

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 168 (2017)

**Heft:** 3

**Artikel:** Multitemporales, flugzeuggetragenes Laserscanning für die Forstwirtschaft

**Autor:** Hollaus, Markus / Pfeifer, Norbert

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097476>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 01.05.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Multitemporales, flugzeuggetragenes Laserscanning für die Forstwirtschaft

Markus Hollaus Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien (AT)\*  
Norbert Pfeifer Department für Geodäsie und Geoinformation, Technische Universität Wien (AT)

## Multitemporales, flugzeuggetragenes Laserscanning für die Forstwirtschaft

Flugzeuggetragenes Laserscanning (Airborne Laser Scanning, ALS) hat sich im letzten Jahrzehnt als geeignete Datenquelle zur dreidimensionalen Beschreibung von Waldbeständen und für die Ableitung von Forstparametern etabliert. In diesem Beitrag wird das Potenzial von multitemporalen ALS-Daten für forstliche Anwendungen analysiert. Dabei werden ALS-Daten aus unterschiedlichen Aufnahmejahren für die Detektion von Nutzungsflächen und Nutzungsmengen sowie die Bonitätsabschätzung herangezogen. Die Untersuchungen wurden im Bundesland Vorarlberg, Österreich, durchgeführt und zeigen, dass die Nutzungen bis hin zu Einzelstammnutzungen sehr gut erkannt wurden. Als Mindestfläche für Nutzungen haben sich 20 m<sup>2</sup> als sinnvoll erwiesen. Diese Fläche entspricht der Krone dominanter Bäume bzw. kleiner Baumgruppen. Die durchschnittliche jährliche Nutzungsmenge konnte mit einer Genauigkeit von 96.4% ermittelt werden. Die für die Bonitätsabschätzung herangezogenen Änderungen der Oberhöhen widerspiegeln die standörtlichen Gegebenheiten sehr gut. Zusätzlich wird das Potenzial von zwei ALS-Datensätzen, welche innerhalb eines Jahres unter verschiedenen phänologischen Bedingungen aufgenommen worden sind, für die Trennung von Laub- und Nadelwald untersucht. Die Untersuchungen wurden im Fürstentum Liechtenstein durchgeführt und zeigen, dass die Trennung von Laub- und Nadelwald mit einer Gesamtgenauigkeit von 92% möglich ist.

**Keywords:** airborne laserscanning, ALS, change detection, site index, forest growth, exploitation  
**doi:** 10.3188/szf.2017.0134

\* Gusshausstrasse 27–29, AT-1040 Wien, E-Mail Markus.Hollaus@geo.tuwien.ac.at

**F**lugzeuggetragenes Laserscanning (Airborne Laser Scanning, ALS) hat sich im letzten Jahrzehnt als geeignete Datenquelle sowohl zur Beschreibung von Waldbeständen (z.B. Waldfläche, Struktur) als auch für die Ableitung von Forstparametern (z.B. Baumhöhen, Holzvorrat) etabliert (Hollaus et al 2009a, Hyypä et al 2008, Leiterer et al 2013, Lim et al 2003, Næsset et al 2004). Speziell in Berggebieten kommt dieser aktiven Fernerkundungsmethode eine besondere Bedeutung zu, da sie Höheninformationen zum übershirmten, oftmals stark reliefierten Gelände wie auch zur Kronenoberfläche liefert und dabei topografische Einflüsse (z.B. Schlagschatten) auf ein Minimum reduziert sind. Bei den aktuellen Laserscannern unterscheidet man zwischen diskreten und Full-waveform(FWF)-Systemen. Bei diskreten Laserscannern werden häufig nur der erste und der letzte rückgestreute Puls aufgenommen, wohingegen bei FWF-Scannern der gesamte rückgestreute Laserstrahl digitalisiert wird. Dadurch können alle Objekte in der Bahn eines Laserpulses geometrisch und radiometrisch beschrieben werden.

Aus den ALS-Daten lassen sich neben den Terrainhöhen (digitales Terrainmodell, DTM) die Vegetationshöhen direkt ableiten, weshalb ALS-Daten zu einer fundamentalen Eingangsgröße für die Berechnung vieler Forstparameter (z.B. Bestandeshöhen, Vorrat, Biomasse) geworden sind. Die Nützlichkeit von ALS-Daten für die operative Forstwirtschaft wurde im letzten Jahrzehnt im Rahmen von wissenschaftlichen Studien und Anwendungsbeispielen dargestellt und belegt (Kangas et al 2014, Næsset 2014, Næsset 2007).

Ziel dieses Artikels ist es, das Potenzial aufzuzeigen, das sich aus der Verwendung von zu verschiedenen Zeitpunkten aufgenommenen ALS-Daten für die Forstwirtschaft ergibt. Dargestellt werden hierzu die anhand von multitemporalen ALS-Daten erfolgte Detektion von Nutzungsflächen, Nutzungsmengen und Bonität im Bundesland Vorarlberg sowie die anhand von bisaisonalen ALS-Daten durchgeführte Baumtypenklassifizierung (Nadelholz/Laubholz) im Fürstentum Liechtenstein.

## Untersuchungsgebiet und Daten

### Vorarlberg

Das Testgebiet Vorarlberg umfasst das gesamte Bundesland mit einer Fläche von ca. 2600 km<sup>2</sup> (Abbildung 1). Der Waldanteil beträgt 37%. Basierend auf den Ergebnissen der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) 2007/2009<sup>1</sup> setzt sich die Waldfläche aus 63% Nadelholz und 24% Laubholz zusammen. Die restlichen 13% verteilen sich auf Blößen, Lücken, Sträucher im Bestand und Strauchflächen.

Im Zuge von kommerziellen Projekten zur Erstellung landesweiter topografischer Modelle wurden in Vorarlberg in den Jahren 2002–2004 und 2011 ALS-Daten erhoben. Die Befliegungen 2002–2004 wurden in mehreren Kampagnen unter Einsatz von Systemen des Typs Airborne Laser Terrain Mapper (ALTM 1225, ALTM 2050) sowie eines Leica-Scanners (ALS50) durchgeführt. Die Mindestpunktdichte liegt bei rund 4 Punkten/m<sup>2</sup>. Im weiteren Verlauf dieses Artikels werden diese Daten als «ALS 2004» bezeichnet. Die ALS-Befliegungen 2011 wurden im Zeitraum von März bis Oktober 2011 unter schneefreien Bedingungen mit den ALS-Systemen Trimble Harrier 56 FWF und Optech ALTM Gemini durchgeführt. Die Mindestpunktdichte dieser Daten beträgt im offenen Gelände ungefähr 8 Punkte/m<sup>2</sup> und im Wald etwa 10 Punkte/m<sup>2</sup>.

