

# Eignungsprüfung einer UAV-basierten Forstinventur als Ersatz zu traditionellen Feldverfahren in Verjüngungsbeständen

MARIUS RÖDER<sup>1</sup>, EBERHARD GÜLCH<sup>1</sup> & HOOMAN LATIFI<sup>2,3</sup>

*Zusammenfassung: Um Nachforschungen zur Regeneration in vom Borkenkäfer befallenen Beständen Mitteleuropas durchzuführen, ist das Monitoring der Waldstruktur von besonderer Bedeutung. Herkömmlich werden die Strukturparameter in kleinmaßstäbigen Gebieten durch zeit- und personalintensive Feldinventuren erhoben. In den letzten Jahren trat mit der Bildaufnahme mittels Unmanned Aerial Vehicle (UAV) eine neue Form der kleinmaßstäbigen forstlichen Fernerkundung in den Vordergrund. In dieser Arbeit wird geprüft, ob eine UAV-basierte Forstinventur als Ersatz zu traditionellen Feldverfahren in diesen Verjüngungsbeständen geeignet ist. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die UAV-Inventur in den kleinmaßstäbigen Untersuchungsgebieten der Verjüngungsbestände in Qualität und Quantität nur begrenzt mit der Feldinventur mithalten kann. Rein wirtschaftlich gesehen überwiegen allerdings die Vorteile gegenüber dem Feldverfahren.*

## 1 Einleitung

Natürliche Störereignisse gehören zu den Hauptauslösern von Veränderungen in Waldökosystemen. Einer der Hauptgründe für solche Ereignisse in fichtendominierten Waldbeständen Mitteleuropas ist der Befall durch den Borkenkäfer (*Ips typographus* L.) (SVOBODA et al. 2012). Um Nachforschungen zur Regeneration dieser Gebiete durchzuführen, ist in den von Borkenkäfer getroffenen Beständen das Monitoring der Waldstruktur von besonderer Bedeutung. Herkömmlich werden die Strukturparameter (z.B. Baumhöhe (NAESSET 1997) und Kronendurchmesser (POPESCU 2003)) in kleinmaßstäbigen Gebieten durch sehr zeit- und personalintensive Feldinventuren erhoben (HYYPÄ et al. 2000; MÄKELÄ et al. 2004).

Alternativ könnte die Waldstruktur mithilfe normalisierter Oberflächenmodelle (engl.: normalized Digital Surface Model (nDSM)) durch Fernerkundungsverfahren wie Airborne Laserscanning (ALS) (LEFSKY et al. 2002), photogrammetrische Luftbilder (BOHLIN et al. 2002) oder Satellitenbilder (ST. ONGE 2008) erfasst werden. Diese Methoden weisen in den kleinmaßstäbigen Flächen allerdings Nachteile in Bezug auf Qualität oder Wirtschaftlichkeit auf und sind eher für großflächige Inventuren von intakten Waldbeständen geeignet.

In den letzten Jahren trat mit der Bildaufnahme mittels UAV eine neue Form der kleinmaßstäbigen forstlichen Fernerkundung in den Vordergrund. Ihre geringen Kosten, die Flexibilität und ihre hohe räumliche Auflösung machen sie für solche Anwendungen sehr geeignet (TANG 2015).

---

<sup>1</sup> Hochschule für Technik Stuttgart, Laboratory for Image Understanding and Earth Observation Sensors (LIMES), Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart, E-Mail: eberhard.guelch@hft-stuttgart.de

<sup>2</sup> 97074 Würzburg, Lehrstuhl für Fernerkundung, Universität Würzburg, Oswald-Külpe-Weg 86, E-Mail: hooman.latifi@uni-wuerzburg.de

<sup>3</sup> K. N. Toosi University of Technology, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, Tehran 19697 64499, Iran

Allerdings sind die Erstellung von nDSM und die anschließende Inventur von Forstgebieten (speziell in z. T. sehr dichten vom Borkenkäfer befallenen Verjüngungsbeständen) mittels UAV noch unzureichend erforscht. PULITI et al. (2015) testen die Eignung von UAV für Inventuren in kleinen Waldgebieten. In DANDOIS et al. (2015) wurden Nachforschungen unternommen, um optimale Höhe, Überlappung und Wetterbedingungen für UAV-Befliegungen zur Ableitung von Forststrukturen zu ermitteln. TUOMINEN et al. (2015) untersuchten die Schätzung von Waldstrukturparametern aus UAV-Daten. Diese und weitere Literaturquellen beziehen sich allerdings allesamt auf erwachsene Waldbestände, die überwiegend aus intakten Bäumen bestehen. Untersuchungen zur Inventur mittels UAV in den vom Borkenkäfer befallenen Verjüngungsflächen sind nicht bekannt.

Die genannten Vorteile der UAVs, die aufgeführten Probleme der herkömmlichen Methoden und der unzureichende Forschungsstand führen dazu, durch weitere Untersuchungen die Eignung von UAV-nDSM für Forstinventuren in den vom Borkenkäfer befallenen Gebieten zu prüfen. Dazu sollen folgende konkrete Ziele erarbeitet werden: es soll untersucht werden, inwiefern sich die aus flugzeuggetragenen Luftbildern erstellten nDSMs und UAV-basierte nDSMs unterscheiden. Dadurch sollen die Vorteile der UAV-nDSMs gegenüber traditionellen Fernerkundungsverfahren in kleinmaßstäbigen Flächen manifestiert werden. Außerdem soll geklärt werden, ob sich die Inventurdaten einer UAV-Befliegung als Referenz anstelle der traditionell im Feld erhobenen Daten eignen. Um diesen Vergleich differenziert zu gestalten, soll ermittelt werden, wie gut sich die UAV-basierte Inventur für die jeweiligen Forsthabitattypen (lebende Fichten/Totholz) sowie die alleinstehende/gruppierte Individuen eignet.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet ist der Nationalpark Bayerischer Wald (NPBW). Hier fanden in ausgewählten Plots die Forschungen statt (siehe Abb. 1). Dabei handelt es sich um insgesamt neun Plots mit einer Größe von jeweils ca. 800 m<sup>2</sup>, die sich im Gebiet um Rachel und Lusen in unmittelbarer Nähe zur tschechischen Grenze befinden (siehe Abb. 1). Die Stichproben liegen auf einer Höhe zwischen 1170 und 1340 m ü. NN. In den Jahren 1998 und 1999 starben dort die Fichtenbestände durch Borkenkäferbefall ab. Mittlerweile existieren dort vorwiegend kleine, junge Fichten und stehende bzw. liegende Totholzstämme der abgestorbenen Bäume (HILL et al. 2017). In den Plots lagen alle notwendigen Datengrundlagen (siehe Kapitel 2.2) vor.

