

Erfassung von Einzelbaumparametern mit Airborne-Laser-Scanning-Daten

Markus Weidenbach, Piotr Wezyk, Piotr Tompalski, Karina Hoffmann und Sven Martens

Im Oktober 2011 wurde die Bürogemeinschaft landConsult.de in Bühl/ Baden und ProGea Consulting in Krakau vom Staatsbetrieb Sachsenforst beauftragt, Luftbild- und Laserdaten ertragskundlicher Versuchsflächen im Erzgebirge auszuwerten. Ziel ist die vollständige Vermessung der Einzelbaumkronen anhand der Fernerkundungsdaten sowie der Vergleich mit den vom Boden aus aufgenommenen Parametern. Der folgende Artikel beschreibt den technischen Ablauf der Auswertung mit den Methoden der Fernerkundung und die Ergebnisse im Vergleich zu Feldmessungen. Die beiden Messverfahren, die sich hinsichtlich ihrer Genauigkeiten nur wenig voneinander unterscheiden, werden kritisch diskutiert und abschließend Empfehlungen für die praktische Anwendung und weitere Erprobung des Verfahrens abgeleitet.

Ertragskundliche Untersuchungen ...

... von Waldbeständen zielen traditionell auf den Volumen- und Wertertrag. Mithin konzentrierten sich die erfassten Parameter auf die marktfähige Stammachse. Mit der Ablösung bestandesweiser Ertragstafeln durch Einzelbaumwuchsmodelle rückt aber auch die Beschreibung der Struktur des Kronenraumes zur Quantifizierung der Konkurrenzsituationen in den Fokus. So bestimmen die vertikale Struktur und die Mischung die Effektivität, mit der die Bäume des Bestandes den Wuchsraum

nutzen. Detaillierte Versuchsaufnahmen beinhalten daher sowohl die Brusthöhen-durchmesser und Baumhöhen als auch Baumpositionen, mehrere Kronenradien und die Höhe des Kronenansatzes.

Gegenüber der klassischen Vollklappung mit repräsentativen Höhen stellt die Erfassung der Lage des Einzelbaumes und seiner Kronendimension einen erheblichen Zeit- und Kostenfaktor dar. Dem stehen die immer leistungsfähigeren Methoden der Fernerkundung gegenüber, die neue Möglichkeiten der rationellen Abbildung und Vermessung des Kronenraumes schaffen. Hinsichtlich der Größe zu bearbeitender Flächen und dem hohen Interesse an einer Vielzahl von Strukturmerkmalen ergeben sich vor allem bei waldbaulichen Versuchsflächen und dem Monitoring von Naturwaldzellen und FFH-Lebensraumtypen diesbezügliche Anwendungspotenziale. Hierzu ist angedacht, den derzeitigen Stand der Technik zur automatisierten Erkennung von Einzelbäumen sowie der Ableitung entsprechender Baumdaten mit Methoden der Fernerkundung etappenweise zu erproben und zu bewerten.

Ausgangspunkt sind sieben, fast ausschließlich mit Fichten bestockte Versuchsflächen, die in den Jahren zwischen 2008 und 2011 herkömmlich ertragskundlich aufgenommen wurden. Dabei handelt es sich sowohl um einschichtige Bestände im Alter von 22 bzw. 55/56 sowie 118 Jahren mit lockerem bis gedrängtem Kronenschluss als auch lichte bis geschlossene,

zweischichtige Altbestände (110 bis 118 Jahre). Diese liegen im Erzgebirgskreis, in der Nähe der Ortschaften Olbernhau und Zöblitz in Höhen zwischen 550 und 740 m ü.NN. Die dortigen mittleren Gneisbraunerden gehören zu den wüchsigsten Standorten Sachsens.

Als Fernerkundungsdaten ...

... werden Fullwave Laserdaten genutzt, die im Juli 2009 bei zwei Flügen über das Untersuchungsgebiet mit einem RIEGL LMS-Q560 Laserscanner aus unterschiedlicher Höhe aufgenommen wurden. Bei einer Flughöhe von 300 m wurden ca. 10 Punkte/m² erfasst, bei einer zweiten Überfliegung mit einer Höhe von 500 m wurde eine Punktedichte von ca. 5 Punkten/m² erreicht. Allerdings wird der vermeintliche Vorteil der höheren Punktedichte von anderen, hier nicht näher beschriebenen, negativen Dateneigenschaften beeinträchtigt. So hat sich letztlich in einem Teil des Gebietes die Dichte von 5 Punkten/m², in einem anderen die von 10 Punkten/m², als besser erwiesen.

