

# Baumartenklassifikation mittels multi-temporalen Full-Waveform Laserscanning-Daten

MARKUS HOLLAUS<sup>1</sup>, NORBERT PFEIFER<sup>1</sup>, GOTTFRIED MANDLBURGER<sup>1</sup> & PATRICK INSINNA<sup>2</sup>

*Zusammenfassung: Flugzeuggetragene Laserscanning- (ALS) Daten haben sich im letzten Jahrzehnt als geeignete Datenquelle zur dreidimensionalen Beschreibung von Waldbeständen als auch für die Ableitung von Forstparametern etabliert. In diesem Beitrag werden multi-temporale Full-Waveform (FWF) ALS-Daten für die Unterscheidung von Laub- und Nadelwald analysiert. Auf Einzelbaum- sowie auf Rasterniveau werden die Unterschiede in der vertikalen Punktverteilung als auch die Veränderung der FWF-Attribute als Grundlage für eine Baumartenklassifizierung herangezogen. Speziell werden auch Parameter vorgestellt, die als Differenzen oder Verhältnisse berechnet werden. Damit kann die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen, auch nicht kalibrierten Missionen erleichtert werden. Die Analysen wurden im Fürstentum Liechtenstein durchgeführt und zeigen das große Potential multi-temporaler FWF-ALS-Daten für die Unterscheidung von Nadel- und Laubwald.*

## 1 Einleitung

Flugzeuggetragene Laserscanning Daten haben sich im letzten Jahrzehnt als geeignete Datenquelle zur dreidimensionalen Beschreibung von Waldbeständen (z.B. Waldfläche, Struktur) als auch für die Ableitung von Forstparametern (z.B. Baumhöhen, Holzvorrat) etabliert (HOLLAUS et al. 2009a; HYYPPÄ et al. 2008; LEITERER et al. 2013; LIM et al. 2003; NÆSSET 2007; NÆSSET et al. 2004). Speziell in Berggebieten kommt dem flugzeuggetragenen Laserscanning (engl. Airborne Laserscanning – ALS) als aktive Fernerkundungsmethode eine besondere Bedeutung zu, da einerseits Höheninformation des überschrmtten, oftmals stark reliefierten Geländes als auch der Kronenoberfläche erhalten werden und andererseits topographische Einflüsse (z.B. Abschattung) auf ein Minimum reduziert sind. Aus den ALS Daten lassen sich neben dem hochgenauen digitalen Geländemodell (DGM) Baumhöhen direkt ableiten und stellen somit eine fundamentale Eingangsgröße für die Berechnung vieler Forstparameter (z.B. Bandeshöhen, Stammvolumen, Biomasse) dar. Die Nützlichkeit von ALS Daten für die Forstwirtschaft wurde im letzten Jahrzehnt im Rahmen von wissenschaftlichen Studien und Anwendungsbeispielen eindeutig dargestellt und belegt. So belegen beispielsweise Studien von NÆSSET (2014; 2007) oder KANGAS et al. (2014) die erfolgreiche Einbindung von ALS Daten in operationelle Waldinventuren.

Für die Ableitung forstlicher Parametern aus ALS Daten ist es oftmals sinnvoll eine Stratifizierung in Laub- und Nadelwald und/oder in locker und dicht bestockte Bestände vorzunehmen. Für die Klassifizierung in Laub- und Nadelwald hat sich speziell der Mehrwert

---

<sup>1</sup> TU Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation; Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien  
E-Mail: [Markus.Hollaus; Norbert.Pfeifer]@geo.tuwien.ac.at

<sup>2</sup> Landesverwaltung Fürstentum Liechtenstein, Amt für Umwelt, Dr. Grass-Straße 12, Postfach 684, 9490 Vaduz; E-Mail: Patrick.Insinna@llv.li

von Full-Waveform (FWF) ALS-Daten als hilfreich erwiesen (BRANDTBERG 2007; HOLLAUS et al. 2009b; KIM et al. 2009; REITBERGER et al. 2006). Neben der höheren Anzahl gemessener Echos pro Schuss und dem verringerten Mindestabstand aufeinanderfolgender Echos, liefert das FWF-ALS besonders zusätzliche Attribute pro Echo (z.B. Echobreite, Amplitude, Rückstreuquerschnitt).

Ziel des vorliegenden Beitrages ist es, die Möglichkeiten von multi-temporalen (belaubt und laublos) FWF-ALS-Daten für die Unterscheidung von Laub- und Nadelwald zu analysieren. Die Untersuchung analysiert i) den Unterschied zwischen einem Einzelbaum-basierten und einem flächigen Ansatz, ii) Parameter der (geometrischen) Punktverteilung und Parameter aus den FWF-Attributen, und iii) deren Änderung aufgrund der Phänologie. Die Untersuchungen werden im Fürstentum Liechtenstein durchgeführt.

Im folgenden Kapitel 2 werden sowohl das Untersuchungsgebiet als auch die verwendeten Daten beschrieben. Im Kapitel 3 werden die angewandten Methoden zur Vorprozessierung der ALS-Daten und zur Klassifizierung von Laub- und Nadelwald beschrieben. Im Kapitel 4 werden Ergebnisse präsentiert und diskutiert. Abschließend werden in Kapitel 5 eine Zusammenfassung und ein Ausblick gegeben.