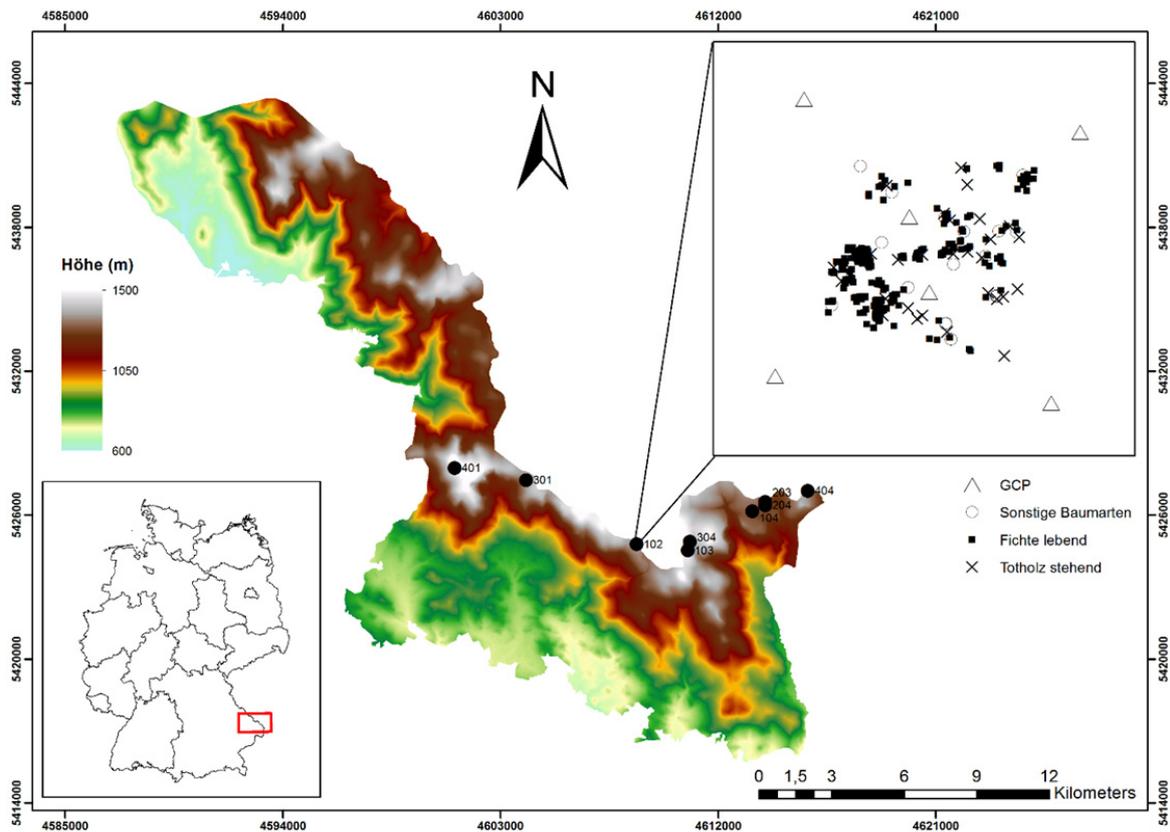


Abb. 1: Übersichtskarte NPBW mit Darstellung der Plots und Detailansicht eines Plots

## 2.2 Datengrundlagen

Die für den Vergleich herangezogenen photogrammetrischen Luftbilder wurden in einer Befliegung im Juni 2016 mit einer Längsüberlappung von 75 % und einer Querüberlappung von 60 % aufgenommen. Aufnahmesystem war die Z/I-Imaging DMC Kamera mit einer Brennweite von 120 mm. Die Befliegung wurde vom Ingenieurbüro ILV Wagner bei einer durchschnittlichen Flughöhe von 2918 m ü. NN. durchgeführt und durch Bündelblockausgleichung orientiert. Die Punktwolken wurden mit dem Semi-Global Matching Algorithmus (Software ERDAS Imagine 2014) selbst berechnet, anschließend zu DSM mit einer Gitterweite von ca. 30 cm interpoliert und von einem DTM subtrahiert, so dass für jeden Plot nDSM aus Luftbildern resultierten. Das verwendete DTM zur Ableitung der nDSM stammt aus einer ALS-Befliegung aus dem Jahr 2012 vorhanden (Details siehe (LATIFI et al. 2015)).

Zur cm-genauen Georeferenzierung der UAV-Aufnahmen wurden Ground Control Points (GCPs) verwendet. Pro Plot lagen zwei GCPs in der Mitte und vier an den Ecken der Plots vor (siehe Detailansicht Plot in Abb. 1 und Abb. 2). Sie wurden während der Feldinventur mit einer horizontalen Genauigkeit von ca. 10 cm per GPS-Verfahren aufgenommen. Die Messung jedes Punktes betrug mindestens 30 Minuten und wurde im Postprocessing ausgewertet. Es wurden die Daten der nächsten Referenzstation in Prachatice (Tschechien) verwendet, die ca. 40 km von allen Plots entfernt lag.