Zusätzlich liegen Daten aus der ÖWI der Aufnahmeperiode 2007/2009 vor. Die ÖWI beruht auf permanenten Stichproben mit systematischer Verteilung der Erhebungseinheiten (Trakte) im Abstand

von 3.89 km. Jeder der vier Trakteckpunkte im Abstand von 200 m ist Aufstellungsort für das Relaskop zur Winkelzählprobe nach Bitterlich mit Zählerfaktor 4. Mithilfe der Winkelzählprobe werden die Probebäume bestimmt (Kluppschwelle: Brusthöhendurchmesser [BHD] >104 mm; Schieler & Hauk 2001). Der aus den Erhebungen abgeleitete oberirdische Holzvorrat (Gabler & Schadauer 2006) wird für die Kalibrierung der Regressionsmodelle zur Abschätzung des Holzvorrates verwendet. Weitere Details zum Untersuchungsgebiet und zu den verwendeten Daten finden sich in Hollaus et al (2015a).

### Fürstentum Liechtenstein

Das Fürstentum Liechtenstein hat eine Fläche von ca. 160 km<sup>2</sup> und weist einen Waldanteil von 41% auf. Gemäss der dritten Landeswaldinventur setzt sich der Wald aus 77% Nadelholz und 23% Laubholz zusammen (AWNL 2010). Der Holzvorrat beträgt 409 m<sup>3</sup>/ha (Vorratsfestmeter), wobei die dominierenden Baumarten Fichte und Buche 54% bzw. 11% dazu beitragen.

Die Landesfläche wurde mit zwei ALS-Kampagnen am 15. April sowie am 26. August 2015 von der Firma TopScan GmbH befliegen. Die April-Befliegung deckt die Tallagen bis 1000 m Seehöhe ab und erfolgte unter laubfreien Bedingungen. Die August-Befliegung umfasst die Gebirgszonen mit belaubtem Vegetationsstand und schneefreier Topografie. Die beiden Befliegungen überlappen sich in einem Bereich von circa 50 km<sup>2</sup>. Die Aufnahmen erfolgten in beiden Fällen mit einem FWF-Scanner (LiteMapper 7800, Riegl LMS-Q780) mit einer Mindestpunktdichte von 4 First-Pulse-Punkten/m<sup>2</sup>.

Vom Amt für Umwelt der Landesverwaltung Fürstentum Liechtenstein wurden die Daten von 54 vollkluppierten, ca. 700 m<sup>2</sup> grossen Probekreisen zur Verfügung gestellt (Abbildung 1). Die Probekreise liegen auf dem Netz der Landeswaldinventur (Maschenweite 250 m) und umfassen sowohl von Nadel- als auch von Laubbäumen dominierte Flächen sowie unterschiedliche Entwicklungsstufen. Auf jeder Probefläche wurden geometrische Einzelbaumparameter (u.a. BHD, Baumhöhe, Position) und die Baumarten erhoben. Weitere Details zum Untersuchungsgebiet als auch zu den verwendeten Daten finden sich in Hollaus et al (2016).

## Methoden

### Berechnung der topografischen Modelle

Die Berechnung des DTM erfolgt für Vorarlberg durch die hierarchisch robuste Filtermethode von Kraus & Pfeifer (1998) und für Liechtenstein mit-

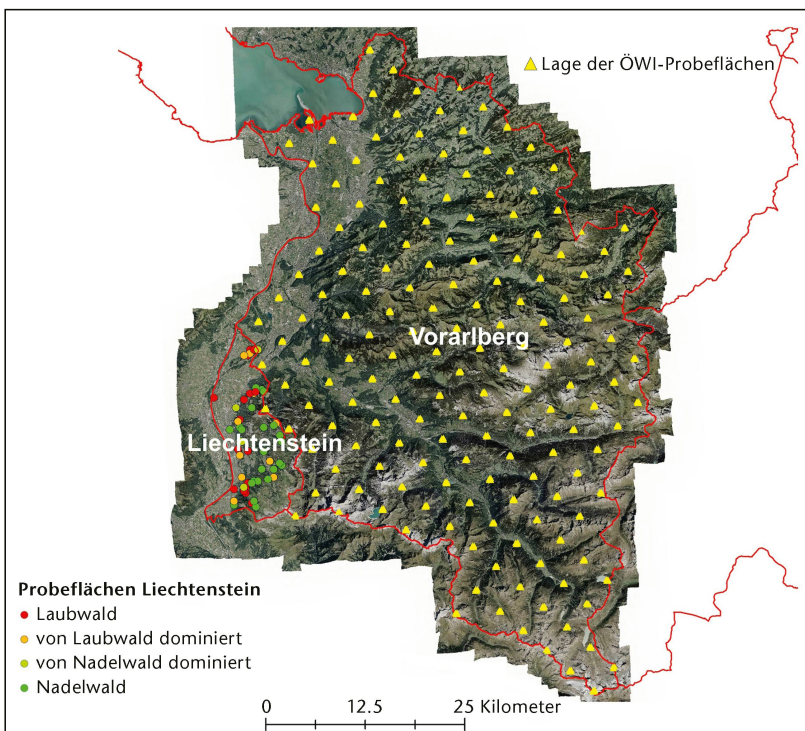


Abb 1 Lage der Untersuchungsgebiete Vorarlberg und Fürstentum Liechtenstein sowie der Probeflächen der jeweiligen Landeswaldinventur.

<sup>1</sup> [http://web.bfw.ac.at/i7/Oewi.oewi0002?geo=8&isopen=0&display\\_page=0](http://web.bfw.ac.at/i7/Oewi.oewi0002?geo=8&isopen=0&display_page=0) (7.3.2017)

tels Delaunay-Triangulierung der bereits klassifiziert vorliegenden Bodenpunkte. Als Ergebnis für beide Untersuchungsgebiete werden Raster-DTM mit einer Zellgrösse von  $1 \times 1$  m generiert.