## **2 Untersuchungsgebiet und Daten**

### **2.1 Untersuchungsgebiet**

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Fürstentum Liechtenstein mit einer Fläche von ca. 160 km<sup>2</sup>. Das Untersuchungsgebiet ist geprägt durch den Hauptsiedlungsraum im Rheintal im Westen und der Hochgebirgslandschaft des Rätikon im Osten. Die Landesfläche lässt sich in ca. 11% Siedlungsraum, 33% landwirtschaftlicher Nutzflächen, ca. 41% Wald und ca. 15% unproduktiver Flächen einteilen. Basierend auf der dritten Erhebung der Landeswaldinventur befinden sich 42% des Waldes unter 1000 m Seehöhe und 58% über 1000 m Seehöhe. Der mittlere Holzvorrat liegt bei 409 m<sup>3</sup>/ha und setzt sich aus 77% Nadelholz und 23% Laubholz zusammen. Hinsichtlich des Holzvorrates sind die dominierenden Baumarten die Fichte mit 54% und die Buche mit 11%. In Abb. 1 ist ein aus ALS Daten abgeleitetes Kronenhöhenmodell für das gesamte Untersuchungsgebiet mit den dazugehörigen ALS Flugtrajektorien abgebildet.

### **2.2 Daten**

#### **2.2.1 ALS-Daten**

Die Landesfläche wurde mit zwei ALS Kampagnen am 15. April sowie am 26. August 2015 von der Fa. TopScan GmbH befliegen. Die Aprilbefliegung deckt die Tallagen bis 1000 m Seehöhe ab und erfolgte unter laubfreien Bedingungen. Die Augustbefliegung umfasst die Gebirgszonen mit belaubten Vegetationsstand und schneefreier Topographie. Der Überlappungsbereich der beiden Befliegungen beschränkt sich auf wenige ALS Streifen (vergl. Abb. 1). Beide Befliegungen erfolgten mit einem Full-Waveform ALS Scanner (LiteMapper 7800 – Riegl LMS-Q780) mit einer Mindestpunktdichte von 4 First-Pulse Punkten pro m<sup>2</sup>. Die mittlere Flughöhe über Grund betrug 800 m mit einem Scanwinkel von  $\pm 30^\circ$ . Die ALS-Daten wurden in bereits georeferenzierter Form als klassifizierte Streifendaten zur Verfügung gestellt.

## 2.2.2 Waldinventurdaten

Vom Amt für Umwelt der Landesverwaltung Fürstentum Liechtenstein wurden 54 voll kluppierte ca. 700 m<sup>2</sup> große Probekreisflächen zur Verfügung gestellt. Für jede Probefläche wurden die Positionen der Einzelbäume, deren Brusthöhendurchmesser, Baumhöhen als auch Baumarten erhoben. Der mittlere Holzvorrat der 54 Stichproben liegt bei 267 m<sup>3</sup>/ha mit einer Standardabweichung von 190 m<sup>3</sup>/ha. Die mittlere Baumhöhe der 998 Probestämme beträgt 17.8 m (Std.Abw.=6.7 m), der mittlere Brusthöhendurchmesser (BHD) 30.3 cm (Std.Abw.=15.9 cm). Für die Validierung der aus den ALS-Daten generierten Laub-Nadelwaldkarte kann der Grundflächen gewichtete Nadel- / Laubholzanteil der Stichproben herangezogen werden.