Die UAV-Daten wurden mit der Drohne DJI Phantom 3 Professional erfasst. Die Befliegungen wurden im Oktober 2016 in einer vierwöchigen Feldkampagne durchgeführt. Die Plots wurden mit einer durchschnittlichen Flughöhe von 40 m, quasi-Nadir Aufnahmen und einer 90-prozentigen Bildüberlappung befliegen. Die Anordnung der Bilder wurde mit der „Double Grid Mission Mode“ der Flugplanungssoftware Pix4D Capture festgelegt. Eine Befliegung eines Plots dauerte ca. 16 Minuten und ergab ca. 200 Bilder (JPEG) mit einer Gesamtgröße von ca. 1 GB pro Plot. Die Bilder wurden nach der Aufnahme auf Störeffekte wie Wind und Nebel kontrolliert und qualitativ schlechte Bilder gegebenenfalls nicht mit in die weitere Verarbeitung eingebunden. Die DSM wurden mit der Software Agisoft PhotoScan (Version 1.2.6) berechnet. Zu den Bearbeitungsschritten zählten u.a. die Herstellung der relativen Orientierung, die cm-genaue äußere Orientierung mittels GCPs sowie die Optimierung der Kameraparameter. Im Optimierungsschritt wurden Tie Points mit hohen Reprojektionsfehlern, hohen Rekonstruktionsunsicherheiten und geringen Projektionsgenauigkeiten entfernt und die Bündelblockausgleichung wiederholt. Ziel der Optimierung war, die besten Tie Points in den Bildern zu erhalten, um das geometrische Modell zu verbessern. Es wurde auch darauf geachtet, dass die Tie Points auf möglichst vielen Bildern vorkommen und auf Bildern und dem Terrain gut verteilt sind. Es resultierten Abweichungen  $< 10$  cm für alle GCPs aller Plots. Eine detaillierte Beschreibung des Workflows und der Prozessierungsschritte findet sich in einem im Laufe der Arbeiten angefertigten Best Practice Tutorial<sup>3</sup>. Es wurden dichte Punktwolken berechnet (siehe Abb. 2), das UAV-DSM mit einer Gitterweite von 5 cm aus Agisoft PhotoScan exportiert und davon das ALS-DTM subtrahiert.

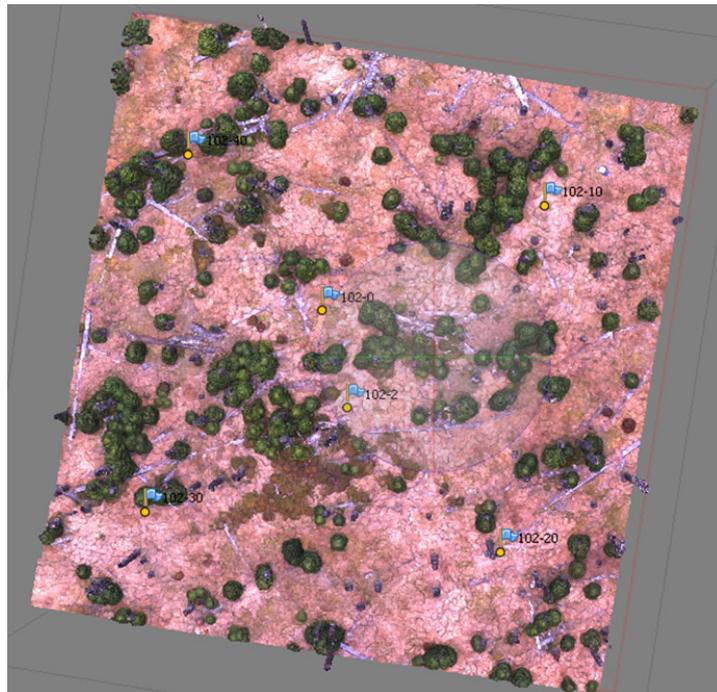


Abb. 2: Nadir-Ansicht einer Punktwolke und der GCPs des Plots 102 in Agisoft PhotoScan

<sup>3</sup>[https://www.researchgate.net/publication/316473258\\_Best\\_practice\\_tutorial\\_Technical\\_handling\\_of\\_the\\_UAV\\_DJI\\_Phantom\\_3\\_Professional\\_and\\_processing\\_of\\_the\\_acquired\\_data](https://www.researchgate.net/publication/316473258_Best_practice_tutorial_Technical_handling_of_the_UAV_DJI_Phantom_3_Professional_and_processing_of_the_acquired_data)

Die Referenzdaten aus einer Feldinventur wurden im Juli/August 2016 durch Forscher der Universität Prag durchgeführt. Dabei wurde die Realtime GIS-Software Fieldmap Ver. X5.0.5969 ([www.fieldmap.cz](http://www.fieldmap.cz)), das Distanzmessgerät ForestPro Laser Rangefinder und das Winkelmessgerät MapStar Angle Encoder verwendet. Es wurden die Position (relativ zu den GCPs), die Höhe und der Durchmesser auf Brusthöhe der lebenden Fichten, der stehenden Totholzstämme und sonstigen Baumarten sowie der Kronendurchmesser in Nord-Süd und West-Ost Richtung gemessen (SVOBODA et al. 2016).

## 2.3 Methodik

Der Vergleich von Luftbild-nDSM und UAV-nDSM erfolgte rein visuell und wurde mithilfe der Gegenüberstellung von Profilen durchgeführt.

Als Kernpunkt der Arbeit wurde dann geprüft, ob sich eine mittels UAV durchgeführte Inventur als Ersatz zu traditionellen Feldverfahren eignet. Dazu wurden Referenz- und UAV-Daten in Hinblick auf Qualität, Quantität und Wirtschaftlichkeit miteinander verglichen.

Der **Qualitätsvergleich** wurde für die geometrischen Parameter Baumhöhe und Kronendurchmesser durchgeführt. Genauigkeitsmaße waren RMSE,  $R^2$  und Bias. Dazu mussten zunächst die Bäume in den UAV-Daten erfasst werden. Zur Detektion wurden ein manueller und ein automatischer Ansatz verfolgt. Beim manuellen Ansatz wurden die Bäume in den farbcodierten Punktwolken in Agisoft PhotoScan markiert und denen der Feldinventur zugeordnet. Anschließend wurden Höhe und Kronendurchmesser von UAV- und Feldverfahren extrahiert und gegenübergestellt. Der Kronendurchmesser der UAV-nDSM wurde genau wie im Feldverfahren in Nord-Süd und West-Ost-Richtung in ArcGIS erfasst.

Das automatische Verfahren basiert auf der Erkennung von lokalen Maxima mit variierenden Fenstergrößen. Verwendet wurde ein nach HILL et al. (2017) modifizierter Algorithmus. Um ausschließlich Maxima zu erhalten, die zu einer Baumspitze gehören, wurde zusätzlich eine Baummaske erstellt. Die Maske basiert auf einer Random Forest Klassifikation der UAV-Orthomosaik.

