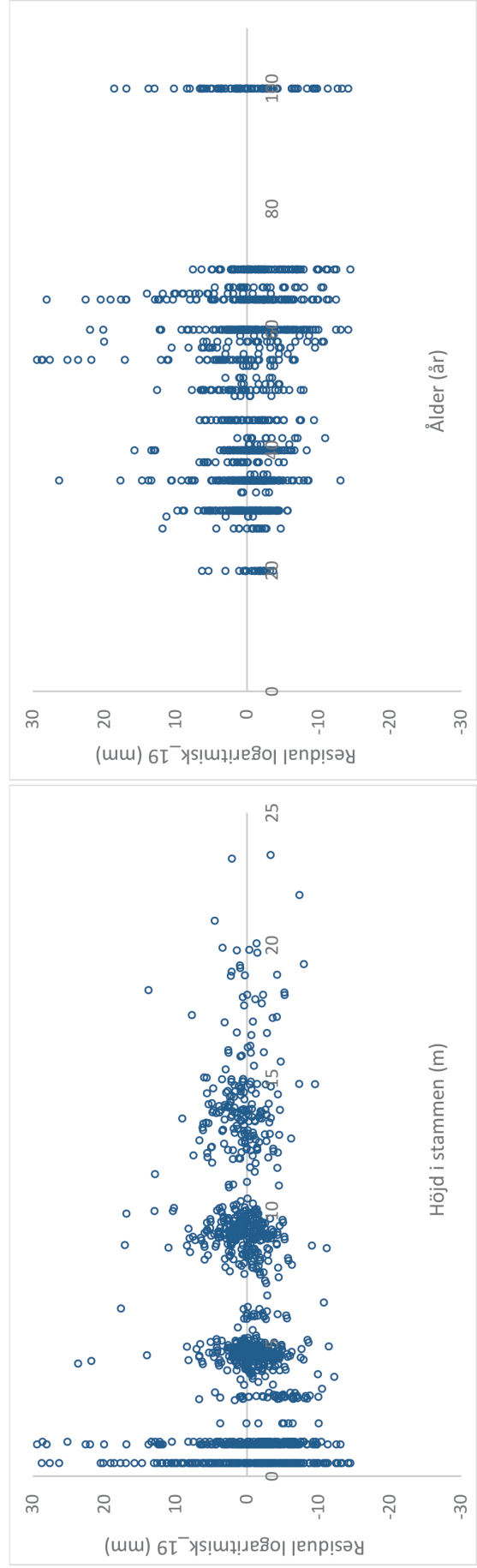
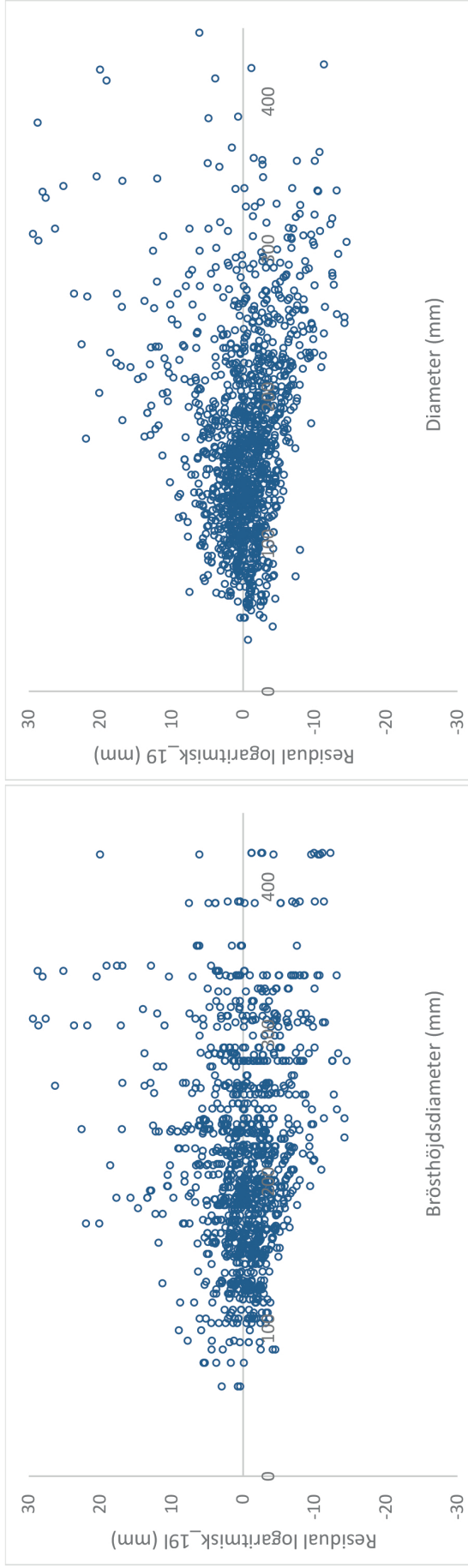
Parameter	Skattning	95 % konfidensintervall	
		Nedre gräns	Övre gräns
a_0	- 6,7591	- 12,2651	- 1,2531
a_1	0,3124	0,2859	0,3388
a_2	- 0,3337	- 0,4326	- 0,2348
b_0	0,5398	- 0,4019	1,4815
b_1	- 0,0375	- 0,0419	- 0,0331
b_2	0,0543	0,0379	0,0708
bias (mm)	0,00		
RMSE (mm)	5,54		