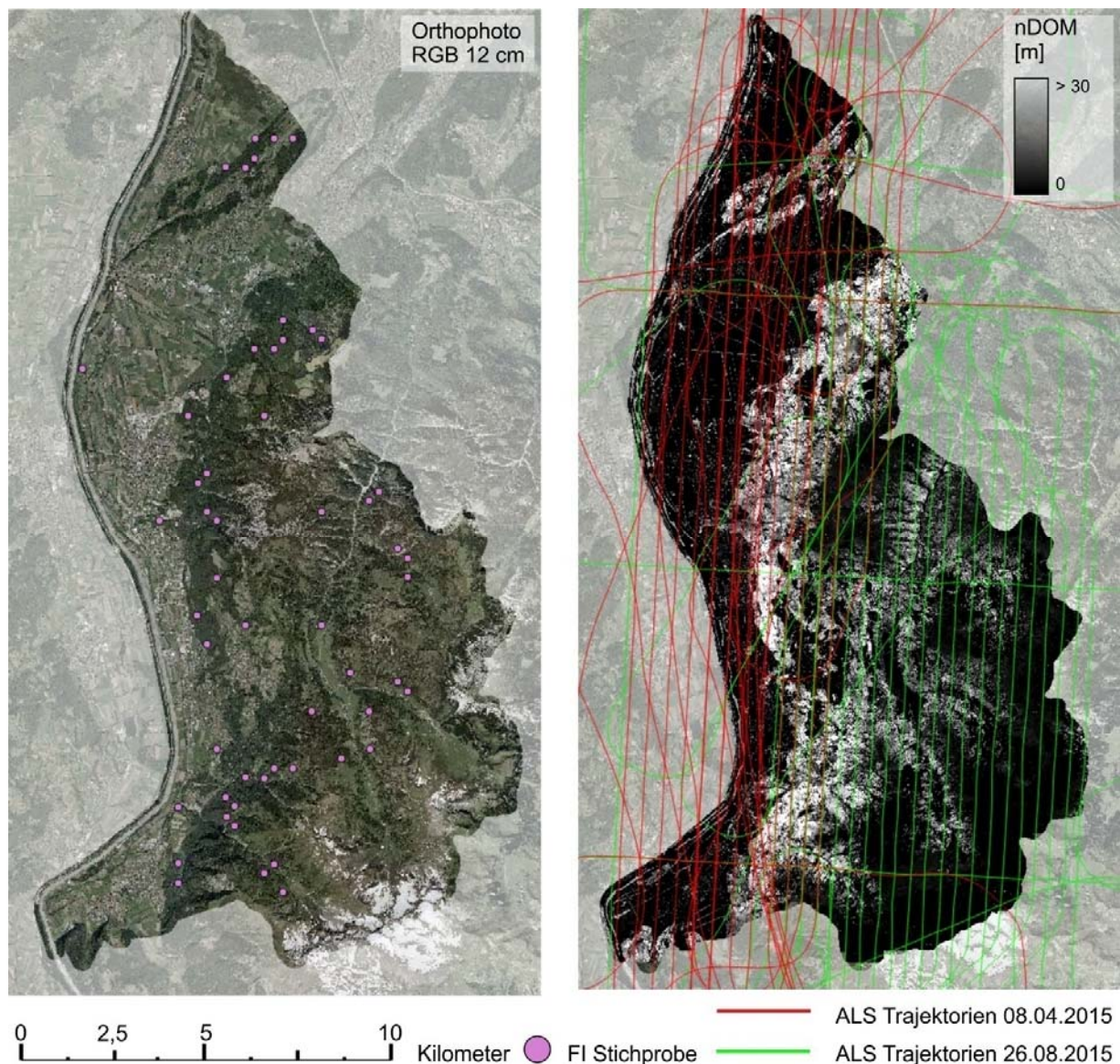


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Fürstentum Liechtenstein. Abgebildet ist das RGB Orthophoto überlagert mit den Waldinventurstichproben (links) sowie das Kronenhöhenmodell überlagert mit den ALS Flugtrajektorien (rechts).

### 3 Methoden

Ausgehend von den georeferenzierten Punktwolken wurde zunächst die Qualität der Georeferenzierung mittels Streifendifferenzen überprüft. Da die mittlere Streifendifferenz von Boden und Dachflächen größtenteils  $< \pm 20$  cm beträgt wurde auf eine zusätzliche rigorose Streifenausgleichung verzichtet.

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden die angewandten Methoden für die Ableitung der topographischen Modelle, der Waldabgrenzung und auch der Klassifizierung in Nadel- und Laubwald beschreiben.

#### 3.1 Berechnung der topographischen Modelle

Das Geländemodell (DTM) wird aus den klassifizierten Bodenpunkten mittels Delaunay-Triangulierung berechnet und als Raster mit  $1 \times 1 \text{ m}^2$  Zellgröße exportiert.

Für die Ableitung des digitalen Oberflächenmodells (DOM), oftmals auch als Kronenmodelle bezeichnet, werden alle Laserpunkte der Klassen Boden, niedrige-, mittlere- und hohe Vegetation herangezogen. Um eine bestmögliche Vergleichbarkeit der Oberflächenmodelle vom April- und Augustflug zu erzielen, werden diese durch eine einheitliche, landbedeckungsabhängige Berechnungsmethode (HOLLAUS et al. 2010) erstellt. Diese Methode verfolgt einen kombinierten Berechnungsansatz, der abhängig von der Oberflächenrauigkeit das DOM mit dem höchsten Punkt pro Rasterzelle bzw. mit lokal in die Punktwolke eingepassten, gleitenden Schrägebenen (engl. moving planes) zusammensetzt. Die „moving planes“ Interpolation wird dabei auf einen ausgedünnten Datensatz (höchste Punkte innerhalb von  $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$  Zellen) angewandt um sicher zu stellen, dass das interpolierte Modell bestmöglich die Oberfläche der Baumkronen beschreibt. Diese Berechnungsmethode führt speziell in bewaldeten Gebieten im Vergleich zu einer reinen „moving planes“ Interpolation zu einer verbesserten Beschreibung der Baumkronen als auch der Waldlücken. Des Weiteren hat dieser Ansatz speziell bei Datensätzen mit geringer Punktdichte den Vorteil, dass für Bildelement, in denen keine Punkte liegen, durch die „moving planes“ Interpolation mit Hilfe der benachbarten Punkte eine Höheninformation geschätzt werden kann.

Das normalisierte digitale Oberflächenmodell (nDOM) wird durch Subtraktion des DTMs vom DOM berechnet und hat so wie das DTM und das DOM eine Pixelgröße von  $1 \times 1 \text{ m}^2$ .

#### 3.2 Waldabgrenzung

Um das Untersuchungsgebiet nur auf die Waldflächen einzugrenzen, wird eine Waldabgrenzung mit Hilfe der Methode von EYSN et al. (2012) durchgeführt. Dieser Ansatz erlaubt es, Mindestwerte für Baumhöhen, Überschirmungsgrad, Breite und Fläche zu berücksichtigen. Der Überschirmungsgrad wird dabei für jeweils drei benachbarte Bäume ermittelt (= Fläche der konvexen Hülle / Summe der Kronenflächen) (EYSN et al. 2011). Die Position der Einzelbäume wird mittels lokalem Maximafilter anhand des nDOMs berechnet, die Kronenradien werden mittels lokal angepasster Funktionen in Abhängigkeit der Baumhöhe und der Seehöhe geschätzt. Für die vorliegenden Untersuchungen wurden die in Tab. 1 zusammengefassten Mindestwerte angewandt. Die für die Baumartenklassifizierung erforderlichen Analysen werden nur innerhalb der abgegrenzten Waldfläche durchgeführt.