Zeitgleich mit der Laseraufnahme wurde das Gebiet mit einer Digitalkamera (DMC 01-122) befliegen, um Infrarotluftbilder mit einer Bodenauflösung von ca. 10 cm aufzunehmen. Die Bilder lagen als 4-kanalige (RGB- + Infrarot-) Luftbilder und als Orthofotos vor, die anhand des Geländemodells entzerrt wurden. Zwangsläufig kommt es bei solchen Orthofotos zu den bekannten Problemen der korrekten Darstellung von Baumkrone und Stamm. Beide wurden durch die Referenzierung auf die Geländehöhe mehrere Meter von ihrer wirklichen Lage versetzt abgebildet. Eine Überlagerung mit den Laserdaten ist daher zunächst nicht bzw. nur in einem engen NADIR-Bereich eingeschränkt möglich.

Für Teile des Untersuchungsgebietes wurde auf Grundlage eines aus den Originalluftbildern fotogrammetrisch (Stereomatching) berechneten Höhenmodells ein so genanntes True Orthobild berechnet. Die dann senkrecht stehenden Baumkronen gewährleisten eine Verwendung als Referenzbild (siehe Abb. 1). Mit Blick auf

Forstassessor Dr. M. Weidenbach ist Inhaber von landConsult.de, Büro für Geoinformationsmanagement, Forst- und Landnutzungsplanung, in Bühl/ Baden. Dr. P. Wezyk ist Inhaber der ProGea Consulting in Krakau und Leiter der Abteilung für GIS und Fernerkundung der forstlichen Fakultät der Universität für Landwirtschaft in Krakau. P. Tompalski ist Doktorand und wissenschaftlicher Mitarbeiter der Abteilung für GIS und Fernerkundung der forstlichen Fakultät der Universität für Landwirtschaft in Krakau. K. Hoffmann ist Referentin für Fernerkundung im Referat FGIS/ Kartografie/Vermessung des Kompetenzzentrums Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst.

S. Martens ist Referent für Waldbau im Referat Waldbau/ Waldschutz des Kompetenzzentrums Wald und Forstwirtschaft des Staatsbetriebes Sachsenforst.



Markus Weidenbach
markus.weidenbach@landconsult.de

den Aufwand und die bei der Kombination von Luftbild und Laserdaten erzielten Genauigkeiten lag der Fokus jedoch vorrangig auf der Prozessierung der Laserdaten.

Das Verfahren ...

... zur automatischen Erkennung und Abgrenzung von Einzelbäumen und der anschließenden Berechnung der Kronenparameter setzt sich im Wesentlichen aus folgenden drei Schritten zusammen:

1. Nach Filterung und Klassifizierung der Laserdaten wird ein Geländemodell (DGM) und ein Kronenmodell (nDOM) erzeugt, das in Form eines Rasterbildes die Baumkronen des Kronendaches darstellt.

2. Das Kronenmodell ist die Grundlage der Segmentierung von Einzelbaumkronen. Diese erfolgt mit der Software eCognition der Firma Trimble anhand eines für ältere Bäume mit klar erkennbaren Baumspitzen in Abständen über 2 m angepassten Regelwerkes zum Finden und Abgrenzen von Baumkronen. Vergleichbar mit einem Makro in MS Excel kann dieses an andere Nutzer weitergereicht werden. Das Ergebnis sind Kronenumrisse (Polygone), die als Vektordaten (Shape-File) exportiert werden (siehe Abb. 2).

3. Die geglätteten Kronenumrisse dienen im nächsten Schritt dazu, die zu einem Baum zählenden Laserpunkte aus der ursprünglichen Laserpunktewolke auszuschneiden. So entstand für jeden Baum eine eigene Laserpunktdatei, die anschließend mit dem für diesen Zweck programmierten Werkzeug „AtLaS“ analysiert wurde. AtLaS berechnet aus jeder baumindividuellen Punktewolke folgende Parameter:

- Rechts- und der Hochwert des höchsten Laserpunktes im Kronensegment (XY-Koordinate der Baumspitze);
- die Baumhöhe, die Kronenansatzhöhe und die Höhe der maximalen Kronenbreite;
- die maximale Kronenbreite, sowie die minimale und mittlere Kronenbreite auf Höhe der maximalen Kronenbreite;
- acht Kronenradien auf Höhe der maximalen Kronenbreite in den Haupthimmelsrichtungen N, NO, O, SO, S, SW, W, NW;
- maximaler, minimaler und mittlerer Radius auf Höhe der maximalen Kronenbreite;
- Kronenschirmfläche (planimetrische Kronenfläche), Kronenmantelfläche (3D-Kronenfläche) und Kronenvolumen.