Für die Ableitung der digitalen Oberflächenmodelle (DOM) werden für Liechtenstein alle Laserpunkte der Klassen Boden, niedrige, mittlere und hohe Vegetation herangezogen. Da uns für Vorarlberg unklassifizierte ALS-Daten zur Verfügung stehen, werden alle Laserpunkte für die Berechnung herangezogen.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der multitemporalen DOM zu erzielen und um Einflüsse von unterschiedlichen Aufnahmegeometrien und Sensoren so gering wie möglich zu halten, werden die DOM mithilfe einer einheitlichen, landbedeckungsabhängigen Berechnungsmethode erstellt, die sich an jene von Hollaus et al (2010) anlehnt. Diese Methode verfolgt einen kombinierten Berechnungsansatz, der abhängig von der Oberflächenrauigkeit das DOM aus dem höchsten Punkt pro Rasterzelle und von lokal in die Punktwolke eingepassten, gleitenden Schrägebenen («Moving Planes») zusammensetzt, um Datenlücken zu schliessen. Für die «Moving Planes»-Interpolation wird der ALS-Datensatz ausgedünnt, berücksichtigt wird jeweils nur der höchste Punkt pro Zelle von  $0.5 \times 0.5$  m Grösse.

Diese kombinierte Methode hat den Vorteil, dass für Zellen, in denen keine Echos liegen, dank der «Moving Planes»-Interpolation dennoch Höheninformationen berechnet und dank der Berücksichtigung des höchsten Punktes pro Zelle Baumkronen und Waldlücken besser erkannt werden können. Das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) wird durch Subtraktion des DTM vom DOM berechnet und hat eine Zellgrösse von  $1 \times 1$  m.

Um Unterschiede in der Georeferenzierung zwischen den zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen Datensätzen zu minimieren, wird mithilfe des sog. «Least Squares Matching» (LSM; Ressler et al 2011) der ältere ALS-Datensatz in den neueren eingepasst. Damit können die Lage- und Höhenunterschiede auf rund die Hälfte der ursprünglichen Abweichung reduziert werden und betragen nur noch wenige Zentimeter ( $<10$  cm).

#### **Ableitung der Nutzungsflächen**

Die Ableitung der Nutzungsflächen beruht auf Veränderungen der DOM zwischen zwei Aufnahmezeitpunkten: Eine Erhöhung im DOM widerspiegelt den Höhenzuwachs der Bäume und eine Abnahme deutet auf Nutzungen hin.

Zur Bestimmung der Nutzungsflächen für Vorarlberg in den Jahren zwischen 2004 und 2011 wird unter Einhaltung der Walddefinition der ÖWI (Mindestfläche  $500 \text{ m}^2$ , Mindestüberschirmung  $>3/10$ , Mindestbreite  $>10$  m, Mindestbaumhöhe  $>1.3$  m) zunächst die Waldfläche anhand der ALS-Daten von

2004 mit der Methode von Eysn et al (2012) bestimmt. Anschliessend werden die Nutzungsflächen mithilfe des Differenzmodells der beiden DOM (Tran et al 2015) ermittelt, wobei als kleinste zu detektierende Nutzungsfläche  $20 \text{ m}^2$  gewählt werden und die Höhen zwischen 2004 und 2011 um mindestens  $10$  m abgenommen haben müssen (vgl. Formel 1).

$$\text{Nutzung} = \text{DOM}_{2011} - \text{DOM}_{2004} \leq -10 \text{ m} \quad (1)$$

#### **Ermittlung der Nutzungsmenge**

Um die Nutzungsmengen zu ermitteln, wird neben der Karte der Nutzungsflächen eine Karte mit dem Holzvorrat zum Zeitpunkt vor der Nutzung benötigt. Für Vorarlberg wird die Holzvorratskarte mithilfe eines linearen Regressionsmodells berechnet (Hollaus et al 2009b, 2013). Die für die Kalibrierung des Modells erforderlichen Vorratsdaten wurden vom Bundesforschungszentrum für Wald bereitgestellt und mittels Wachstumsmodellen aus den ÖWI-Daten für das Aufnahmejahr der ALS-Daten (2004) berechnet. Für die Kalibrierung des Holzvorratsmodells ist es wichtig, dass die Lage der ÖWI-Daten bestmöglich mit dem nDOM übereinstimmt. Hierfür wird der Co-Registrierungsansatz von Dorigo et al (2010) angewendet. Dabei wird versucht, die Baumpositionen der ÖWI-Daten anhand lokaler Maxima im nDOM zu finden und die Plots entsprechend einzupassen. Von den ÖWI-Plots in Vorarlberg konnten circa 75% zufriedenstellend automatisch zugeordnet werden. Mittels manueller Nachbearbeitung konnten weitere 15% zugeordnet werden. Für die restlichen 10%, dies betrifft vor allem Plots in Laubwäldern, konnte keine Zuordnung gefunden werden, weshalb sie von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen wurden. Die Kalibrierung der Modelle und die flächigen Anwendungen werden mit dem Softwarepaket OPALS (Pfeifer et al 2014) durchgeführt und beruhen auf dem nDOM mit einer Auflösung von  $1 \times 1$  m. Um schliesslich die Nutzungsmenge – den genutzten Holzvorrat – quantifizieren zu können, wird die Holzvorratskarte von 2004 mit den Nutzungsflächen verschnitten und statistisch ausgewertet.

Die Ergebnisse werden anhand von Holzeinschlagsmeldungen (HEM) des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) evaluiert.

#### **Schätzung der Bonität**

Die Möglichkeit der Bonitätsschätzung anhand von multitemporalen ALS-Daten wird mithilfe des durchschnittlichen Gesamtzuwachses im Alter von 100 Jahren ( $\text{DGZ}_{100}$ ) für den südlichen Teil des Untersuchungsgebiets Vorarlberg, in den Beständen des Stand Montafon Forstfonds analysiert. In der vom Stand Montafon Forstfonds betriebenen opera-

tiven Forstinventur wird der  $DGZ_{100}$  mit Formel 2) berechnet:

$$DGZ_{100} = a_1 \times h_0 + a_2 \times ih_{10} + a_3 \times h_0^2 + a_4 \times ih_{10}^2 + a_5 \times h_0 \times ih_{10} \quad (2)$$

wobei  $DGZ_{100}$  in  $Vfm/(ha \times \text{Jahr})$  angegeben wird,  $h_0$  der Oberhöhe der 100 stärksten Bäume pro Hektare zum ersten Zeitpunkt in Meter und  $ih_{10}$  dem Höhenzuwachs in zehn Jahren in Meter entspricht. Die Modellkoeffizienten wurden dem Stand Montafon Forstfonds vom Institut für Waldwachstum der Universität für Bodenkultur zur Verfügung gestellt.