Tab. 1: Angewandte Parameter für die Waldabgrenzung

Parameter	Baumhöhe	Fläche	Breite	Überschirmungsgrad
Mindestwerte	≥3.0 m	≥250 m <sup>2</sup>	≥5.0 m	≥10%

### 3.3 Baumartenklassifizierung

Aufgrund der Tatsache, dass die ALS-Befliegungen der Tallagen unter laublosen Bedingungen (April) und jene der Gebirgsregionen unter belaubten Zustand (August) erfolgten, werden die Eingangsdaten für die Klassifizierung für beide Datensätze getrennt berechnet.

Generell orientiert sich der Klassifikationsansatz an den geometrischen und radiometrischen Rückstreuungseigenschaften des Laserlichts und der vertikalen Punktverteilung für Nadel- und Laubwald sowie deren Veränderungen zwischen belaubten und unbelaubten Zustand.

Tab. 2: Berechnete FWF ALS Parameter. Die Berechnungen werden für Rasterzellen als auch Einzelbaumkronen durchgeführt.

Parameter	Beschreibung
EW <sub>veg-top</sub> [ns]	Durchschnittliche Echobreite aller Vegetations-Echos der obersten Kronenschicht (DOM - 1.0 m)
EW <sub>diff-veg-top</sub> [ns]	EW <sub>veg-top</sub> (August) - EW <sub>veg-top</sub> (April)
A <sub>ratio-last</sub> [%]	100 * (Summe der Amplituden aller last Echos in der Bodenschicht (nDOM < 0.3 m)) / (Summe der Amplituden aller last Echos)
A <sub>ratio-first</sub> [%]	100 * (Summe der Amplituden aller first Echos in der Bodenschicht (nDOM < 0.3 m)) / (Summe der Amplituden aller first Echos)
A <sub>ratio-veg-ground</sub> [%]	100 * (Summe der Amplituden aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m)) / (Summe der Amplituden aller Bodenechos (nDOM < 0.3 m))
R <sub>first</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller first Echos
R <sub>last</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller last Echos
R <sub>all</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller Echos
R <sub>veg</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller Vegetations-Echos (nDOM > 1.5 m)
R <sub>ground</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller Boden-Echos (nDOM < 0.3 m)
R <sub>veg-top</sub> [dB]	Durchschnittliche Reflektivität aller Vegetations-Echos der obersten Kronenschicht (DOM - 1.0 m)
R <sub>diff-veg-top</sub> [dB]	R <sub>veg-top</sub> (August) - R <sub>veg-top</sub> (April)
E <sub>ratio-first</sub> [%]	100 * (Summe der Energie (= Amplitude * Echobreite) aller first Echos in der Bodenschicht (nDOM < 0.3 m)) / (Summe der Energie aller first Echos)
E <sub>ratio-last</sub> [%]	100 * (Summe der Energie (= Amplitude * Echobreite) aller last Echos in der Bodenschicht (nDOM < 0.3 m)) / (Summe der Energie aller last Echos)
E <sub>ratio-veg-ground</sub> [%]	100 * (Summe der Energie aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m)) / (Summe der Energie aller Bodenechos (nDOM < 0.3 m))
HQ <sub>90</sub> [m]	90-stes Höhenquantil aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m)
HQ <sub>50</sub> [m]	50-stes Höhenquantil aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m)
HQ <sub>ratio-90-50</sub> [%]	100 * HQ <sub>50</sub> / HQ <sub>90</sub>
HQ <sub>diff-50</sub> [m]	HQ <sub>50</sub> (August) - HQ <sub>50</sub> (April)
D <sub>vegtop-veg</sub> [%]	100 * (Anzahl der Echos in der obersten Kronenschicht (DOM - 1.0 m)) / (Anzahl aller Vegetationsechos (nDOM > 1.5 m))
D <sub>veg-ground</sub> [%]	100 * (Anzahl der Echos in der Vegetationsschicht (nDOM > 1.5 m)) / (Anzahl aller Bodenechos (nDOM < 0.3 m))
D <sub>diff-veg-ground</sub> [%]	D <sub>veg-ground</sub> (August) - D <sub>veg-ground</sub> (April)

Die Klassifizierung wird sowohl auf Rasterniveau mit einer Zellgröße von  $9 \times 9 \text{ m}^2$  als auch auf Einzelbaumniveau durchgeführt. Die hierfür erforderlichen Einzelbäume werden anhand der 3D Punktwolke mittels lokaler Maximasuche (Suchradius = 1.5 m) detektiert (siehe auch Abschnitt 3.2, dort jedoch im Raster). Für die Analysen auf Einzelbaumniveau werden die ALS-Punkte rund um die gefundenen Einzelbaumpositionen in einem Suchzylinder mit einem Radius von 2 m analysiert. Die in Tab. 2 beschriebenen Parameter werden aus den FWF-ALS-Daten berechnet und dienen als Eingangsgrößen für die Klassifizierung in Nadel- und Laubwald.

