

3D Vegetationskartierung: flugzeuggestütztes Laserscanning für ein operationelles Waldstrukturmonitoring

R. Leierer⁽¹⁾, F. Morsdorf⁽¹⁾, M.E. Schaepman⁽¹⁾, W. Mücke⁽²⁾, N. Pfeifer⁽²⁾, M. Hollaus⁽²⁾

⁽¹⁾ Remote Sensing Laboratories, Department of Geography, University of Zurich, Winterthurerstrasse 190, 8057 Zurich, Switzerland, Email: reik.leierer, felix.morsdorf, michael.schaepman@geo.uzh.ch

⁽²⁾ Institute of Photogrammetry and Remote Sensing, Vienna University of Technology, Gusshausstrasse 27-29, 1040 Vienna, Austria, Email: wm, np, mh@ipf.tuwien.ac.at

Zusammenfassung

Wälder bedecken nahezu ein Drittel der globalen Landoberfläche und haben neben dem signifikanten Einfluss auf die globalen biogeochemischen Stoffkreisläufe und den Erhalt der Biodiversität auch eine bedeutende Rolle im Rahmen der Diskussionen um erneuerbare Energien. Fernerkundungsdaten und -methoden bieten hierbei die Möglichkeit für eine flächendeckende und sowohl räumlich als auch zeitlich hochaufgelöste Erfassung von Waldstrukturparametern. Im Rahmen des „3D-VegetationLab“ - Projektes der ESA wurde ein robustes Verfahren entwickelt, um eine Extraktion von forstwirtschaftlich und -wissenschaftlich relevanten Strukturvariablen zu ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer entsprechenden Datengrundlage die entwickelte Methodik auch für großflächige und operationelle Anwendungsbereiche (z.B. nationale Forstinventuren) sehr gut geeignet ist. Im Vergleich zu traditionellen Ansätzen wird hierbei eine signifikant verbesserte Beschreibung räumlich expliziter Waldstrukturinformationen bei einem deutlich geringeren Zeitaufwand erreicht.

1 Einleitung

Um die Ökosystemgüter und -leistungen von Wäldern zu bestimmen, sie zu verstehen und darauf aufbauend eine Quantifizierung zu ermöglichen, bedarf es robuster und operationeller Methoden des Waldmonitorings. Diese ermöglichen sowohl die Entwicklung von flächendeckenden und nachhaltigen Managementstrategien als auch Projektionen über die Entwicklung des Ökosystems Wald unter sich veränderten klimatischen Bedingungen [Hardiman et al. 2011, Jonsson & Wardle 2010, Sierra et al. 2009, Gough et al. 2008, Purves & Pacala 2008].

Speziell die komplexe 3-dimensionale Verteilung von Objekten und deren Topologie innerhalb der Waldkrone (Kronenstruktur) beeinflusst den Stoffaustausch zwischen Wald und Atmosphäre und ist darüber hinaus ein bedeutender Indikator, um den Gesundheitszustand des Waldes zu bestimmen und das Potential zum Erhalt der Waldbiodiversität abzuschätzen [Xue et al. 2011, Nadkarni et al. 2008, Disney et al. 2006, Yang & Friedl 2003].

Die Erhebung von Strukturvariablen war bisher mit verschiedenen Problemen verbunden: Die konventionelle Erhebung im Gelände (z.B. Forstinventur) ist sehr zeitintensiv, zum Teil subjektiv und in der räumlichen Ausdehnung eingeschränkt, weshalb häufig auf ein Stichprobenverfahren zurückgegriffen wird [Foody 2010, Haara & Leskinen 2009, Strand et al. 2002]. Bisherige Fernerkundungsmethoden hingegen sind zwar flächendeckend verfügbar aber waren nur bedingt geeignet, um Informationen über die vertikale Struktur abzuleiten [Jones et al. 2012, Hall et al. 2011, Wulder et al. 2008, Roberts et al. 2007].