Zum **Vergleich der Quantität** des manuellen Ansatzes wurden die Anzahl der in UAV- und Feldverfahren erfassten Bäume verglichen.

Zur qualitativen und quantitativen Auswertung des automatischen Verfahrens wurden die Ergebnisse aus Zeitgründen in lediglich drei ausgewählten Plots mit denen des manuellen Verfahrens verglichen.

Zur differenzierteren Auswertung wurden die Gegenüberstellungen beim Qualitäts- und Quantitätsvergleich auch nach lebenden Fichten, stehenden Totholzindividuen, alleinstehenden und gruppierten Individuen klassifiziert.

Der **Wirtschaftlichkeitsvergleich** basierte auf Zeit- und Kostenabschätzungen der Feldinventur und der UAV-Inventur.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Vergleich Luftbild- und UAV-nDSM

Abb. 3 zeigt exemplarisch die Profile von UAV-nDSM (schwarze Linie) und Luftbild-nDSM (rote Linie). Manuell wurden die Höhen der Feldinventurdaten (Referenzdaten) eingetragen.

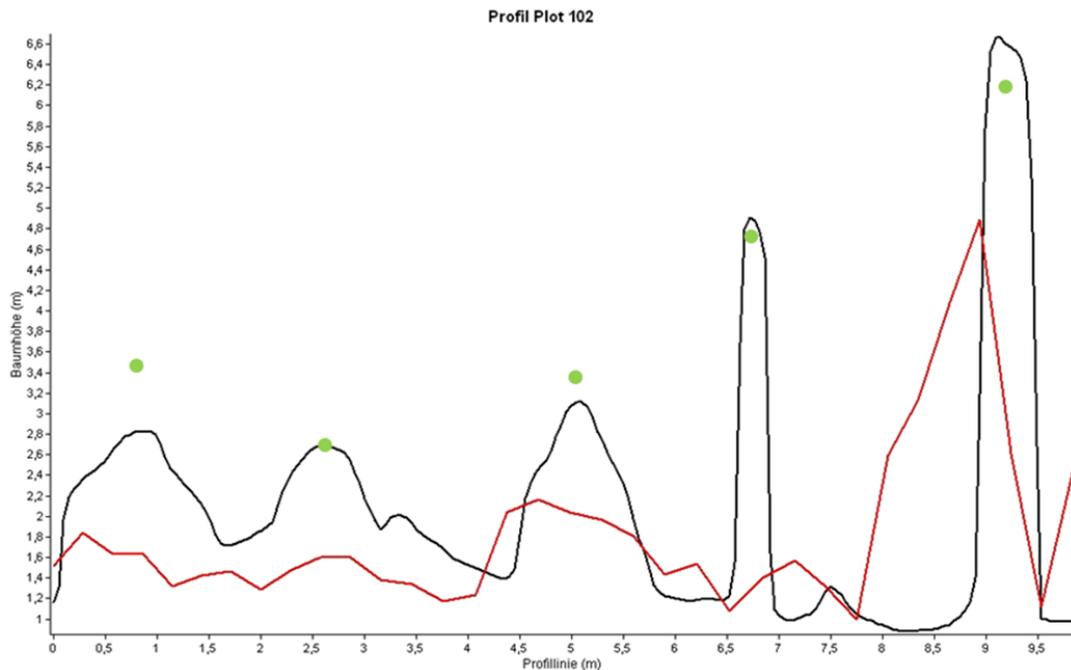


Abb. 3: Profilsicht des Plots 102 mit UAV-nDSM (schwarz), Luftbild-nDSM (rot) und Referenzdaten aus der Feldinventur (grün)

Im Profil des UAV-nDSM sind deutlich mehr Details zu erkennen als im Luftbild-nDSM. Kleine Fichten (links) sind deutlich erkennbar. Im Luftbild-nDSM wird die Höhe dieser Fichten deutlich unterschätzt. Auch im UAV-nDSM wird die Höhe unterschätzt, wenn auch nur geringfügig. Der stehende Totholzstamm bei ca. 7 m der Profillinie wird in den Luftbild-Daten überhaupt nicht modelliert. Der Totholzstamm bei ca. 9 m der Profillinie wird in den Luftbild-nDSM nur sehr grob durch einen einzelnen Punkt erfasst. In den UAV-nDSM werden die Totholzstämme genau rekonstruiert, wobei die Höhen beider Totholzstämme überschätzt werden.

### 3.2 Prüfung der UAV-Inventur als Ersatz zu traditionellen Referenzdaten

#### 3.2.1 Qualität

Werden die qualitativen Ergebnisse des Parameters Baumhöhe (manueller Ansatz) betrachtet, so lässt sich feststellen, dass der RMSE im Mittel 1.56 m beträgt.  $R^2$  ist im Mittel 0.74 und der Bias ist mit -0.73 m im Mittel negativ.

Der differenzierte Vergleich zeigt, dass lebende Fichten mit einem Durchschnitts-RMSE von 0.81 m deutlich geringere Residuen aufweisen als stehende Totholzstämme (2.34 m).  $R^2$  ist mit einem Mittelwert von 0.89 für lebende Fichten über alle Plots größer als der Wert für Totholzindividuen (0.65). Auch der Bias ist für lebende Fichten (-0.62 m) betragsmäßig kleiner als der der Totholzstämme (-0.80 m). Generell sind die Residuen in Plots mit einem hohen Anteil an kleinen, lebenden Fichten geringer als in Plots mit einem hohen Anteil an großen, stehenden Totholzstämmen. Abb. 4 verdeutlicht diesen Unterschied visuell. In Plot 102 (a) existieren viele kleine Fichten mit moderater Baumhöhe, in Plot 103 (b) kommen große Totholzstämme häufig vor.