Besondere Bestandesverhältnisse, wie etwa „Bestände ohne Unterstand und mit Kronen ohne Trockenäste“ oder „Bestände mit dichtem Unterstand und Kronen mit zahlreichen Trockenästen“, können in AtLaS durch entsprechende Voreinstellungen berücksichtigt werden (Abb. 3). Die



Abb. 1: Darstellung des True Orthofotos, das auf Grundlage des stereometrisch erzeugten Oberflächenmodells berechnet wurde. Die Lage der Baumkronen stimmt mit den weißen Kronensegmenten aus den Laserdaten überein.

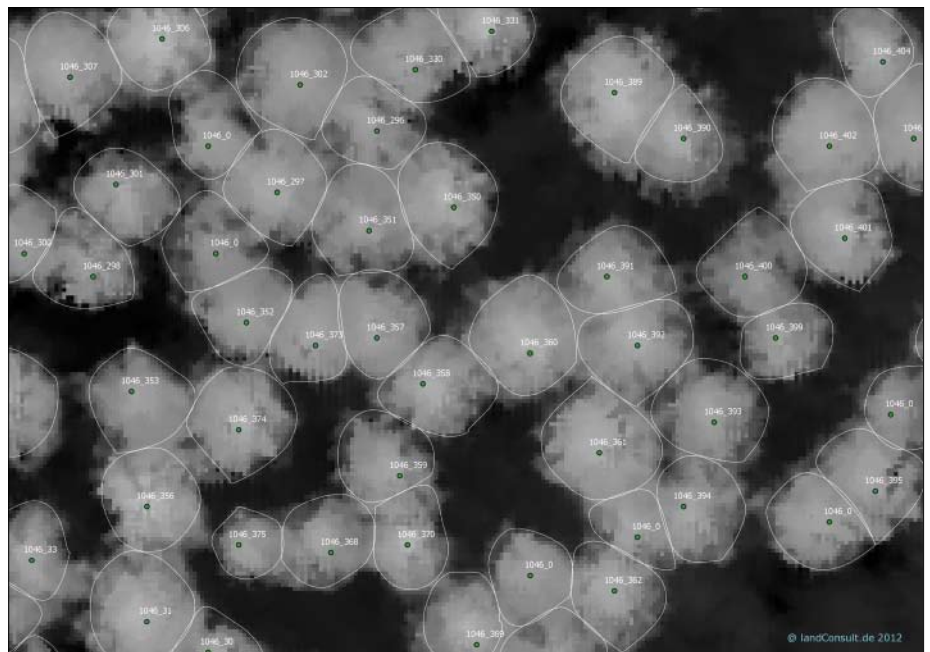


Abb. 2: Das aus den Laserdaten berechnete Kronenmodell als Graustufenbild. Darüber liegen die automatisch detektierten Kronensegmente (weiße Polygone) mit der Lage der Baumspitzen (grüne Punkte) und mit den Nummern der im Bestand markierten Bäume.

Kronenmerkmale werden als Tabelle mit den bereits im Kronenumriss vergebenen Baumnummern ausgegeben und lassen sich mit den Geometriedaten im GIS verknüpfen, visualisieren und weiterverarbeiten.

Beim Vergleich ...

... zwischen Laser- und Feldmessung sind die beobachteten Lagedifferenzen zwischen Lasermessung und den bisherigen Positionen der Feldmessungen ein erstes, für weitere Vergleiche hinderliches Ergeb-

nis. Ursächlich sind hierfür die bereits beschriebenen Lagefehler innerhalb der Orthobilder, die bei der Georeferenzierung terrestrischer Messungen bzw. bildbasierter Lagebestimmungen verwendet wurden. Erst durch eine visuelle, am Bildschirm kontrollierte Anpassung der Stammpositionen an die aus den Laserdaten ermittelten Kronenposition können die Messungen miteinander verglichen werden.