Für die Bonitätsschätzung aus den multitemporalen ALS-Daten wird angenommen, dass die Parameter  $h_0$  und  $ih_{10}$  aus den ALS-Daten geschätzt werden können. Dabei werden die Oberhöhen nicht auf Basis der 100 stärksten Bäume, sondern der 100 höchsten Bäume pro Hektare ermittelt. Die 100 höchsten Bäume können entweder innerhalb eines Kreises mit der Fläche einer Hektare oder innerhalb eines Bestandes ausgewählt werden. Für die Einzelbaumbestimmung wird ein robuster lokaler Maxima-Filter verwendet. Dieser sucht den höchsten ALS-Punkt innerhalb eines Suchfensters (z.B. mit einem Radius von 1.5 m). Um Ausreisser zu eliminieren, wird bei einer Höhendifferenz von mehr als einem Meter zwischen dem höchsten und dem

zweithöchsten Punkt der zweithöchste Punkt als Maximum klassifiziert. Um Nutzungen zwischen den beiden ALS-Aufnahmezeitpunkten zu berücksichtigen, werden nur Einzelbäume für die Oberhöhenbestimmung verwendet, die zu beiden Aufnahmezeitpunkten detektiert werden können (Hollaus 2015b).

### Baumtypenklassifizierung

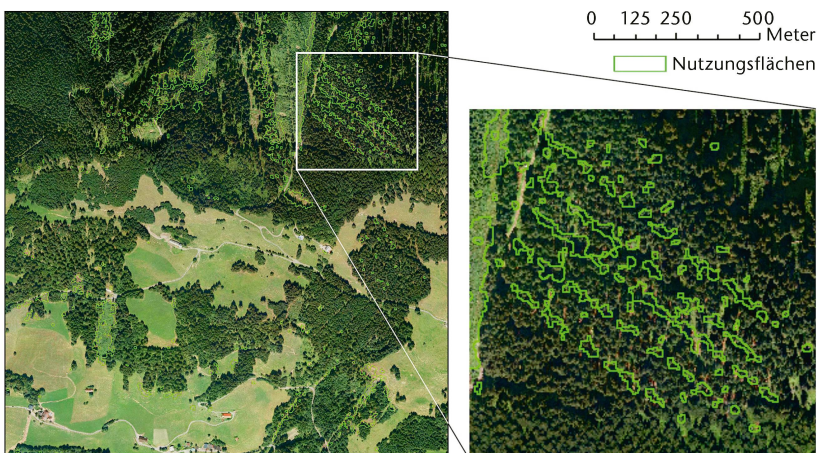
Die Baumtypenklassifizierung wird für das Teilgebiet des Fürstentums Liechtenstein, das sich im Überlappungsbereich der beiden ALS-Befliegungen befindet, durchgeführt. Der Klassifikationsansatz orientiert sich an den unterschiedlichen geometrischen und radiometrischen Rückstreuungseigenschaften des Laserlichts und der vertikalen Punktverteilung für Nadel- und Laubbäume sowie deren Veränderungen zwischen belaubtem und unbelaubtem Zustand.

Die Klassifizierung wird sowohl auf Rasterniveau mit einer Zellgröße von  $9 \times 9$  m als auch auf Einzelbaumniveau durchgeführt. Für die Klassifizierung auf Einzelbaumniveau werden die Bäume aus der 3-D-Punktwolke mittels lokalen Maxima-Filters detektiert. Die Klassifizierung erfolgt sodann anhand der Analyse der ALS-Punkte, die sich in einem Suchzylinder mit 2 m Radius um die gefundene Einzelbaumposition befinden. In Tabelle 1 ist ein Auszug der analysierten Parameter dargestellt.

Die Klassifizierung in Nadel- und Laubbaum erfolgt mit einem Entscheidungsbaum. Die Auswahl der Parameter und ihrer Schwellenwerte erfolgt anhand einer visuellen Analyse der FWF-ALS-Daten unter Einbeziehung eines FIR-Orthofotos, auf dem Laub- und Nadelbäume gut differenzierbar sind. Die Validierung der abgeleiteten Laubwald-/Nadelwaldkarte erfolgt mithilfe des Anteils von Nadelholz resp. Laubholz an der Grundfläche der Stichproben der Liechtensteinischen Landeswaldinventur.

Parameter	Beschreibung
$R_{veg-top}$ (dB)	Durchschnittliche Reflektivität aller Vegetationsechos der obersten Kronenschicht (DOM – 1.0 m)
$R_{diff-veg-top}$ (dB)	$R_{veg-top}$ (August) – $R_{veg-top}$ (April)
HQ <sub>50</sub> (m)	50. Höhenperzentil aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m)
HQ <sub>diff-50</sub> (m)	HQ <sub>50</sub> (August) – HQ <sub>50</sub> (April)
$D_{veg-top-veg-all}$ (%)	$100 \times (\text{Anzahl der Echos in der obersten Kronenschicht [DOM – 1.0 m]}) / (\text{Anzahl aller Vegetationsechos [nDOM > 1.5 m]})$
$D_{diff-veg-top-veg-all}$ (%)	$D_{veg-top-veg-all}$ (August) – $D_{veg-top-veg-all}$ (April)

**Tab 1** Auszug aus den Parametern, die aus Full-waveform-ALS-Daten ermittelt werden. Die Berechnungen werden für Rasterzellen wie auch auf Einzelbaumniveau durchgeführt.

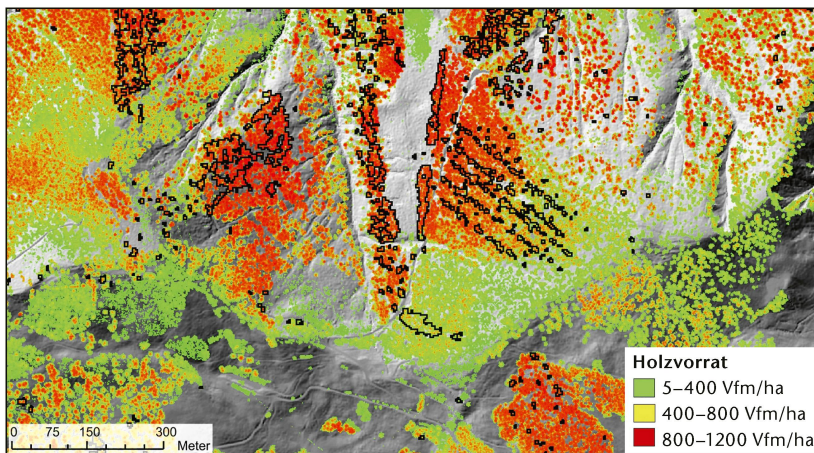


**Abb 2** Nutzungsflächen, abgeleitet aus ALS-Daten von 2011 und 2004, dargestellt auf dem Hintergrund eines Orthofotos von 2012. Die Abbildungen zeigen einen Ausschnitt aus dem Untersuchungsgebiet Vorarlberg.