Die Klassifizierung in Nadel- und Laubwald erfolgt mit einem Entscheidungsbaum. Die Auswahl der Parameter und deren Schwellwerte erfolgt anhand einer visuellen Analyse der FWF-ALS-Parameter unter Einbeziehung eines NIR-Orthophotos in welchem Laub- und Nadelwald gut differenzierbar sind.

## 4 Ergebnisse und Diskussion

In Abb. 2 ist eine Auswahl an Raster-basierten FWF-ALS-Parametern dargestellt. Als visuelle Orientierungshilfe für die Unterscheidung von Laub- und Nadelwald steht ein NIR-Orthophoto von 2001 zur Verfügung. In der Reflektivität des Aprilfluges ( $R_{\text{veg-top-April}}$ ) lassen sich Laub- und Nadelwald erwartungsgemäß sehr gut unterscheiden. Dabei weist der Nadelwald deutlich höhere Werte auf als der Laubwald, da dieser im April noch großteils laublos war. Ein gänzlich anderes Bild zeigt sich in der Reflektivität des Augustfluges ( $R_{\text{veg-top-August}}$ ). Hier zeichnet sich der Laubwald aufgrund seines dichten Blätterdaches und der damit einhergehenden hohen Reflektivität im nahen Infrarot aus. Die Differenz der beiden Reflektivitäten ( $R_{\text{veg-top-August}} - R_{\text{veg-top-April}}$ ) eignet sich daher auch sehr gut für die Differenzierung in Laub- und Nadelwald. Da für die Berechnung dieser Reflektivitäten nur Echos aus der obersten Kronenschicht verwendet wurden gibt es keinen Einfluss der Boden- bzw. bodennahen Vegetation. Ein weiteres Kriterium für die Unterscheidung in Laub- und Nadelwald stellt die vertikale Punktverteilung, repräsentiert als 50-% Höhenquantil aller Vegetationsechos, dar. Dabei sind die Änderungen ( $HQ_{50\text{-August}} - HQ_{50\text{-April}}$ ) im Nadelwald sehr gering, wohingegen im Laubwald eine Erhöhung des  $HQ_{50}$  um z.T. mehrere Meter auftritt. Schlussendlich wurde noch die Veränderung der vertikalen Punktdichteverteilung in der Vegetationsschicht zwischen belaubten und unbelaubten Zustand ( $D_{\text{vegtop-veg-August}} - D_{\text{vegtop-veg-April}}$ ) 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. Die Amplituden-Ratio Werte weisen ebenso wie die Reflektivitäten eine gute Trennbarkeit zwischen den beiden Klassen auf und stellen eine interessante Alternative zu den kalibrierten Reflektivitäten dar. Dies gilt speziell für diskrete ALS Daten bei denen im Regelfall keine kalibrierten Reflektivitäten vorliegen. Die Parameter basierend auf Echobreiten zeigen für dieses Untersuchungsgebiet keine deutliche Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwald.