Im Ergebnis der Lagekorrekturen können sechs Versuche mit 1 786 Bäumen mit den Lasermessungen verglichen werden. Aus den Laserdaten wurden auf mehr als

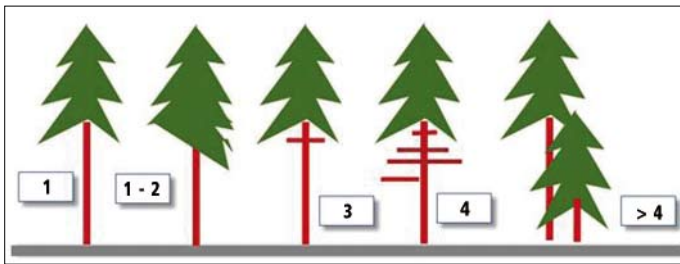


Abb. 3: Programm-einstellungen in AtLaS von 1 bis > 4 zur Berücksichtigung besonderer Bestandesverhältnisse

Die Unterschiede ...

... der Baummerkmale stellen nüchtern betrachtet Abweichungen zwischen zwei verschiedenen Messmethoden dar. Sie sind das Ergebnis unterschiedlicher, in ihrer Wirkung adäquater Fehlerquellen. Demgegenüber ermöglichen die ebenfalls betrachteten Kontrollmessungen im Felde die Abschätzung des Fehlerrahmens herkömmlicher Messmethoden (Höhen mit Ultraschall- [VERTEX] oder Laserentfernungsmessung [TRUE PULSE 200] und elektronischen Neigungsmessern/Radien mit Kompass und Bandmaß). Hinsichtlich der fehlenden Kenntnis realer Werte, die z.B. über die Messung der Baumhöhe am liegenden Stamm ermittelt werden könnte, werden relative Fehler immer auf den maximalen Messwert bezogen (Abb. 5).

Bei den Baumhöhen liegen die relativen Abweichungen zwischen Laser- und Feldmessung bei 10 % (541 Bäume), während der relative Fehler der Feldmessungen nur bei 5 % (331 Bäume) liegt. Die vergleichsweise höheren Differenzen zwischen Laser- und Feldmessung müssen jedoch relativiert werden. So überwiegen bei den Kontrollmessungen jüngere und kleinere Bäume und es treten keine zeitlichen Differenzen wie zwischen Laser- und Feldmessung auf!

Die baumindividuellen Differenzen erreichen ähnliche absolute Werte wie die Höhenmessungen. Bezüglich der geringeren Werte des Kronenansatzes steigt der relative Fehler jedoch auf 25 % an. Dies betrifft sowohl die subjektiv beeinflussten Feldmessungen (295 Bäume) als auch die Laserdaten (427 Bäume). Aus unseren Erfahrungen resultieren die personenbezogenen Abweichungen aus der individuellen Festlegung des Kronenansatzes (Astbasis am Stamm oder Ende herabhängender Äste) und der Mittelung unter-

15 ha insgesamt 7 666 Bäume automatisch mittels Laser vermessen. Davon entfallen 1 434 Bäume auf die 6,5 ha umfassenden Vergleichsflächen.

Die zwischen den automatisch ermittelten Kronengeometrien und den korrigierten Stammpositionen hergestellte räumliche Beziehung zeigt die Zahl der Stämme (Punkte) innerhalb der einzelnen Kronen (Polygone). Überwiegend ergab sich eine eindeutige Zuordnung von Krone und Stamm. Nicht selten treten auch leere und doppelt besetzte Kronen benachbart auf, sodass in diesen Fällen von Lagefehlern der Feldmessungen auszugehen ist (siehe Abb. 4).

Die Erkennungsraten ...

... liegen versuchsweise zwischen 57 und 103 % der Stammzahlen der Feldmessungen (Tab. 1). Vergleichbar mit verschiedenen anderen Untersuchungen, bei denen Einzelbäume aus Fernerkundungsdaten hergeleitet wurden [1, 2, 3, 4], treten die geringeren Erkennungsraten bei stammzahlreicheren, jüngeren Beständen

mit eng beieinander liegenden, kleineren Kronen auf. Naturgemäß werden auch zwischenständige Bäume seltener automatisch erkannt, da sie im Rasterbild des Kronenmodells nicht oder nur unzureichend abgebildet waren. In den älteren geschlossenen Beständen liegt die Erkennungsrate bei 85 bzw. 88 % und in den Altbeständen mit Lichtem Kronenschluss werden nahezu alle Bäume fehlerfrei erkannt (93 bzw. 103 %). Die gegenüber der terrestrischen Erhebung höhere Baumzahl ist die Folge fehlerhaft segmentierter Kronen (Mehrgipfeligkeit nach Kronenbruch), aber auch schlicht bei der Aufnahme im Feld übersehener Bäume!