## Ergebnisse und Diskussion

### Nutzungsflächen

Innerhalb der abgeleiteten Waldfläche von 2004 wurden die Nutzungsflächen mithilfe eines Hörschwellenwertes von  $\leq -10$  m im Differenz-DOM klassifiziert. In der Summe wurden für Vorarlberg 5045 ha Nutzungsflächen detektiert. Der visuelle Vergleich mit ausgewiesenen Nutzungen zeigt, dass sich die Nutzungsflächen gut ableiten lassen. Erkennt werden können Nutzungen bis hin zu Einzelstammnutzungen bzw. Durchforstungen, zum Beispiel entlang von Seillinien (Abbildung 2). Eine quantitative Validierung der Nutzungsflächen konnte aufgrund der fehlenden Referenzdaten nicht durchgeführt werden. Die gewählte Mindestfläche von 20 m<sup>2</sup> darf als sinnvoll betrachtet werden. Diese Fläche ent-



**Abb 3** Ausschnitt aus der Holzvorratskarte 2004 für Vorarlberg, überlagert mit den Nutzungsflächen 2004–2011. Im Hintergrund ist ein Beleuchtungsbild des DTM von 2011 zu sehen. Die räumliche Auflösung beider Datensätze beträgt  $1 \times 1$  m, der Schwellenwert für die Abgrenzung der Nutzungsflächen beträgt  $20 \text{ m}^2$ .

spricht der Krone dominanter Bäume bzw. kleiner Baumgruppen.

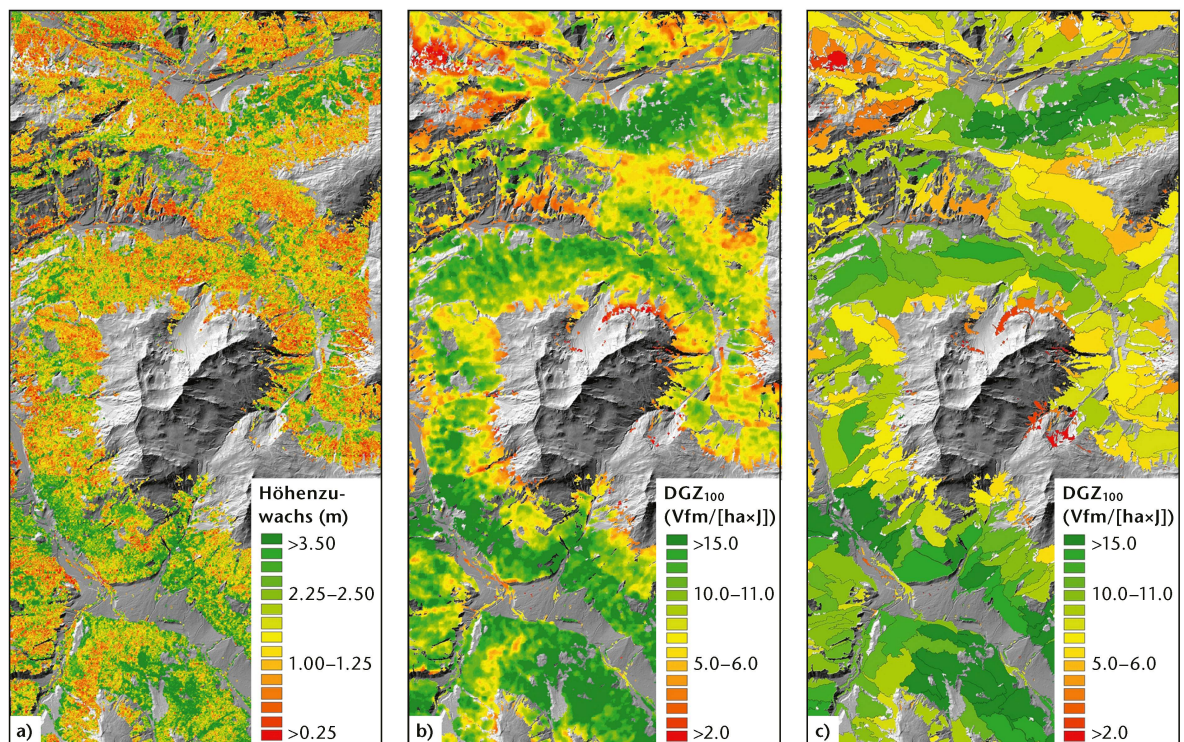
Höhenabnahmen in der Kronenoberfläche von 10 m und mehr können allerdings auch an Waldrändern auftreten. Sie entstehen in erster Linie dadurch, dass die verwendeten ALS-Systeme sich in den Punktdichten wie auch im Auslenkwinkel unterscheiden und es daher zu einer unterschiedlichen Repräsentation der Kronenform kommen kann. Um den Einfluss der unterschiedlichen Aufnahmesysteme zu minimieren, wurden morphologische Bildoperationen (opening, closing) angewendet.

Die Detektion von genutzten Bäumen, die überschirmt waren, ist anhand der verwendeten Methode, die auf Rasterdaten basiert, nicht möglich. Alternativ könnte die 3-D-Punktwolke analysiert werden. Aufgrund der relativ geringen ALS-Punktdichte ( $<10$  Punkte/ $\text{m}^2$ ) konnte dieser Ansatz hier aber nicht weiterverfolgt werden.