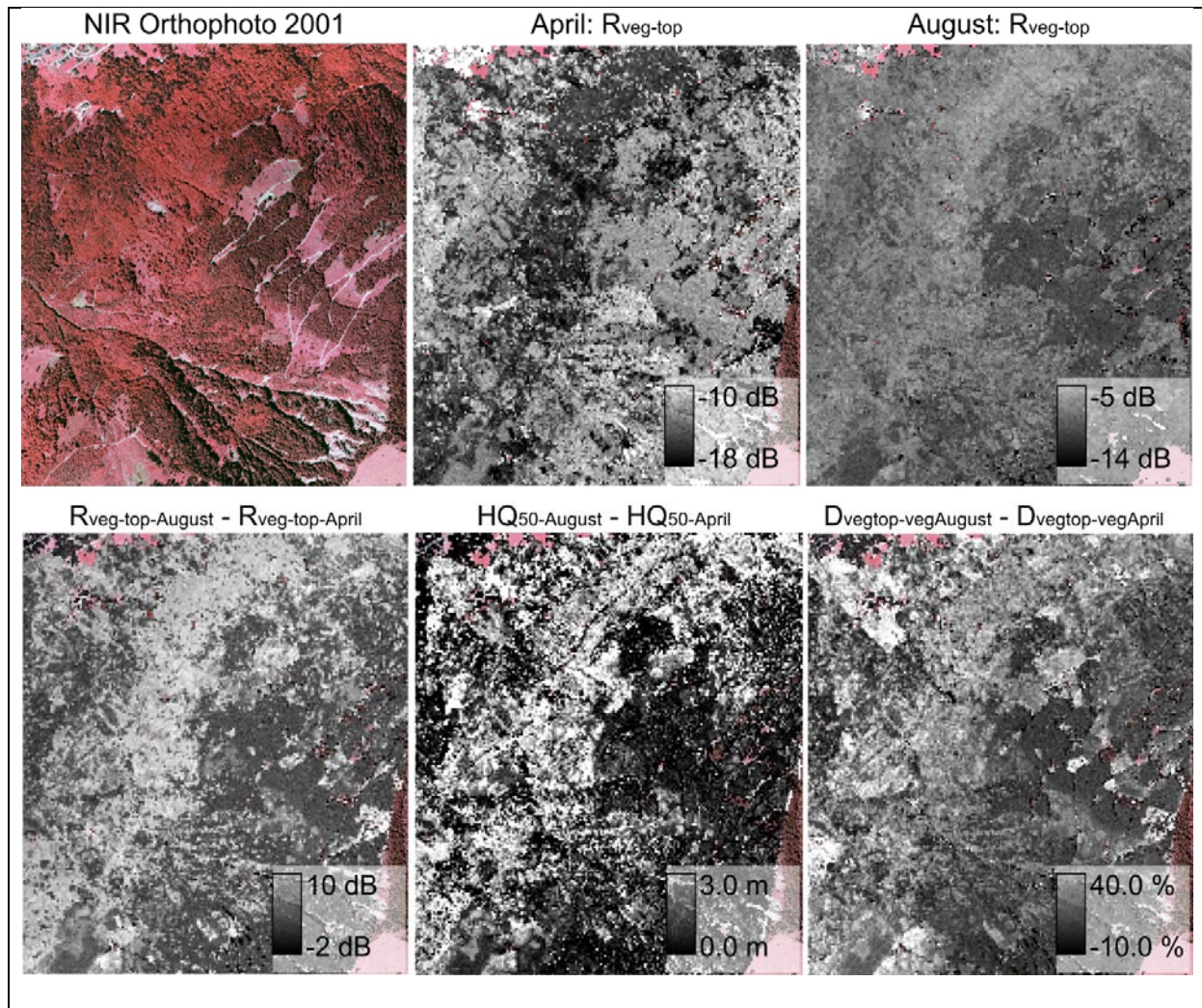


Abb. 2: Rasterbasierte FWF-ALS-Parameter (Zellgröße  $9 \times 9$  m<sup>2</sup>). Die Ausdehnung des Ausschnittes beträgt  $1600 \times 1900$  m<sup>2</sup>.

In Abb. 3 sind ausgewählte Parameter für einzelnen Baumkronen dargestellt. Um den Detailierungsgrad des Einzelbaum-basierten Ansatzes zu verdeutlichen wurde in Abb. 3 nur der südliche Teil von Abb. 2 vergrößert dargestellt. Im Allgemeinen zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Raster-basierten Ansatz. Im Detail zeigt sich jedoch, dass die Reflektivitätswerte eine bessere Trennung als die Änderung der Höhenquantilen (HQ<sub>50</sub>-August – HQ<sub>50</sub>-April) oder der Änderung der vertikalen Punktdichteverteilung in der Vegetationsschicht zwischen belaubten und unbelaubten Zustand (D<sub>vegtop-veg</sub>-August – D<sub>vegtop-veg</sub>-April) ermöglichen. Dies kann durch die robustere Abschätzung der Quantilenwerte und der Punktdichteverteilungen beim Raster-basierten Ansatz erklärt werden.