In den letzten Jahren sind zunehmend hochaufgelöste, flugzeuggestützte Laserscanning - Daten (Airborne Laser Scanning - ALS) verfügbar geworden, deren Anwendbarkeit in Hinblick auf die

Erfassung sowohl horizontaler als auch vertikaler Strukturparameter bereits in mehreren Studien nachgewiesen wurde [Zhao et al. 2011, Leeuwen & Nieuwenhuis 2010, Koch 2010, Neuenschwander et al. 2009, Wagner et al. 2008]. Die in diesen Studien ermittelten Strukturparameter umfassen hierbei sowohl geometrische Variablen wie zum Beispiel die Baumhöhe, das Kronenvolumen oder der Kronendurchmesser [Kaartinen et al. 2012, Lindberg et al. 2012, Adams et al. 2011, Reitberger et al. 2009] als auch biophysikalische Variablen wie z.B. Blattflächenindex oder Kronenschlussgrad [Hilker et al. 2010, Morsdorf et al. 2009] und Holzvorrat [Lindberg & Hollaus 2012].

Eine Übertragung der bisher entwickelten Ansätze und die Integration der Ergebnisse in die Forstinventur findet hierbei zwar vereinzelt Anwendung, aber der Einsatz bestehender ALS - Methoden für großflächige (landesweite) Anwendungen ist nach wie vor nur bedingt möglich. Dies ist unter anderem dadurch bedingt, dass je nach Untersuchungsgebiet die Waldstrukturen signifikant voneinander abweichen (z.B. Baumartenzusammensetzung, Bestandesdichten), die entsprechende Datengrundlage nicht zur Verfügung steht oder umfangreiches Vorwissen (z.B. Baumarten, Bestandesdichte) und manuelle Datenbearbeitungsschritte für die Ableitung der Strukturparameter notwendig ist [Antonarakis et al. 2011, Korpela et al. 2010, Kim et al. 2009].

Im Rahmen des „3D-VegetationLab“ - Projektes der ESA wurde deshalb ein robustes Verfahren entwickelt, um eine physikalisch basierte Extraktion von forstwirtschaftlich und -wissenschaftlich relevanten Strukturvariablen unter Verwendung von ALS Daten zu ermöglichen.

2 Daten und Untersuchungsgebiet

Um die Methodik zu entwickeln, standen *full-waveform* ALS Daten zur Verfügung. Die entsprechenden Aufnahmen erfolgten zum einen im Frühjahr unter unbelaubten Bedingungen (mit dem RIEGL[®] LMS-Q560 Scanner) und zum anderen im Sommer, um den Zustand nach der vollständigen Blattentwicklung zu erfassen (mit dem RIEGL[®] LMS-Q680i Scanner). Tabelle 1 zeigt hierbei die jeweiligen Aufnahme- und Sensorspezifikationen [Lemmens 2009, Wagner et al. 2008, Hug et al. 2004].

Tabelle 1: Aufnahme- und Sensorspezifikationen für die jeweiligen ALS Befliegungen.

	LMS-Q560	LMS-Q680i
Wellenlänge [nm]		1550 nm
Scan-Methode		rotierender Spiegelscanner
Pulsenergie [μ J]		8 μ J
Pulslänge [ns]		< 4 ns
Pulsfrequenz [Hz]		200 000 Hz
Puls Abtastfrequenz		1 GHz
Puls Aufnahme		<i>full-waveform</i>
Puls Sampling Intervall [ns]		1 ns
Abtastwinkel [°]		$\pm 15^\circ$
Mittlere Flughöhe über Grund [m]		500 m
Mittlere Footprint in Nadir [m]		0.25 m
Mittlere Punktdichte [Pkte./m ²]	20 Pkte./m ²	40 Pkte./m ²
Höhengenauigkeit [m]	≤ 0.15 m	≤ 0.15 m
Planimetrische Genauigkeit [m]	≤ 0.10 m	≤ 0.10 m
Aufnahmedatum/-zeit	10.04.2010 (12:37 - 14:05 Uhr)	01.08.2010 (12:46 - 14:29 Uhr)

Die aufgenommenen Rohdaten wurden dahingehend bearbeitet, dass für die nachfolgenden Untersuchungen eine Punktwolke zur Verfügung stand, in der jeder Punkt eine exakte räumliche Position hat (X, Y, Z – Koordinate) und zusätzlich über die aus der *full-waveform* Analyse resultierenden Attribute *Echo-Amplitude*, *Echo-Breite* und *Intensität* charakterisiert wurde. Ausführlichere Informationen über die Bearbeitung der Rohdaten und die daraus abgeleiteten Attribute finden sich hierbei in Heinzl & Koch 2011, Mallet & Bretar 2009, Wagner et al. 2006 und Persson et al. 2005. Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Ausschnitt aus der generierten Punktwolke.