Neuere Forschungen [5] haben bereits gezeigt, dass bei einer höheren Laserpunktdichte (ab 25 Punkte/m²) und der Analyse der gesamten Laserinformation (einschließlich der Intensität und Breite aller Impulse eines Laserstrahls) Verbesserungen der Erkennungsrate möglich sind. Hierzu trägt die Möglichkeit bei, neben der Krone auch den Baumstamm und insbesondere auch Bäume der Unterschicht besser zu erfassen.

Tab. 1: Vergleich der Versuchsdaten aus der computergestützten Auswertung des Laserscannings mit den über BWINpro-S hergeleiteten Daten der Vollkluppungen

Versuch	Aufnahme	Stammzahl [N]	mittl. Höhe [m]	mittl. KA [m]	mittl. KB [m]	KSFL [m ²]
1023 mit 2,0 ha 110 Jahre B° 0.6	Laser 2009	300	25.9	14.0	5.4	7 497
	BWIN 2010	310	26.6	14.5	6.1	9 106
	% BWIN	97	97	97	89	82
1046 mit 3,3 ha 118 Jahre B° 0.5	Laser 2009	467	31.6	21.0	5.2	11 588
	BWIN 2008	453	32.8	18.4	6.3	14 359
	% BWIN	103	96	115	83	81
2002 mit 0,6 ha 118 Jahre B° 1.0	Laser 2009	210	27.9	15.5	5.3	5 975
	BWIN 2009	246	27.1	14.7	5.5	5 980
	% BWIN	85	103	105	96	100
3061 mit 0,1 ha 56 Jahre B° 1.0	Laser 2009	49	22.1	10.2	4.2	731
	BWIN 2011	56	22.8	8.9	4	754
	% BWIN	88	97	115	105	97
3050 mit 0,5 ha 55 Jahre B° 1.0	Laser 2009	255	22.6	14.5	3.9	3 426
	BWIN 2008	450	19.9	11.2	3.8	5 918
	% BWIN	57	114	129	103	58
3060 mit 0,15 ha 22 Jahre B° 1.4	Laser 2009	153	9.5	3.5	3.4	1 216
	BWIN 2011	267	10.9	2.5	3.1	1 984
	% BWIN	57	87	140	110	61

KA – Kronenansatzhöhe; KB – Kronenbreite; KSFL – Kronenschirmfläche

Literaturhinweise:

[1] YU, X.; HYYPPÄ, J.; VASTARANTA, M.; HOLOPAINEN, M.; VIITALA, R. (2011): Predicting individual tree attributes from airborne laser point clouds based on the random forests technique. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 28-37. [2] WANG, Y.; WEINACKER, H.; KOCH, B. (2008): Lidar point cloud based fully automatic 3D single tree modelling in forest and evaluations of the procedure. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 45-52. [3] WEIDENBACH, M.; DE KOK, R. (2008): Developing Strategies for Large Scale Forest Inventories Combining LiDAR Data, Satellite Imagery and Regional Yield Models. Poster presented on the SilviLaser 2008 conference in Edinburgh (<http://landconsult.de/silvilaser08>). [4] REITBERGER, J.; HEURICH, M.; U, K.P.S.; STILLA, U. (2007): Single Tree Detection in Forest Areas with High-density LiD Data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36, 139-144. [5] REITBERGER, J. (2010): 3D-Segmentierung von Einzelbäumen und Baumartenklassifikation aus Daten flugzeuggetragener Full Waveform Laserscanner. Dissertation TU München. Institut für Photogrammetrie und Kartographie Fachgebiet Photogrammetrie und Fernerkundung. [6] LECKIE, D.; GOUGEON, F.; HILL, D.; QUINN, R.; ARMSTRONG, L.; SHREENAN, R. (2003): Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29, 633-649. [7] WEIDENBACH, M.; GUTJAHR, H.; SCHARDT, M. (2011): Machbarkeitsstudie zur photogrammetrischen Erzeugung von hochwertigen Waldoberflächenmodellen mit konventionellen digitalen Luftbildern. Abschlussbericht über das vom Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg geförderte Innovationsprojekt 2011 (http://landconsult.de/segmentation/download/waldoberflaechenmodelle-aus-luftbildern_landConsult2011.pdf).