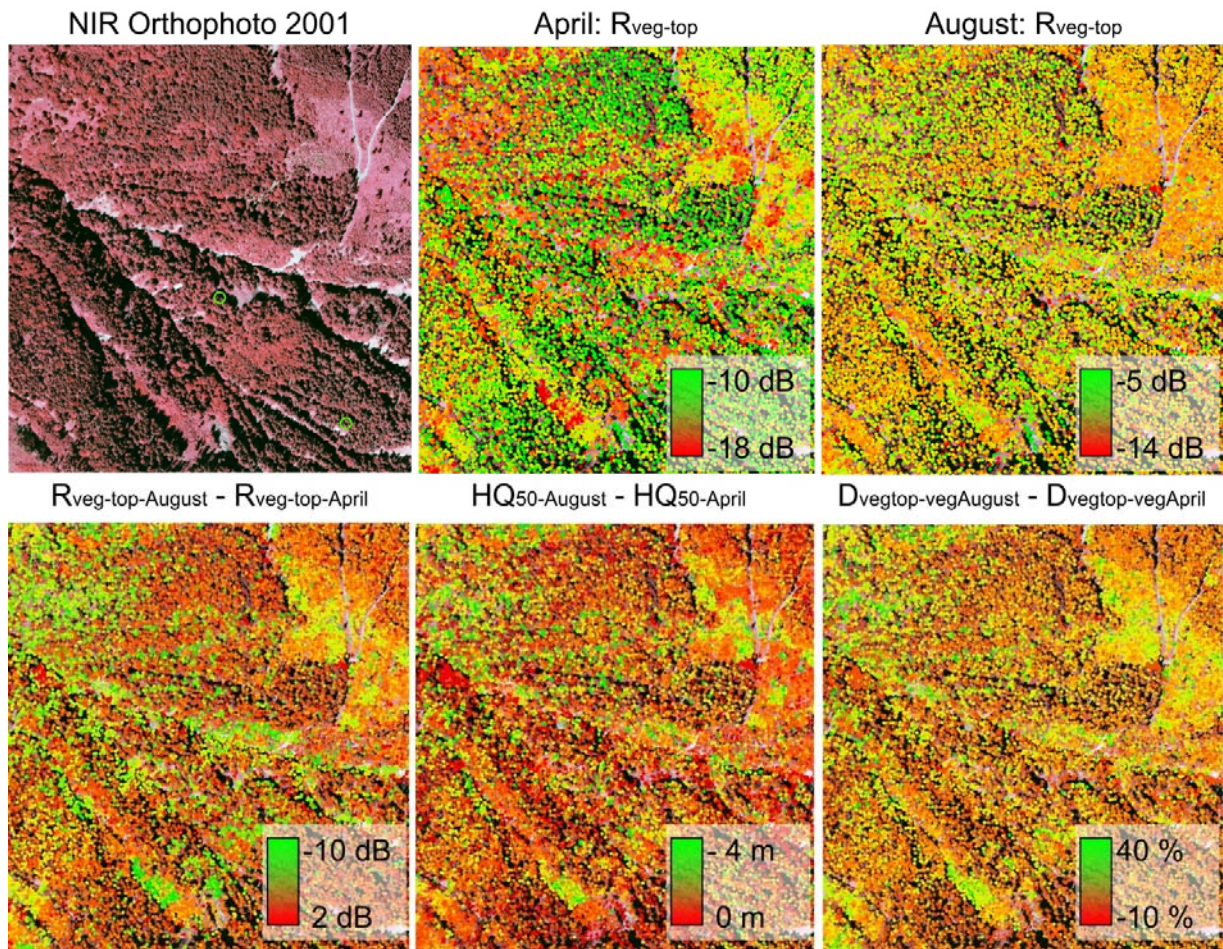


Abb. 3: Einzelbaumbasierte FWF-ALS-Parameter (Kronengröße  $\varnothing$  4 m). Die Ausdehnung des Ausschnittes beträgt  $1285 \times 815 \text{ m}^2$ .

Die durchgeführte wissensbasierte Entscheidungsbaumklassifizierung liefert sowohl für den Raster- als auch für den Einzelbaumbasierten Ansatz sehr gute Ergebnisse. Der visuelle Vergleich des Klassifikationsergebnisses mit dem NIR-Orthophoto zeigt eine hohe Übereinstimmung. Zu beachten ist dabei, dass das vorliegende NIR-Orthophoto aus dem Jahr 2001 ist und es speziell im westlichen sowie südwestlichen Bereich des Ausschnitts in Abb. 4 zu Aufforstungen gekommen ist. Von den restlichen Waldflächen kann davon ausgegangen werden, dass es in den Jahren zwischen 2001 und 2015 zu keinen wesentlichen Änderungen der Laub-Nadelwaldverteilung gekommen ist. Die in diesem ersten Testgebiet liegenden vier FI Stichproben (siehe Abb. 4) bestätigen die hohe Genauigkeit der Klassifizierung, lassen jedoch auf der zu geringen Anzahl an FI Stichproben noch keine statistischen Aussagen zu.



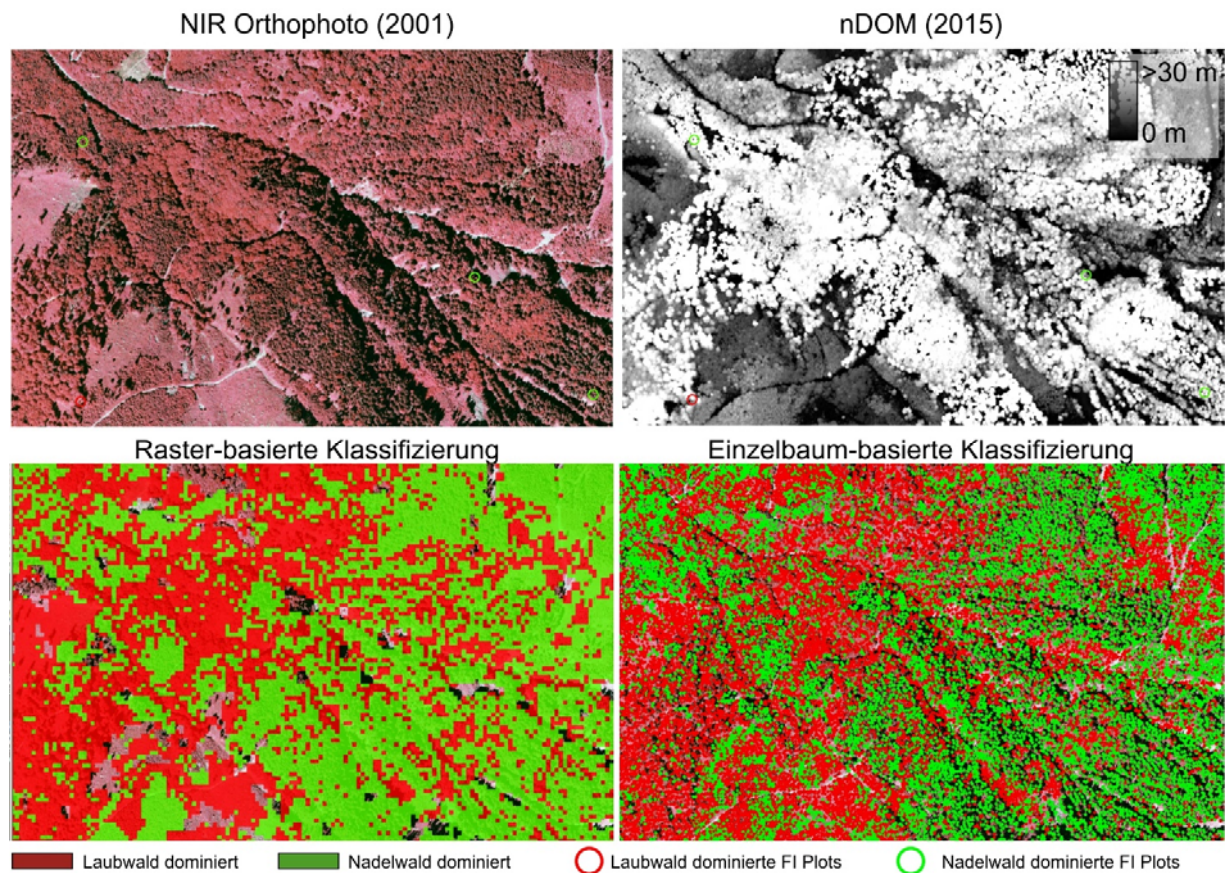


Abb. 4: Raster- und Einzelbaumbasierte Laub- Nadelwaldklassifizierung. Die Ausdehnung des Ausschnittes beträgt  $1175 \times 335 \text{ m}^2$ .