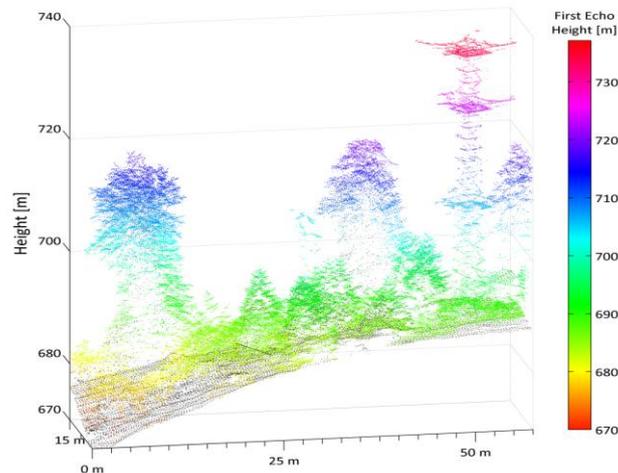


Abbildung 1: Ausschnitt der aus den ALS Rohdaten generierten Punktwolke.

Für die Evaluierung und Validierung der abgeleiteten Strukturparameter stand ein umfangreicher Referenzdatensatz zur Verfügung: räumlich hochaufgelöste Ortho-Fotos, digitale hemisphärische Fotografien, Daten von terrestrischem Laserscanning (TLS – Z+F IMAGER[®] 5006), Informationen der Forstinventur und pflanzensoziologische Klassifikationen. Diese Daten wurden georeferenziert und aufeinander angepasst basierend auf einer klassischen Vermessung mit Tachymeter und GNSS-Stationen.

Die Methodik wurde zuerst in einem 300 x 300 m großem Testgebiet auf der Lägeren (Schweizer Jura; 47°28'N, 8°21'E) entwickelt, und anschließend auf den vollständigen Waldbestand (ca. 16 000 ha) der Laegeren angewendet, um die Übertragbarkeit und Robustheit der Methodik zu überprüfen. Der Wald setzt sich zu einem aus Buchen-dominanten, naturbelassenen Beständen und zum anderen aus Fichten-dominanten Plenterbeständen zusammen. Die Hauptarten sind hierbei *Fagus sylvatica* (L.), *Picea abies* (L.) Karst, *Fraxinus excelsior* (L.) und *Acer pseudoplatanus* (L.) mit einer hohen Variabilität im Hinblick auf Alter (55 – 160 Jahre), Verteilung der Stammdurchmesser (7 – 120 cm) und Höhe (bis 45 m) [Eugster et al. 2007].



Abbildung 2: Untersuchungsgebiet Lägeren mit dem für die Methodenentwicklung ausgewählten Testbereich (rotes Quadrat).

3 Methoden

Basierend auf der Punktwolke wurde in einem ersten Schritt das digitale Geländemodell (DGM), das Oberflächenmodell (DOM) und das Vegetationshöhenmodell (VHM) berechnet. Um das Geländemodell in den sehr steilen Hängen (bis 60° Hangneigung) zu berechnen, wurde basierend auf dem Ansatz von Evans & Hudak [2007] ein neuer Algorithmus entwickelt, welcher sowohl die Verteilung der Echotypen und deren geometrische Charakteristiken als auch die Informationen über die Echobreiten berücksichtigt [vgl. Mücke et al. 2010]. Ein adaptives Fenster wird hierbei in Bereichen mit hoher Variabilität der Höheninformationen angewendet, um mit einer Kombination aus iterativer Triangulation und optimierter Spline-Funktion die eindeutige Bestimmung von Bodenechos zu ermöglichen. Diese Bodenechos wurden anschließend mit einem *Ordinary Kriging* -Verfahren zu dem 1 x 1 m DGM interpoliert. Das zugehörige DOM ergab sich aus den ersten Echos der Punktwolke und den jeweiligen Echobreiten. Um das VHM zu ermitteln wurde die gängige Variante der Differenzberechnung aus DOM und DGM gewählt. Abbildung 3 zeigt das resultierende DGM (grau) und das DOM, welches mit den Werten des VHM codiert wurde.