schiedlich hoher Astansätze gegenüberliegender Stammseiten. Die Fernerkundung schließt derartige Beobachtereffekte aus. Dafür entstehen Unsicherheiten bei der Trennung der Laserpunktwolke in Einzelkronen. So müssten unter Umständen einzelne, den Kronenansatz determinierende Punkte benachbarten Kronen zugeordnet werden.

Beim Vergleich zwischen Laser- und Feldmessung weichen die Kronenbreiten im Mittel um lediglich 0,2 m ab. Die baumbezogenen Abweichungen sind jedoch mit etwa 50 % (820 Radien) unverhältnismäßig hoch. Demgegenüber liegt der Fehler der Feldmessungen bei nur 27 % (116 Radien). Das einheitliche Vorgehen beim Messen begrenzt die Streuung der Abweichungen, kann relativ hohe Unsicherheiten zwischen verschiedenen Aufnahmen jedoch nicht verhindern. So ist die mittlere Differenz zwischen Erst- und Kontrollmessung mit 0,4 m sogar doppelt so groß!

Im Fazit ...

... lassen sich mit dem derzeitigen computergestützten Verfahren der Auswertung von LiDAR-Daten in älteren Fichtenbeständen bei ausreichender Punktdichte nahezu alle Bäume erfassen. Seine Grenzen findet die Routine im Erkennen zwischenständiger Bäume, deren Kronen nicht frei stehen und in Beständen mit Kronenabständen unter 3 m. Bei den betrachteten Versuchen sank die Erkennungsrate bei Stammzahlen von 900 Bäumen pro Hektar und mehr deutlich ab.

Vor allem bei größeren Flächeneinheiten, bei denen die Wahrscheinlichkeit des Vergessens einzelner Bäume im Felde ansteigt, können sich die Fehlerquellen beider Verfahren aufwiegen.

Sollen auch Baumpositionen und Kronendimensionen ermittelt werden, ist die Fernerkundung nicht nur bezüglich des Aufwandes, sondern auch aufgrund der genaueren Lageinformationen der Bäume vorteilhafter.

Die Schwächen bei der Erkennung zwischenständiger Einzelbäume lassen sich zudem relativ leicht durch eine terrestrische Kontrolle der Kronenumrisse beheben. Erfolgt diese vor der Berechnung der Baummerkmale mit AtLaS, so lassen sich diesbezügliche Fehler vermeiden. Die dabei erzielten Genauigkeiten entsprechen mindestens denen, die bei herkömmlichen Feldaufnahmen erreicht werden.

Die Vorteile der Fernerkundung resultieren aus dem Fehlen subjektiver Einschätzungen durch die messenden Personen und in der Vielzahl möglicher