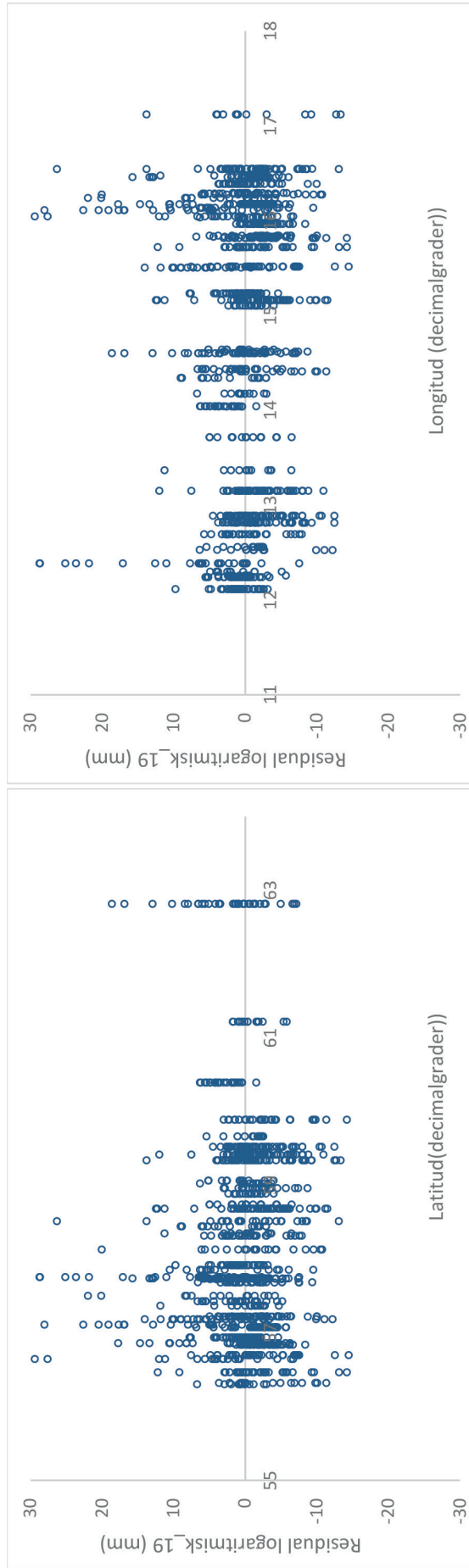
Bilaga B. Residualplottar för logistiska funktionen





Bilaga C. Residualplottar för logaritmiska funktionen





Bilaga D. Implementering av den nya logaritmiska barkfunktionen

Som stöd för praktisk implementering sammanfattas den rekommenderade logaritmiska barkfunktionen för björk (Sf_bjork) och dess begränsningar nedan.

```
height_cm_db = height_cm /*Höjd i stammen där barktjocklek ska beräknas (cm)*/

If height_cm < 1 then height_cm_db = 1 /* Den logaritmiska funktionen är definierad för höjd i stammen  $\geq 1$  cm. För att hantera höjder under 1 cm införs en ny variabel (height_cm_db) som sätts till 1 då höjden i stammen är lägre än 1 cm. */

dbh_mm_db = dbh_mm /* Brösthöjdsdiameter (mm)*/

if dbh_mm < 75 then dbh_mm_db = 75 /* För stammar med brösthöjdsdiameter under 70 mm ger funktionen en ologisk ökande barktjocklek för de nedersta metrarna i stammen. För att hantera detta införs en ny variabel (dbh_mm_db) som sätts till 75 för alla stammar som har brösthöjdsdiameter under 75 mm. */

a0 = -9,4175 /* Rekommenderade parametrar för björk i Sverige */
a1 = 0,207
a2 = 0,000153
b0 = 2,2748
b1 = -0,0322

db = a0 + a1*dbh_mm_db + a2*dbh_mm_db2 + (b0 + b1*dbh_mm_db)*ln(height_cm_db) /* Beräknar dubbla barktjockleken (mm)*/

db = max(db, 2) /*Sätter beräknade dubbla barktjocklekar under 2 mm till 2 mm */
```