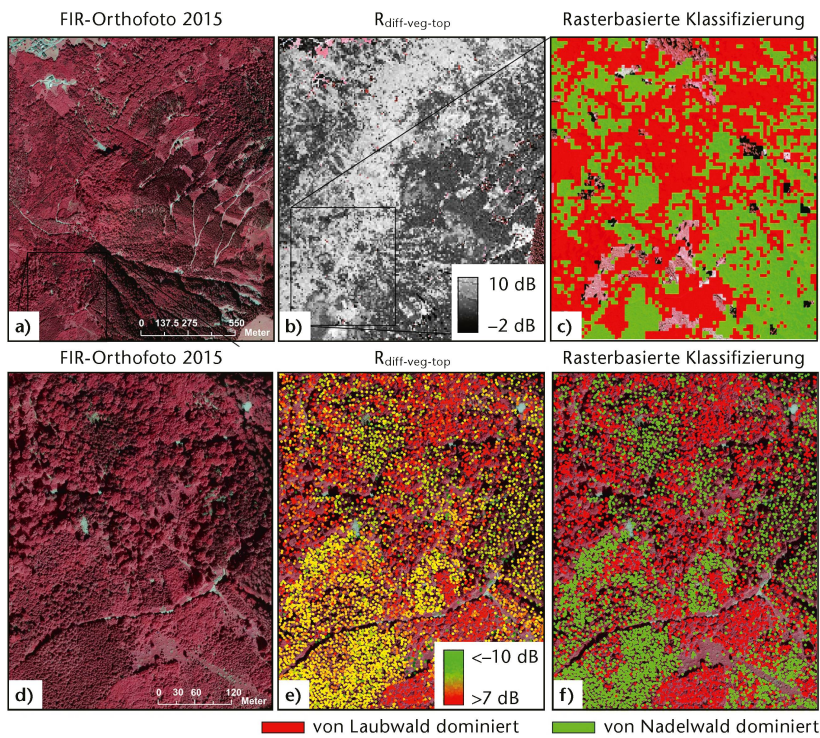
### Nutzungsmengen

Das für die Bestimmung der Nutzungsmengen erforderliche Holzvorratsmodell wurde mithilfe der ÖWI-Daten für Vorarlberg mit einem Bestimmtheitsmass ( $R^2_{\text{adj}}$ ) von 0.80 kalibriert. Die relative Standardabweichung bezogen auf den Mittelwert beträgt ca. 30%. In Abbildung 3 sind die Holzvorräte von 2004 sowie die Nutzungsflächen zwischen 2004 und 2011 dargestellt. Die daraus abgeleiteten Nutzungsmengen in Vorarlberg zwischen 2004 und 2011 betragen durchschnittlich 351 000 Vfm/Jahr, wobei in den Nutzungsflächen ein Einschlag von durchschnittlich 418 Vfm/ha ermittelt wurde. Die HEM geben für diesen Zeitraum (nach erfolgter Umrechnung von Erntefestmetern in Vorratsfestmeter) eine durchschnittliche Nutzung von 364 000 Vfm/Jahr bzw. 433 Vfm/ha an. Damit wurde der durchschnittliche Nutzungswert der HEM um lediglich 3.6% unterschätzt.

Die Abweichung lässt sich unter anderem darauf zurückführen, dass die ALS-Daten 2004 in einer grossen Zeitspanne (2002–2004) aufgenommen worden sind und sich nicht alle Durchforstungen



**Abb 4** a) Höhenzuwachs von Einzelbäumen, die in beiden DOM (2004 und 2011) identifiziert werden konnten. b)  $DGZ_{100}$ , berechnet anhand der 100 höchsten Bäume innerhalb eines Hektars um den jeweiligen Baum (=Kreis mit einem Radius von rund 56.4 m). c)  $DGZ_{100}$ , berechnet anhand der 100 höchsten Bäume pro Bestand. Der gezeigte Ausschnitt hat eine Ausdehnung von  $8 \times 16$  km.



**Abb 5** a, d) FIR-Orthofotos. b) Raster- und e) einzelbaumbasierte Differenz der Reflektivität (mit Zellgrösse von  $9 \times 9$  m beim rasterbasierten Ansatz und mit durchschnittlichem Kronendurchmesser von 4 m beim einzelbaumbasierten Ansatz). c) Raster- und f) einzelbaumbasierte Klassifizierung in Laub- und Nadelwald. Die Ausdehnung des Ausschnittes in den Abbildungen a–c beträgt  $1600 \times 1900$  m, jene der Abbildungen d–f  $815 \times 1285$  m.

aus den ALS-Daten ableiten lassen. Es muss aber auch darauf hingewiesen werden, dass, weil die Nutzungsmengen aus dem ALS-Datensatz 2004 ermittelt worden sind, der Zuwachs bis zum tatsächlichen Nutzungszeitpunkt (bis maximal 2011) nicht berücksichtigt worden ist. Dieses Vorgehen musste gewählt werden, weil der exakte Zeitpunkt der einzelnen Nutzungen für diese Studie nicht zur Verfügung stand.

### Bonitätsschätzung

Für die Bonitätsschätzung musste in einem ersten Schritt die Oberhöhe von Einzelbäumen aus den ALS-Daten der beiden Erhebungszeitpunkte extrahiert werden. Dies war mit hoher Zuverlässigkeit möglich, wie ein qualitativer Vergleich mit terrestrisch gemessenen Höhen zeigte. Eine quantitative Validierung der Oberhöhen war wegen der zu geringen Anzahl terrestrisch gemessener Baumhöhen (pro Plot wird oft nur die Höhe des Zentralstammes gemessen) nicht möglich.

Die in der Höhenzuwachskarte (Abbildung 4a) ersichtlichen Unterschiede im Höhenzuwachs widerspiegeln die standörtlichen Gegebenheiten wie Klima, Lage, Boden und Ausgangsgestein. Deutlich zu erkennen ist die Abnahme der Zuwächse mit zunehmender Höhenlage. Ebenso sichtbar werden die höheren Zuwächse an den nordexponierten Talflanken im Vergleich zu den südexponierten.

Der in Abbildung 4b dargestellte einzelbaumbasierte  $DGZ_{100}$  zeigt im Vergleich zum bestan-

desweise ermittelten (Abbildung 4c) eine höhere Variabilität, da hier Bestandesgrenzen wie auch Bestandesform nicht berücksichtigt werden und es daher im Übergangsbereich von Beständen zu Mittelungen kommt.

### Baumtypenklassifizierung

Die für Liechtenstein durchgeführte Baumtypenklassifizierung nutzt die innerhalb einer Vegetationsperiode auftretenden phänologischen Unterschiede von Laub- und Nadelwald. Beim rasterbasierten Ansatz (Abbildungen 5a–c) zeigt sich, dass sich Laub- und Nadelwald mithilfe der Reflektivität des Aprilfluges ( $R_{\text{veg-top-April}}$ ) sehr gut unterscheiden lassen. Dabei weist der Nadelwald eine deutlich höhere Reflektivität auf als der Laubwald, da Letzterer im April noch grossteils laublos ist. Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich beim Augustflug: Hier ist die Reflektivität ( $R_{\text{veg-top-August}}$ ) beim Laubwald wegen seines dichten Blätterdaches deutlich höher. Die Differenz der beiden Reflektivitäten ( $R_{\text{diff-veg-top}}$ ; Abbildungen 5b) eignet sich daher auch sehr gut für die Differenzierung.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium stellt die vertikale Punktverteilung, repräsentiert durch das 50. Höhenpercentil aller Vegetationsechos ( $HQ_{50}$ ), dar. Dabei variiert  $HQ_{50}$  zwischen den Befliegungen ( $HQ_{\text{diff-50}}$ ) im Nadelwald kaum, wohingegen im Laubwald eine Erhöhung von  $HQ_{50}$  um zum Teil mehrere Meter bei der August-Befliegung auftritt. Schliesslich wurde noch die Veränderung der vertikalen Punktdichtevertelung in der Vegetationsschicht zwischen belaubtem und unbelaubtem Zustand ( $D_{\text{diff-veg-top-veg-all}}$ ) für die Klassifizierung genutzt. Die starke Zunahme im Laubwald weist darauf hin, dass im belaubten Zustand die meisten Echos von der obersten Kronenschicht zurückgestreut werden, wohingegen im unbelaubten Zustand die Echos über die gesamte Baumhöhe verteilt sind.