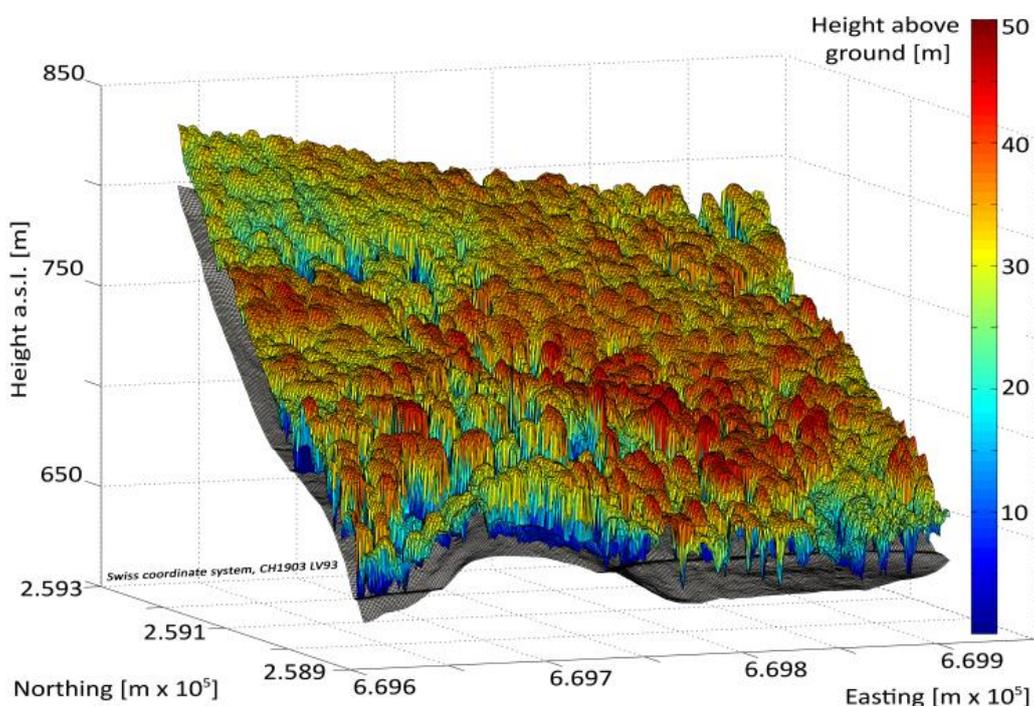


Abbildung 3: DGM (grau) und das mit dem VHM codierte DOM.

Um die Strukturinformationen auf der Einzelbaumebene ableiten zu können, erfolgte eine Segmentierung der vollständigen Punktwolke in individuelle Cluster, um einzelne Baumobjekte zu repräsentieren. Die für die Clusterbildung benötigten Startpunkte wurden über ein *Local Max* – Verfahren basierend auf der Punktwolke ermittelt, was auch die Detektion von Bäumen innerhalb des Unterwuchses ermöglicht. In einem iterativen Verfahren fand ein Ellipsoid förmiges Strukturelement S Anwendung, um das jeweilige lokale Maximum in einer definierten Umgebung D_S zu ermitteln. Die generelle Form der Grauwert-Dilatation für jede Position $V(x,y)$ mit $S(x,y)$ ist hierbei definiert als:

$$(V \oplus S)(x, y) = \max \{V(x - x', y - y') + S(x', y') | (x', y') \in D_S\} \quad \text{Gl. 1}$$

Die resultierenden Maxima bzw. Baumpositionen wurden anschließend, unter Verwendung von Ortho-Fotografien und den Ergebnissen der Baumrekonstruktion aus terrestrischem Laserscanning, auf ihre Vollständigkeit und räumliche Lokalisierung hin validiert.

Basierend auf den Baumpositionen erfolgte ein iteratives, hierarchisches Clustering, welches in einer separaten Punktwolke für jeden individuellen Baum resultierte. Diese Punktwolke wurde in einem weiteren Schritt vertikal unterteilt. Als Kriterium für diese Unterteilung fanden unter anderem Unterschiede in der Punktverteilung im belaubten und im laubfreien Zustand (ermöglicht z.B. die Ableitung der Kronenlänge und die Unterscheidung in *deciduous* und *coniferous*), vertikale Echotypenverteilungen (ermöglicht z.B. die Abschätzung der vertikalen Blattverteilung) und Variationen in den Intensitäts- und Echobreitenwerten (ermöglicht z.B. die Unterscheidung in beleuchteten und beschatteten Kronenbereich) Verwendung. In Abbildung 4 ist hierbei exemplarisch das Konzept der vertikalen Stratifizierung dargestellt.