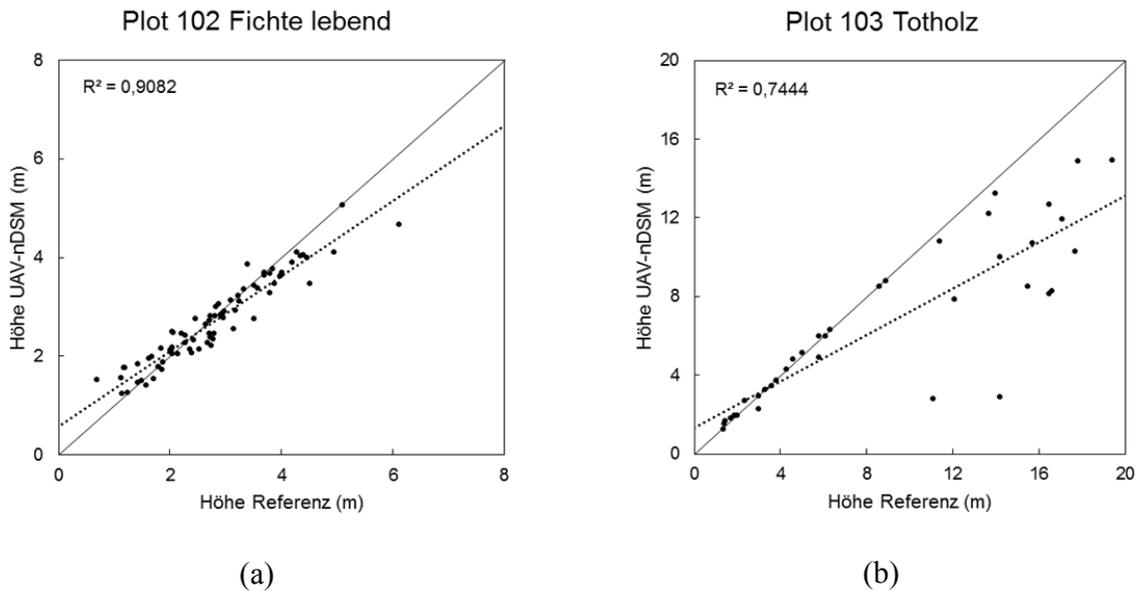


Abb. 4: Diagramme zur Darstellung des Baumhöhenvergleichs von UAV- und Referenzdaten für lebende Fichten in Plot 102 (a) und Totholzstämmen in Plot 103 (b)

Diese Unterschiede existieren bei der Differenzierung nach alleinstehenden/gruppirt stehenden Individuen nicht. Hier sind die Mittelwerte in der Regel ähnlich. Die Residuen des Parameters Kronendurchmesser sind beim manuellen Ansatz generell klein. Der RMSE beträgt im Mittel über alle Plots 0.12 m,  $R^2 = 0.89$  und der Bias liegt mit 0.04 m im positiven Bereich.

Beim qualitativen Vergleich des automatischen und manuellen Ansatzes bzgl. des Parameters Baumhöhe zeigen sich hohe Korrelationen ( $R^2$  im Mittel 0.99). Die Residuen sind in einem Plot mit hohem Totholzanteil höher als in solchen mit vielen lebenden Fichten. Der Bias ist im Mittel immer positiv, die Baumhöhen werden im automatischen Ansatz also durchschnittlich höher gemessen als im manuellen Verfahren.

### 3.2.2 Quantität

Beim manuellen Verfahren werden im Mittel nur 38 % der in der Feldinventur erfassten Bäume durch die UAV-Inventur erfasst. Lebende Fichten (37 %) werden dabei in geringerem Maße detektiert als stehendes Totholz (61 %). In Gruppen stehende Bäume weisen mit 30 % eine geringere Detektionsrate als alleinstehende Individuen (56 %). Eine hohe Korrelation von lebenden Fichten und gruppirt stehenden Individuen sowie stehendem Totholz und alleinstehenden Individuen ist zu erkennen. Es fällt außerdem auf, dass im Bereich von 0-1 m wesentlich mehr Bäume in den Referenzdaten detektiert wurden als in den UAV-Daten (siehe Abb. 5).

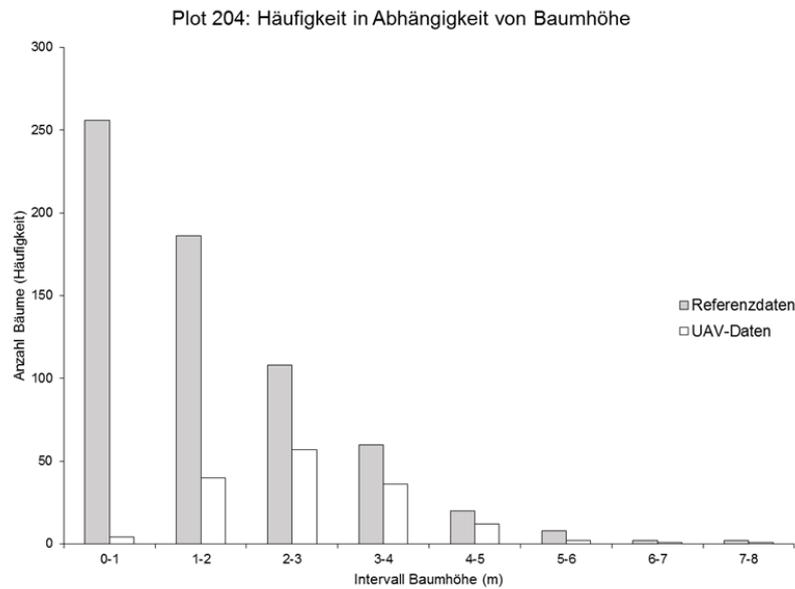


Abb. 5: Anzahl der Bäume (Häufigkeit) in Abhängigkeit von der Baumhöhe in Plot 204

Werden die quantitativen Ergebnisse des automatischen Verfahrens mit denen des manuellen Verfahrens verglichen, so fällt auf, dass im Mittel nur 63 % aller im manuellen Verfahren erfassten Bäume auch durch das automatische Verfahren erkannt werden.