## 5 Fazit & Ausblick

In der Untersuchung wurden FWF-Parameter aus ALS über Vegetation untersucht. Speziell wurden auch Parameter vorgestellt, die als Differenzen oder Verhältnisse berechnet werden. Damit sollte die Übertragbarkeit zwischen verschiedenen, auch nicht kalibrierten Missionen erleichtert werden. Die für die Klassifizierung herangezogenen radiometrischen und geometrischen Parameter, sowie deren Veränderungen aufgrund der Änderung der Phänologie, haben sich für die Unterscheidung in Laub- und Nadelwald als sehr nützlich erwiesen. Die Untersuchungen haben ebenso gezeigt, dass mit Hilfe Einzelbaum-basierter Verfahren eine deutlich höhere räumliche Auflösung erzielbar ist. Demgegenüber stehen jedoch deutlich längere Rechenzeiten für die Ermittlung der FWF-ALS-Parameter. Die abgeleitete Baumartenkarte dient als Stratifizierungsgrundlage für die Ableitung weiterer forstlicher Parameter wie z.B. dem Holzvorrat. Die beschriebenen Analysen werden in einem nächsten Schritt auf die Gesamtfläche Liechtensteins ausgeweitet. Damit können anhand der vorhandenen Forstinventur-Stichproben statistische Genauigkeitsanalysen durchgeführt werden.

## 6 Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden im Rahmen des EU FP7/2007-2013 Projekts Advanced\_SAR (grant agreement No. 606971) durchgeführt.

## 7 Literaturverzeichnis

- BRANDTBERG, T., 2007: Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* **61**, 325-340.
- EYSN, L., HOLLAUS, M., SCHADAUER, K. & RONCAT, A., 2011: Crown coverage calculation based on ALS data. 11<sup>th</sup> International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems (Silvilaser 2011), **1620**, Hobart, Australia, Oct. 16-20, 10.
- EYSN, L., HOLLAUS, M., SCHADAUER, K. & PFEIFER, N., 2012: Forest Delineation Based on Airborne LIDAR Data. *Remote Sensing* **4** (3), 762-783.
- HOLLAUS, M., DORIGO, W., WAGNER, W., SCHADAUER, K., HÖFLE, B. & MAIER, B., 2009a: Operational wide-area stem volume estimation based on airborne laser scanning and national forest inventory data. *International Journal of Remote Sensing* **30** (19), 5159-5175.
- HOLLAUS, M., MÜCKE, W., HÖFLE, B., DORIGO, W., PFEIFER, N., WAGNER, W., BAUERHANSL, C. & REGNER, B., 2009b: Tree species classification based on full-waveform airborne laser scanning data. *Silvilaser 2009*, October 14-16, College Station, Texas, USA, 54-62.
- HOLLAUS, M., MANDLBURGER, G., PFEIFER, N. & MÜCKE, W., 2010. Land cover dependent derivation of digital surface models from airborne laser scanning data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **38** (3A), 221-226.
- HYYPÄ, J., HYYPÄ, H., LECKIE, D., GOUGEON, F., YU, X. & MALTAMO, M., 2008: Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* **29** (5), 1339-1366.
- KANGAS, A., EID, T. & GOBAKKEN, T., 2014: Valuation of Airborne Laser Scanning Based Forest Information. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*, M. Maltamo, E. Næsset and J. Vauhkonen (Editors), Springer Netherlands, 315-331.
- KIM, S., MCGAUGHEY, R.J., ANDERSEN, H.-E. & SCHREUDER, G., 2009: Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* **113** (8), 1575-1586.
- LEITERER, R., MÜCKE, W., MORSDORF, F., HOLLAUS, M., PFEIFER, N. & SCHAEPMAN, M., 2013: Operational forest structure monitoring using airborne laserscanning. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* **3**, 173-184.
- LIM, K., TREITZ, P., WULDER, M., ST-ONGE, B. & FLOOD, M., 2003: LIDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* **27** (1), 88-106.
- NÆSSET, E., 2014: Area-Based Inventory in Norway – From Innovation to an Operational Reality. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*, M. Maltamo, E. Næsset and J. Vauhkonen (Editors), Springer Netherlands, 215-240.

- NAESSET, E., 2007: Airborne laser scanning as a method in operational forest inventory: Status of accuracy assessments accomplished in Scandinavia. *Scandinavian Journal of Forest Research* **22** (5), 433-442.
- NÆSSET, E., GOBAKKEN, T., HOLMGREN, J., HYYPPÄ, H., HYYPPÄ, J., MALTAMO, M., NILSSON, M., OLSSON, H., PERSSON, Å. & SÖDERMAN, U., 2004: Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* **19** (6), 482-499.
- REITBERGER, J., KRZYSZEK, P. & HEURICH, M., 2006: Full-waveform analysis of small footprint airborne laser scanning data in the Bavarian forest national park for tree species classification. *International Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, Vienna, Austria, 14-15. Feb.*, 218-227.