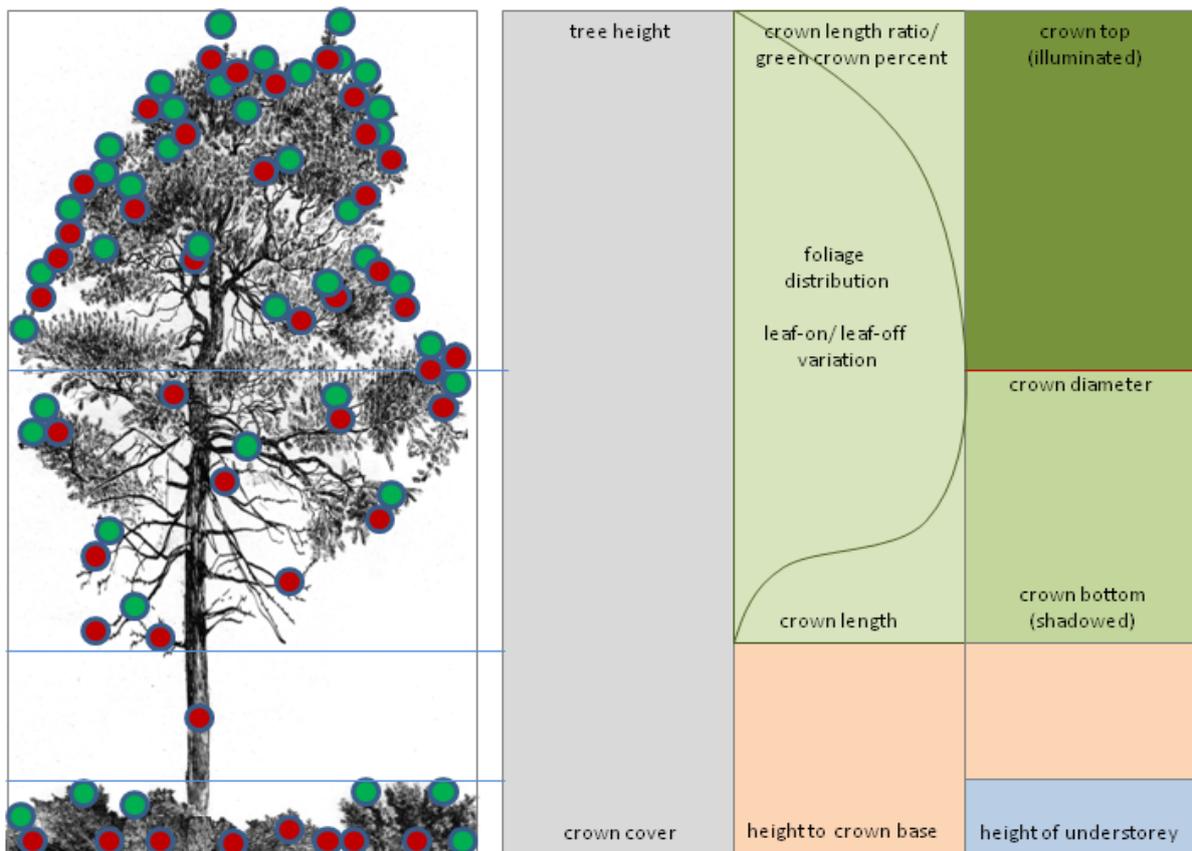


Abbildung 4: Vertikale Untergliederung der Struktur auf Einzelbaumebene. Die grünen Punkte symbolisieren Echos unter belaubtem Zustand; die roten Punkte symbolisieren Echos unter laubfreien Bedingungen.

Dabei wurden folgende Strukturvariablen bestimmt: Baumhöhe, Kronenlänge, Kronendurchmesser (mittlerer Kronendurchmesser, maximale Ausdehnung in West-Ost und Nord-Süd), Höhe bis zur Kronenbasis, Kronenvolumen, Kronenoberfläche, vertikale Blattflächenverteilung und Höhe des Unterwuchses. Eine Unterscheidung in direkt beleuchteten und beschatteten Kronenbereich erfolgte bisher nur testweise und bedarf weiterer Untersuchungen.