### 3.2.3 Wirtschaftlichkeit

Der Zeitaufwand für die Feldinventur wurde abgeschätzt. Grundlage waren die Anzahl an Arbeitstagen, die Anzahl der benötigten Mitarbeiter und die daraus resultierende Anzahl an Arbeitsstunden insgesamt. Dabei wurde von einem Tagespensum von 9 Stunden Arbeitszeit pro Arbeiter pro Arbeitstag ausgegangen. Insgesamt ergibt sich ein Zeitaufwand von 842 Arbeitsstunden für die Feldinventur. Hinzu kommen die Kosten für Soft- und Hardware, die insgesamt 14.500 € betragen. Auch für die UAV-Inventur wurde die aufgebrachte Zeit ermittelt. Dabei wurde vom manuellen Ansatz für die Erfassung der Bäume in den UAV Daten ausgegangen. Für die Planung, Durchführung und Ausführung dieser Inventur wurden insgesamt 191 Arbeitsstunden aufgebracht. Die Kosten für Soft- und Hardware betragen 10.700 €. Bei beiden Zeitabschätzungen wurde davon ausgegangen, dass die Arbeiten durch erfahrene Mitarbeiter ausgeführt werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Vergleich Zeitaufwand und Equipmentkosten Feld- und UAV-inventur

	Feldinventur	UAV-Inventur
Zeitaufwand in Stunden	842	191
Kosten Equipment	14500 €	10700 €

## 4 Diskussion

### 4.1 Vergleich Luftbild- und UAV-nDSM

Der Profilvergleich hat bestätigt, dass die UAV-nDSM wesentlich besser für die Inventur in den kleinmaßstäbigen Gebieten geeignet sind als die Luftbild-nDSM. Durch die höhere räumliche Auflösung sind mehr Details in den nDSM der UAV-Aufnahmen zu erkennen, was eine zuverlässigere Ableitung von Strukturparametern ermöglicht. Als Gründe können die niedrigere Flughöhe und dadurch bessere Auflösung und die höhere Bildüberlappung genannt werden.

### 4.2 Prüfung der UAV-Inventur als Ersatz zu traditionellen Referenzdaten

#### 4.2.1 Qualität

Für den Vergleich des Strukturparameters Baumhöhe (manueller Ansatz) lässt sich beurteilen, dass die Qualität weniger davon abhängt, ob die Individuen alleinstehend oder gruppiert sind. Vielmehr hat die Kombination von Forsthabitatyp und Baumhöhe einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der in den UAV-Daten gemessenen Baumhöhe. Gute Ergebnisse wurden für niedrige Baumhöhen der lebenden Fichten und Totholzstämme erzielt. Generell wurden die Baumhöhen der lebenden Fichten unterschätzt. Grund dafür ist, dass in den normalisierten Oberflächenmodellen die Baumspitze nicht exakt modelliert ist. Schlechte Resultate ergeben sich für hohe Totholzindividuen. Grund dafür ist wohl, dass in diesen Plots eine zu niedrige Flughöhe des UAV gewählt wurde. Dadurch weisen hohe Bäume, die sich näher an den Aufnahmepunkten der Drohne befinden, höhere Disparitäten bzw. Parallaxen zwischen den Bildern auf. Durch hohe Disparitäten kommt es beim Dense Image Matching unter Umständen zu Problemen bei der Lokalisierung homologer Punkte.

Unter Ausschluss der qualitativ schlechten Höhenmessungen der Totholzstämme sind die Ergebnisse (Mittelwerte Fichte lebend: RMSE = 0.81 m,  $R^2 = 0.89$ ) den verwandten Untersuchungen von LISEIN et al. (2013), PULITI et al. (2015), ZARCO-TEJADAA et al. (2014) und DANDOIS et al. (2013) sehr ähnlich bzw. teilweise besser.

Für den Parameter Kronendurchmesser ergaben sich insgesamt sehr gute Resultate. Die meisten in den UAV-Daten gemessenen Werte korrelierten hoch mit denen der Referenzdaten. Grund dafür ist, dass in den hochaufgelösten UAV-nDSM Start- und Endpunkt der Messung sehr gut erkennbar sind.

Die Untersuchung eines Ansatzes zur automatischen Baumerkennung hat gezeigt, dass dadurch der manuellen Baumerfassung qualitativ ähnliche Ergebnisse erzielt werden können. Die stets positiven Bias-Werte deuten darauf hin, dass durch die automatische Baumerkennung die Baumhöhe größer geschätzt wird als durch das manuelle Verfahren. Gleichzeitig beweist diese Tatsache, dass durch die manuelle Baumerkennung nicht immer der höchste Punkt der Individuen erfasst wurde. Dies unterstreicht wiederum die Subjektivität des manuellen Verfahrens. Der positive Bias bei der Messung der lebenden Fichten zeigt, dass in diesem Fall die automatische Baumerkennung die Baumhöhe besser schätzt als die manuelle Baumerkennung.

#### 4.2.2 Quantität

Die Ergebnisse des Quantitätsvergleichs (manueller Ansatz) zeigen, dass mit durchschnittlich 38 % nur ein geringer Teil der Feldinventurdaten durch die UAV-Inventur erfasst werden kann. Der Unterschied zwischen gruppierten und alleinstehenden sowie lebenden Fichten und Totholz ist jeweils sehr groß. Wie bereits erwähnt, korrelieren gruppiert stehende Bäume mit lebenden Fichten sehr hoch. In den Baumgruppen befinden sich sehr viele kleine Fichten unterhalb (engl.: understory, dt.: Unterwuchs) der darüber stehenden Fichten (engl.: overstory, dt.: Oberwuchs). Da durch die photogrammetrischen Verfahren nur die Oberfläche modelliert wird, ist es nicht möglich den Unterwuchs in Baumgruppen zu erfassen. So ergibt sich im Mittel ein Anteil von 30 % der gruppiert stehenden Bäume. Alleinstehende Bäume korrelieren hingegen hoch mit Totholzstämmen. Unterwuchs-Individuen kommen hier so gut wie nicht vor. So können 56 % der alleinstehenden Bäume (meist Totholzstämmen) in den UAV-Daten erfasst werden.

Allerdings liefert das automatische Verfahren quantitativ schlechtere Resultate als das manuelle. Im Mittel wurden 63 % der im manuellen Verfahren erfassten Individuen auch im automatischen Verfahren erkannt. Der Anteil an den Referenzdaten fällt demzufolge noch geringer aus als durch die manuelle Baumerkennung (Mittelwert 38 %). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass der zeitliche Vorteil, den die automatische Erkennung mit sich bringt, den quantitativen Nachteil des verwendeten Algorithmus in dieser kleinmaßstäbigen Inventur nicht wettmacht. Durch Weiterentwicklung und Anpassung des Algorithmus der automatischen Baumerkennung könnten sich der manuellen Baumerkennung gleichwertige Resultate ergeben.