Beim einzelbaumbasierten Ansatz (Abbildungen 5d–f) zeigt sich im Allgemeinen ein ähnliches Bild wie beim rasterbasierten Ansatz, die Unterscheidung geht aber besser mit der Differenz der Reflektivitäten ( $R_{\text{diff-veg-top}}$ ) als mit den Änderungen in der vertikalen Punktverteilung- ( $HQ_{\text{diff-50}}$ ) oder der vertikalen Punktdichtevertelung in der Vegetationsschicht ( $D_{\text{diff-veg-top-veg-all}}$ ). Dies kann durch die robustere Abschätzung der vertikalen Punkt(dichte)-verteilungen beim rasterbasierten Ansatz erklärt werden. Die durchgeführte wissenschaftliche Entscheidungsbaumklassifizierung liefert sowohl für den raster- als auch für den einzelbaumbasierten Ansatz sehr gute Ergebnisse. So zeigte die visuelle Beurteilung der Klassifikationsergebnisse mit dem FIR-Orthofoto wie auch mit den Stichproben der Landeswaldinventur eine hohe Übereinstimmung. Die Validierung mit den an der Grundfläche gewichteten Anteilen von Nadelholz und Laubholz an den

Stichproben ergibt eine Gesamtgenauigkeit von 92%. Bei den fehlerhaft klassifizierten Stichproben handelt es sich um Mischwald-Stichproben mit einem Verhältnis von Nadel- zu Laubbäumen von circa 50%. Da für die Gewichtung die Grundfläche herangezogen wurde und diese nicht immer mit der Kronenfläche identisch ist, kann es hier zu Abweichungen kommen.

## Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Analysen zeigen das Potenzial von multitemporalen ALS-Daten für forstliche Anwendungen: Die für das Fürstentum Liechtenstein vorliegenden FWF-ALS-Daten (Aufnahmen in belaubtem und unbelaubtem Zustand) haben die Trennung von Laub- und Nadelwald mit hoher Zuverlässigkeit und mit hohem Automatisierungsgrad erlaubt. Eine weitere Auftrennung der Baumartengruppen ist jedoch schwierig und nur mit geringerer Zuverlässigkeit möglich.

Die für Vorarlberg vorliegenden ALS-Daten aus den landesweiten Befliegungen von 2004 und 2011 stellen eine gute Grundlage für die Detektion von Veränderungen im Waldareal dar. Erkannt werden können Nutzungsflächen, wobei sich diese bis auf die Ebene eines einzelnen Baumes der Oberschicht abgrenzen lassen, und es lassen sich Nutzungsmengen abschätzen. Selbstredend lassen sich auch Vorratsveränderungen analysieren, auch wenn diese in vorliegendem Artikel nicht behandelt worden sind. Weiter können auch Grundlagendaten (z.B. Veränderung der Oberhöhe oder des  $DGZ_{100}$ ) für die Bonitierung generiert werden, da diese Daten flächig für das gesamte Untersuchungsgebiet vorliegen und nicht nur auf einzelnen Stichproben beruhen. Voraussetzung für die beschriebenen Anwendungen ist jedoch, dass die multitemporalen ALS-Daten eine sehr hohe Lagegenauigkeit zueinander aufweisen. Eine solche lässt sich in der Regel mit entsprechender Vorprozessierung erreichen.

3-D-Informationen für forstliche Anwendungen lassen sich nicht nur aus ALS-Daten, sondern auch aus der Korrelation von Stereoluftbildern gewinnen. Luftbilddaten haben den grossen Vorteil, dass sie viel öfter erhoben werden als ALS-Daten. Allerdings können weder Terrainhöhe (DTM) noch Strukturinformationen aus den Luftbildern abgeleitet werden. Um von beiden Datenquellen gleichermaßen profitieren zu können, empfiehlt sich ihre Verknüpfung, wie das u.a. in Hollaus et al (2015a) beschrieben ist. Damit lassen sich auch Kosten sparen. Mit der Kombination der Daten werden flächige Informationen über den Wald in hoher zeitlicher Auflösung (z.B. drei Jahre) verfügbar. In Kombination mit traditionellen terrestrischen Waldinventuren lassen sich damit eine Vielzahl von Fragestellungen

(z.B. Nutzung, Zuwachs, Bonität) beantworten, die sowohl im Rahmen der internationalen Klimaschutzdiskussion und der damit einhergehenden Aspekte des Berichtswesens als auch in der operativen Forstwirtschaft relevant sind. ■