Die Validierung dieser Variablen erfolgte mit den Daten des terrestrischen Laserscannings, digitalen hemisphärischen Fotos und den durch die Forstinventur zur Verfügung stehenden Werte.

Ergebnisse und Diskussion

Die Einzelbaumextraktion mit den zugehörigen Strukturvariablen resultiert in einer 3-dimensionalen Repräsentation des untersuchten Bestandes. In Abbildung 5 ist hierbei eine Visualisierung dieser Rekonstruktion dargestellt, in der die komplexen Kronenformen auf geometrische Primitive (Ellipsoide für Laubbäume, Paraboloid für Nadelbäume) reduziert sind.

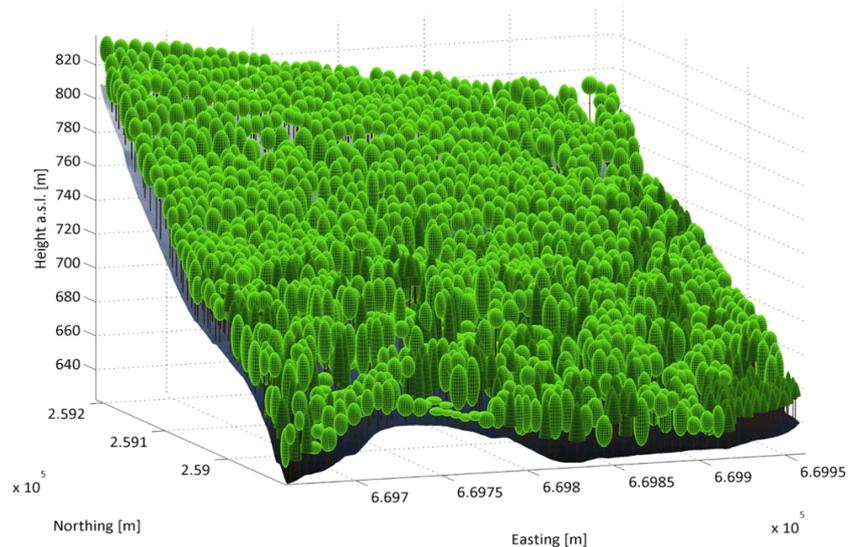


Abbildung 5: Visualisierung der Ergebnisse der Einzelbaumrekonstruktion mit den geometrischen Primitiven Ellipsoid für Laubbäume und Paraboloid für Nadelbäume.

Die Validierung der einzelnen Strukturvariablen wird nachfolgend beispielhaft für ausgewählte Parameter beschrieben:

Die Bestimmung der Kronen-/ Baumpositionen zeigte mit *commission* - und *omission errors* von 5.2 % bzw. 13.1 % sehr gute Ergebnisse, wobei ein Großteil des *omission errors* durch nicht erfasste Bäume im Unterwuchs verursacht wurde. Aus dem Vergleich der Ergebnisse der automatischen Unterscheidung in Laubbäume (*deciduous*) und Nadelbäume (*coniferous*) mit den Forstinventurdaten, ergaben sich die in Tabelle 2 aufgelisteten gebräuchlichen Genauigkeitsmaße *overall accuracy* (OA), *users accuracy* (UA), *producers accuracy* (PA) und *Cohen's kappa coefficient* [Liu et al. 2007].

Table 2: Ergebnisse der Validierung der Laubbaum/ Nadelbaum - Klassifizierung.

	Nadelwald (ALS bestimmt)	Laubwald (ALS bestimmt)	PA [%]
Nadelwald (Referenz)	430	79	84.5
Laubwald (Referenz)	120	1300	91.5
UA [%]	78.2	94.3	
OA [%]			89.7
Kappa coefficient			0.74

Eine Abschätzung der Genauigkeit der abgeleiteten Kronendimensionen ergab für die vertikalen Variablen (z.B. Kronenlänge, Kronenbasis) einen mittleren Fehler von 2.8 m. Die horizontalen Dimensionen sind quantitativ hingegen nur schwer zu validieren. Insbesondere in den dichten Laubwaldbeständen gehen die einzelnen Kronen stark ineinander über, was eine exakte Bestimmung der äußeren Begrenzung nur mit hohen Unsicherheiten zulässt. Variablen, die auf Bestandesebene abgeleitet wurden (z.B. Baumdichte, Kronenschluss) zeigten sehr hohe Übereinstimmungen (mittleres r^2 von 0.78) zu den durch die Forstinventur erhobenen Größen. Bei Bestimmung des

Unterwuchses und dessen Höhe wurde eine maximale vertikale Abweichung von 1 m zu den Referenzdaten festgestellt.