Die qualitativen und quantitativen Ergebnisse dieser Arbeit lassen sich zusammenfassend in Abb. 6 übersichtlich darstellen. Hier wird zum einen veranschaulicht, dass die sehr hohen Totholzstämmen auf der linken Seite der Grafik nicht vollständig modelliert werden. Die Distanz zwischen Kamera und Aufnahmeobjekt ist zu nah, wodurch es zu den großen Differenzen zwischen Referenz- und UAV-Daten kommt. Die Höhen von relativ niedrigen Totholzstämmen links neben und in der Baumgruppe weisen keine Ausreißer auf, werden allerdings überschätzt. Innerhalb der Baumgruppe werden die Individuen im Unterwuchs nicht modelliert. Es ist klar ersichtlich, dass nur die Oberfläche der Baumgruppe und nicht deren vertikale Struktur durch das photogrammetrische Verfahren rekonstruiert wird. Dies führt zu den schlechten quantitativen Ergebnissen in Baumgruppen und bei lebenden Fichten. Die Baumspitzen der lebenden Fichten werden geglättet und somit die Höhen unterschätzt. Auf der rechten Seite ist symbolisch eine alleinstehende Fichte zu erkennen, deren Kronendurchmesser durch die UAV-nDSM gut ableitbar ist.

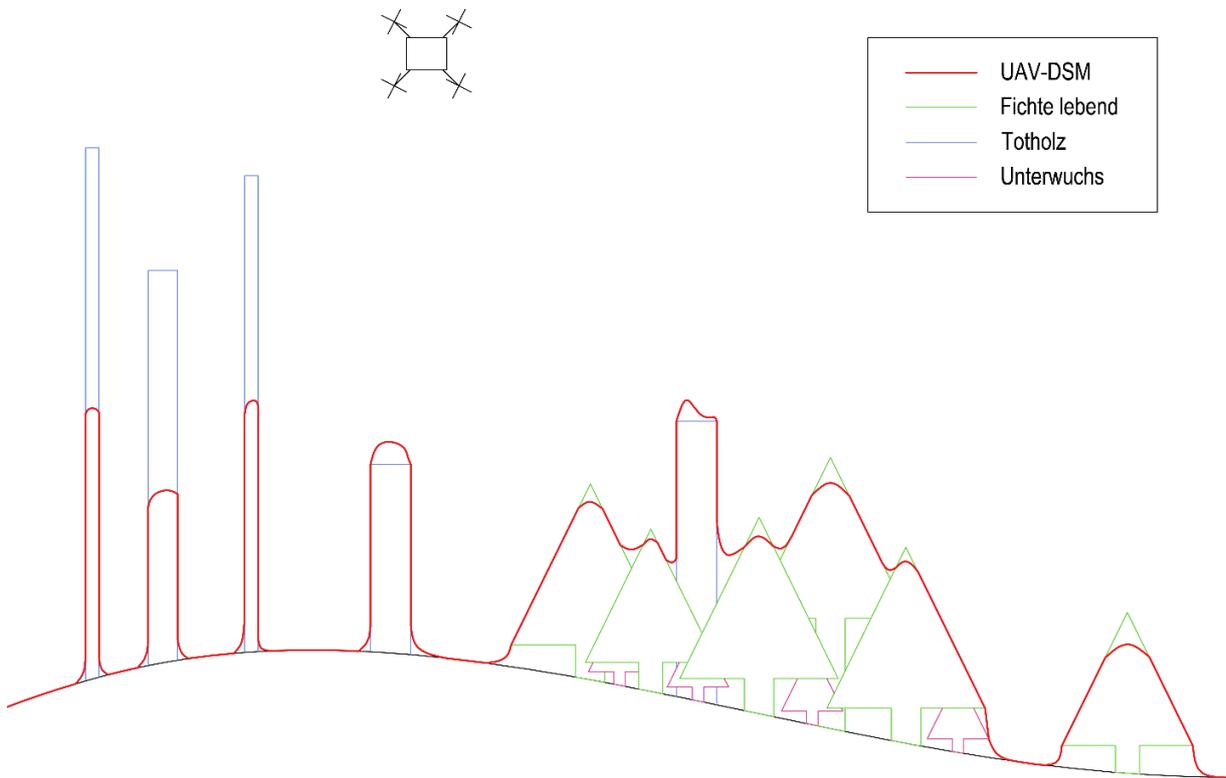


Abb. 6: Schematische Darstellung der Resultate - eigene Darstellung

#### 4.2.3 Wirtschaftlichkeit

Die Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit haben veranschaulicht, dass durch die UAV-Inventur drei Viertel der Zeit gegenüber der Feldinventur eingespart werden kann. Außerdem sind die Kosten durch die UAV-Inventur im Rahmen dieser Arbeit um ein Drittel reduziert.

### 5 Fazit & Ausblick

Um die Eignung als Ersatz zu traditionellen, feldbasierten Verfahren bewerten zu können, müssen die Vergleichsergebnisse von Qualität, Quantität und Wirtschaftlichkeit gemeinsam betrachtet werden. Qualitative Nachteile ergaben sich in der Erfassung von sehr hohen Totholzstämmen. Positiv fallen hier die geringen Abweichungen bei der Erfassung von kleinen Fichten oder Totholzstämmen auf. In Plots mit einer großen Anzahl an Unterwuchs-Individuen ist die UAV-basierte Methode dem Feldverfahren quantitativ unterlegen. Durch das photogrammetrische Auswerteverfahren kann die vertikale Struktur der Bäume nicht erfasst werden, was insbesondere bei Baumgruppen der Fall ist. Im Gegensatz dazu resultieren in Plots mit wenig Unterwuchs und vielen alleinstehenden Individuen gute quantitative Ergebnisse. Zusammenfassend haben die Ergebnisse des Quantitätsvergleichs gezeigt, dass durch die UAV-Inventur nicht in dem Maße die notwendigen Informationen gesammelt werden können wie durch das Feldverfahren. Das automatische Verfahren erwies sich in qualitativer Hinsicht dem manuellen Verfahren mindestens gleichauf, zeigte jedoch Nachteile in Bezug auf die Quantität. Durch Weiterentwicklung der

Algorithmen der automatischen Baumerkennung könnten hier Verbesserungen erreicht werden. Wirtschaftlich gesehen ist die UAV-Inventur definitiv günstiger und mit einem wesentlich geringeren Zeitaufwand verbunden als die Feldinventur.