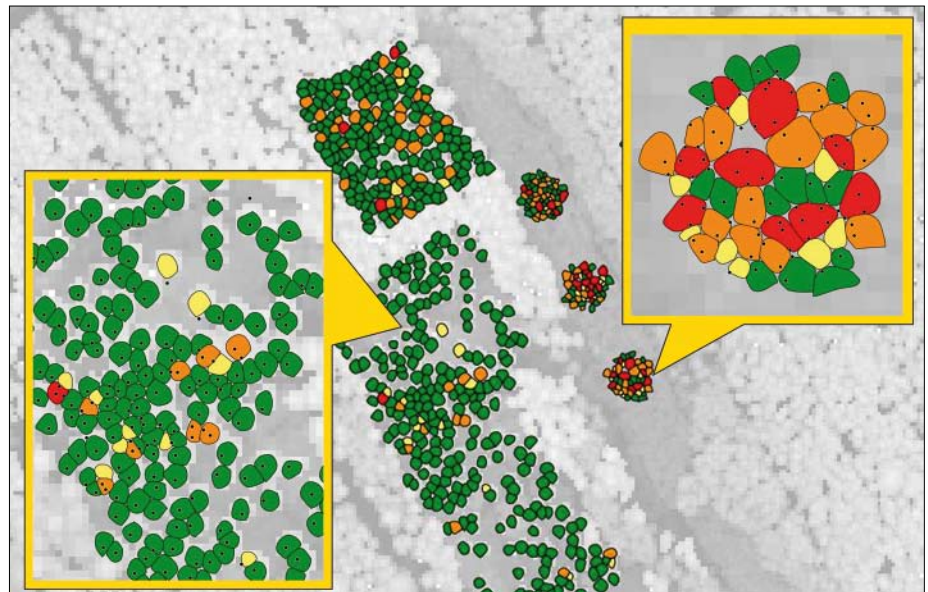


Abb. 4: Vergleich der Kronengeometrien der OBIA mit den terrestrisch hergeleiteten Stammpositionen (schwarze Punkte). Die Kronen sind entsprechend der Anzahl zuordenbarer Stämme eingefärbt: grün = Kronen mit eindeutiger Stammzuordnung, gelb = Kronen ohne Stamm, orange = Kronen mit zwei Stämmen, rot = Kronen mit 3 bis 6 Stämmen

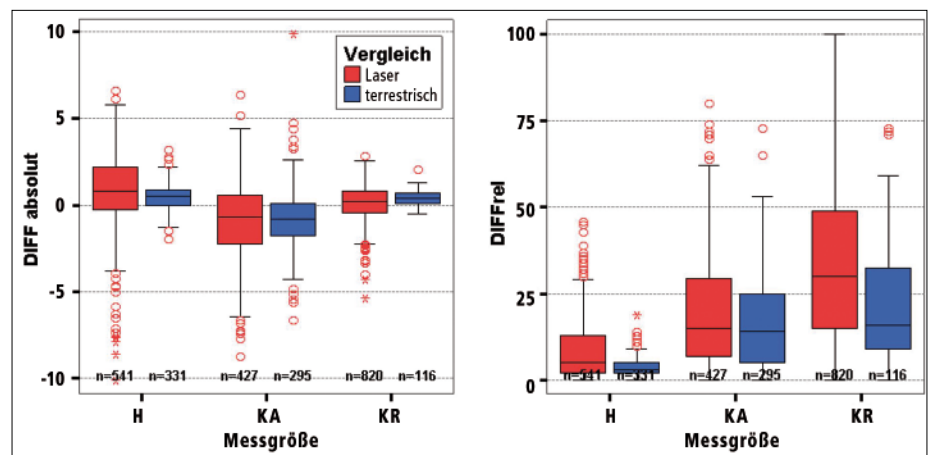


Abb. 5: Absolute (links) und relative (rechts) Differenzen zwischen den einzelnen Messungen. Die relativen Differenzen beziehen sich auf den maximalen Messwert der Vergleichsmessung (Laser-Feldmessung bzw. Feldmessung-Kontrolle).

Kronenmaße. Diese erlauben es rationell weitaus detailliertere Kronenmodelle zu generieren, als es, nicht zuletzt auch durch begrenzte Einsehbarkeit, vom Boden aus möglich ist.

Vorausschauend ...

... erscheint neben der Verwendung von Allometriefunktionen zur Voluminierung der Einzelbäume auch die Erprobung der objektbasierten Bildanalyse an weiteren Baumarten, wie Eiche und Buche, Erfolg versprechend. Gerade bei älteren Laubbäumen sind die Fehler der Feldmessungen noch deutlich höher und die objektive Methodik des Laserscannings im Vorteil. Dies zeigte bereits ein Test an einem 156-jährigen Eichenbestand.

Zudem lässt sich auch die Genauigkeit der Kronensegmentierung, die von der räumlichen Auflösung des verwendeten Differenzmodelles (nDOM) abhängt, verbessern. Die Verwendung hochwertiger Laser-Datensätze (Full Wave mit hoher Punktdichte und Information zur Laserintensität und Anzahl der Pulse pro Laserstrahl) und spektraler Bildinformation aus einer fotogrammetrischen Auswertung der originalen Luftbilder sind für die Segmentierung kleinerer Kronen hilfreiche Ansatzpunkte [6, 7]. Es ist aber ebenso vorstellbar, dass auch die verwendeten Daten, bei spezieller Anpassung des Regelwerkes an junge Bestände, bessere Ergebnisse liefern. So erfolgte die aktuelle Anpassung des Regelwerkes ausschließlich anhand älterer Fichtenbestände.