Eingereicht: 5. Oktober 2016, akzeptiert (mit Review): 20. März 2017

## Dank

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des Projekts Advanced\_SAR (EU FP7/2007–2013, grant agreement No. 606971) durchgeführt. Die Daten wurden vom Land Vorarlberg, vom Stand Montafon Forstfonds, vom Bundesforschungszentrum für Wald sowie vom Fürstentum Liechtenstein im Rahmen von unterschiedlichen Forschungsprojekten zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- AWNL (2010)** Liechtensteinisches Landeswaldinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2010. Vaduz: Amt Wald Natur Landschaft. 56 p.
- DORIGO W, HOLLAUS M, WAGNER W, SCHADAUER K (2010)** An application-oriented automated approach for co-registration of forest inventory and airborne laser scanning data. *Int J Remote Sens* 31: 1133–1153.
- EYSN L, HOLLAUS M, SCHADAUER K, PFEIFER N (2012)** Forest delineation based on airborne LIDAR Data. *Remote Sens* 4: 762–783.
- GABLER K, SCHADAUER K (2006)** Methoden der Österreichischen Waldinventur 2000/02. Grundlagen, Entwicklung, Design, Daten, Modelle, Auswertung und Fehlerrechnung. Wien: Bundesforschungs- Ausbildungszentrum für Wald Naturgefahren und Landschaft, BFW-Bericht 135. 132 p.
- HOLLAUS M, DORIGO W, WAGNER W, SCHADAUER K, HÖFLE B ET AL (2009A)** Operational wide-area stem volume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. *Int J Remote Sens* 30: 5159–5175.
- HOLLAUS M, WAGNER W, SCHADAUER K, MAIER B, GABLER K (2009B)** Growing stock estimation for alpine forests in Austria: a robust LiDAR-based approach. *Can J For Res* 39: 1387–1400.
- HOLLAUS M, MANDLBURGER G, PFEIFER N, MÜCKE W (2010)** Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. *Int Arch Photogramm Remote Sens* 38: 221–226.
- HOLLAUS M, EYSN L, KAREL W, PFEIFER N (2013)** Growing stock change estimation using airborne laser scanning data. In: Proc 13<sup>th</sup> International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (SilviLaser 2013), 9–11 Oct 2013, Beijing, China. <http://cstm.cnki.net/stmt/TitleBrowse/KnowledgeNet/LKZY201310001049?db=STMI8515> (8.3.2017).
- HOLLAUS M, EYSN L, SCHADAUER K, BAUERHANSL C (2015A)** Detektion von Veränderungen im Wald mit multitemporaler 3-D-Information aus Airborne Laser Scanning und Stereophotogrammetrie. *Weihenstephan: Zentrum Wald Forst Holz, Forstl Forschungsber München* 214: 111–122.
- HOLLAUS M, EYSN L, MAIER B, PFEIFER N (2015B)** Site index assessment based on multi-temporal ALS data. In: Durrieu S, Véga C, editors. *SilviLaser 2015*, 28–30 Sept 2015, La Grande Motte, France. pp. 159–161.

- HOLLAUS M, PFEIFER N, MANDLBURGER G, INSINNA P (2016)** Baumartenklassifikation mittels multi-temporaler Full-Waveform Laserscanning-Daten. In: Kersten T, editor. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung der DGPF, Bern, Switzerland, pp. 240–250.
- HYYPÄ J, HYYPÄ H, LECKIE D, GOUGEON F, YU X ET AL (2008)** Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *Int J Remote Sens* 29: 1339–1366.
- KANGAS A, EID T, GOBAKKEN T (2014)** Valuation of airborne laser scanning based forest information. In: Maltamo M, Næsset E, Vauhkonen J, editors. *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies*. Dordrecht: Springer. pp. 315–331.
- KRAUS K, PFEIFER N (1998)** Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *J Photogramm Remote Sens* 53: 193–203.
- LEITERER R, MÜCKE W, MORSDORF F, HOLLAUS M, PFEIFER N ET AL (2013)** Operational forest structure monitoring using airborne laserscanning. *Photogramm Fernerkund Geoinf* 3: 173–184.
- LIM K, TREITZ P, WULDER M, ST-ONGE B, FLOOD M (2003)** LIDAR remote sensing of forest structure. *Prog Phys Geog* 27: 88–106.
- NAESSET E (2007)** Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scand J For Res* 22: 433–442.
- NÆSSET E (2014)** Area-based inventory in Norway – from innovation to an operational reality. In: Maltamo M, Næsset E, Vauhkonen J, editors. *Forestry applications of airborne laser scanning: concepts and case studies*. Dordrecht: Springer. pp. 215–240.
- NÆSSET E, GOBAKKEN T, HOLMGREN J, HYYPÄ H, HYYPÄ J ET AL (2004)** Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scand J For Res* 19: 482–499.
- PFEIFER N, MANDLBURGER G, OTEPKA J, KAREL W (2014)** OPALS – a framework for airborne laser scanning data analysis. *Comput Environ Urban Syst* 45: 125–136.
- RESSL C, PFEIFER N, MANDLBURGER G (2011)** Applying 3D affine transformation and least squares matching for airborne laser scanning strips adjustment without Gns/imu Trajectory Data. *ISPRS Workshop Laser Scanning 2011, 29–31 Aug 2011, Calgary, Canada*. pp. 1682–1777.
- SCHIELER K, HAUKE E (2001)** Instruktion für die Feldarbeit. Österreichische Waldinventur 2000/2002. Wien: Forstliche Bundesversuchsanstalt, Dienstabweisung. 199 p.
- TRAN THG, HOLLAUS M, NGUYEN BD, PFEIFER N (2015)** Assessment of wooded area reduction by airborne laser scanning. *Forests* 6: 1613–1627.

## Données de scanner laser aéroporté multitemporelles pour le secteur forestier

Au cours de la dernière décennie, le scanner laser aéroporté (Airborne Laserscanning, ALS) s'est imposé comme source de données appropriée pour la description tridimensionnelle des peuplements forestiers et pour la détermination de paramètres forestiers. Le potentiel de données multitemporelles pour les utilisations forestières est analysé dans cet article. Des données ALS de relevés d'années différentes ont été recherchées pour la détection de surfaces et des volumes exploités, ainsi que pour l'estimation de la bonité. Les essais ont eu lieu dans le Vorarlberg, en Autriche, et démontrent que les exploitations, jusqu'au prélèvement de tiges isolées, ont très bien été reconnues. 20 m<sup>2</sup> s'est avéré être la grandeur minimale adéquate pour les exploitations. Cette surface correspond à la couronne d'arbres dominants ou d'un petit collectif d'arbres. La quantité exploitée annuellement en moyenne a pu être déterminée avec une précision de 96.4%. Les changements de la hauteur dominante qui a été utilisée pour estimer la bonité reflètent très bien la spécificité de la station. De plus, le potentiel de deux jeux de données ALS qui ont été relevés la même année avec des conditions phénologiques différentes est examiné pour différencier les forêts feuillues des forêts résineuses. Ces essais ont eu lieu dans la principauté de Liechtenstein et démontrent que la différenciation des forêts feuillues et des résineuses est possible avec une précision de 92%.

## Multi-temporal airborne laserscanning data for forestry applications

During the last decade airborne laserscanning (ALS) data has been established as a suitable data source for three-dimensional description of forests and for deriving forest parameters. For the study area Vorarlberg, Austria, the potential of multi-temporal ALS data (data from 2004 and 2011) was analyzed for deriving the amount of harvests in terms of area and stem volume. The data were used as well to assess the site index with the aid of the changes in top heights. The analyses have shown that harvested areas could be detected with a minimum mapping unit of 20 m<sup>2</sup>, which corresponds to harvested single trees from the dominant canopy layer. The average amount of harvested stem volume could be estimated with an overall accuracy of 96.4%. The derived changes in top heights clearly reflect the local growth conditions. For the study area Liechtenstein two ALS data sets (leaf-on and leaf-off) were used for the differentiation between coniferous and deciduous forests. Here, an overall accuracy of 92% could be achieved.