Eine mögliche Lösung dieser Probleme könnte auch darin bestehen, die UAV-Inventur mit den Methoden des Feldverfahrens zu kombinieren. Die GNSS-Messungen der GCPs nehmen wesentlich mehr Zeit in Anspruch als die UAV-Befliegungen. Die Arbeitskraft, die für die UAV-Aufnahmen zuständig ist, könnte parallel zu den GNSS-Messungen die notwendigen Informationen durch Feldverfahren erfassen, die durch die UAV-Inventur nicht ableitbar sind (z.B. Unterwuchs, sehr hohe Totholzstämme).

Alternativ sollte in Zukunft ein kombinierter Ansatz aus Photogrammetrie und Laserscanning getestet werden, wie es in (WALLACE et al. 2016) durchgeführt wurde. Ein zusätzlich an die Drohne montierter Laserscanner wäre in der Lage, durch First- und Last-Pulse Daten auch die vertikale Struktur zu erfassen. Durch die Last-Pulse Daten könnte ein DTM abgeleitet werden, was wiederum die Notwendigkeit eines externen DTM hinfällig macht. Hohe Totholzstämme würden durch die Laserimpulse auch mit relativ niedrigen Flughöhen erfasst werden. Ein zusätzlich in die Drohne integrierter, hochgenauer GNSS-Zweifrequenzempfänger würde die GCPs und damit die terrestrischen GNSS-Messungen obsolet machen. Dieser Ansatz würde auf der einen Seite Arbeitsstunden einsparen und Qualität sowie Quantität verbessern, auf der anderen Seite aber auch eine deutliche Kostensteigerung mit sich bringen. Wünschenswert wäre deshalb eine absteigende Preisentwicklung von teuren Produkten wie GNSS-Zweifrequenzempfänger oder Laserscanner durch weitere technische Entwicklungen.

## 6 Literaturverzeichnis

- BOHLIN, J., WALLERMAN, J. & FRANSSON, J., 2012: Forest variable estimation using photogrammetric matching of digital aerial images in combination with a high resolution DEM. *Scandinavian Journal of Forest Research*, **27**, 692-699.
- DANDOIS, J. & ERLE, E., 2013: High spatial resolution threedimensional mapping of vegetation spectral dynamics using computer vision. *Remote Sensing of Environment*, **136**, 259-276.
- DANDOIS, J., OLANO, M. & ERLE, E., 2015: Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. *Remote Sensing*, **7**(10), 13895-13920.
- HILL, S., LATIFI, H., HEURICH, M. & MÜLLER, J., 2017: Individual-tree- and stand-based development following natural disturbance in a heterogeneously structured forest: a LiDAR-based approach. *Ecological Informatics*, **38**, 12-25.
- HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., INKINEN, M., ENGD AHL, M., LINKO, S. & ZHU Y.-H., 2000: Accuracy comparison of various remote sensing data sources in the retrieval of forest stand attributes. *Forest Ecology and Management*, **128**, 109-120.
- LATIFI, H., FASSNACHT, F., MÜLLER, J., THARANI, A., DECH, S. & HEURICH, M., 2015: Forest inventories by LiDAR data: A comparison of single tree segmentation and metric-based methods for inventories of a heterogeneous temperate forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 162-174.

- LEFSKY, M., COHEN, W., PARKER, G. & HARDING, D., 2002: Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies: Lidar, an emerging remote sensing technology that directly measures the three-dimensional distribution of plant canopies, can accurately estimate vegetation structural attributes and should be of particular interest to forest, landscape, and global ecologists. *BioScience*, **52**, 19-30.
- LISEIN, J., PIERROT-DECEILLIGNY, M., BONNET, S. & LEJEUNE, P., 2013: A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, **4**, 922-944.
- MÄKELÄ, H. & PEKKARINEN, A., 2004: Estimation of forest stand volumes by Landsat TM imagery and stand-level field-inventory data. *Forest Ecology and Management*, **196**(2-3), 245-255.
- NAESSET, E., 1997: Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **52**(2), 49-56.
- POPESCU, S. 2003: Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Can. J. Remote Sensing*, **29**(5), 564-577.
- PULITI, S., ORKA, H.O., GOBAKKEN, T. & NAESSET, E., 2015: Inventory of Small Forest Areas Using Unmanned Aerial System. *Remote Sensing*, **7**(8), 9632-9654
- ST. ONGE, B., 2008: Mapping the height and aboveground biomass of a mixed forest using lidar and stereo Ikonos images. *International Journal of Remote Sensing*, **29**, 1277-1294.
- SVOBODA, M., JANDA, P., NAGEL, T., FRAVER, S., REJZEK, J., & BACE, R., 2012: Disturbance history of an oldgrowth sub-alpine *Picea abies* stand in the Bohemian Forest, Czech Republic. *J. Veg. Sci.*, **23**, 86-97.
- SVOBODA, M. & WILD, J., 2016: Measuring of the permanent plots established by M. Bauer. Department of Forest Ecology, Faculty of Forestry and Wood Sciences, Czech University of Life Sciences Prague.
- TUOMINEN, S., BALAZS, A., SAARI, H., PÖLÖNEN, I., SARKEALA, J. & VIITALA, R., 2015: Unmanned aerial system imagery and photogrammetric canopy height data in area-based estimation of forest variables. *Silva Fennica*, **49**(5), Article ID 1348.
- WALLACE, L., LUCIEER, A., MALENOVSKY, Z., TURNER, D. & VOPENKA, P., 2016: Assessment of Forest Structure Using Two UAV Techniques: A Comparison of Airborne Laser Scanning and Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Forests*, **7**(3), 62.
- TANG, L., 2015: Drone remote sensing for forestry research and practices. *Journal of Forestry Research*.
- ZARCO-TEJADAA, P. J., DIAZ-VARELAA, R., ANGILERI, V. & LOUDJANI, P. 2014: Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European Journal of Agronomy*, **50**, 89-99.