Die Genauigkeiten zeigen, dass mit der entwickelten Methodik Ergebnisse erreicht werden, die den Ansprüchen der klassischen Forstinventur an die Zuverlässigkeit der Variablenbestimmung entsprechen. Dabei ist die Methodik weitestgehend automatisiert und robust, was eine einfache Übertragung des Verfahrens auf großflächigere Anwendungsgebiete gewährleistet. Eine erste Abschätzung dieser Übertragbarkeit erfolgte hierbei durch die Ausweitung des Untersuchungsgebietes auf die 16 000 ha des Gesamtbestandes, wobei ohne Anpassungen oder Veränderungen des Algorithmus ähnlich gute Ergebnisse wie für das 300 x 300 m Testgebiet erreicht wurden. In weiteren Studien wird nun auch die Übertragbarkeit auf tropische und boreale Wälder untersucht und inwieweit die minimalen Anforderungen an die Datengrundlage (z.B. minimale Punktedichte pro m² oder die Notwendigkeit von *full-waveform* Daten) spezifiziert werden können.

Danksagung

Der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) wird für die Unterstützung des 3D-VegetationLab Projektes gedankt, in dessen Rahmen diese Studie eingebettet ist.

Literatur

- Adams, T., P. Beets, and C.E. Parrish, „Another dimension from LiDAR – Obtaining foliage density from full waveform data“, *SilviLaser Conference Proceedings*, Hobart, Australia, Oct. 16-Oct. 20, Conference Proceeding, 2011.
- Adams, R., „Radial decomposition of discs and spheres“, *Graphical Models and Image Processing*, vol. 55, no. 5, Academic Press Inc., pp. 325-332, Sep. 1993.
- Antonarakis, A.S., S.S. Saatchi, R.L. Chazdon, and P.R. Moorcroft, „Using Lidar and Radar measurements to constrain predictions of forest ecosystem structure and function“, *Ecological Applications*, vol. 21, no. 4, Ecological Society of America, pp. 1120-1137, Jun. 2011.
- Disney, M., P. Lewis, and P. Saich, „3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains“, *Remote Sensing of Environment*, vol. 100, no. 1, pp. 114-132, Jan. 2006.
- Eugster, W., K., Zeyer, M. Zeeman, P. Michna, A. Zingg, N. Buchmann, and L. Emmenegger, „Nitrous oxide net exchange in a beech dominated mixed forest in Switzerland measured with a quantum cascade laser spectrometer“, *Biogeosciences Discussion*, vol. 4, no. 2, pp. 1167-1200, 2007.
- Evans, J.S., and A.T. Hudak, „A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments“, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 4, pp. 1029-1038, Apr. 2007.
- Foody, G.M., „Assessing the accuracy of land cover change with imperfect ground reference data“, *Remote Sensing of Environment*, vol. 114, no. 10, pp. 2271-2285, Oct. 2010.

- Gough, C.M., C.S. Vogel, H.P. Schmid, and P.S. Curtis, „Controls on annual forest carbon storage: Lessons from the past and predictions for the future”, *BioScience*, vol. 58, no. 7, pp. 609-622, Jul. 2008.
- Haara A., and P. Leskinen, „The assessment of the uncertainty of updated stand-level inventory data”, *Silva Fennica*, vol. 43, no. 1, pp. 87-112, 2009.
- Hall, F.G., K. Bergen, J.B. Blair, R. Dubayah, R. Houghton, G. Hurtt, J. Kellndorfer, M. Lefsky, J. Ranson, S. Saatchi, H.H. Shugart, and D. Wickland, „Characterizing 3D vegetation structure from space: Mission requirements”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 11, pp. 2753-2775, Nov. 2011.
- Hardiman, B.S., G. Bohrer, C.M. Gough, C.S. Vogel, and P.S. Curtis, „The role of canopy structural complexity in wood net primary production of a maturing northern deciduous forest”, *Ecology*, vol. 92, no. 9, pp. 1818-1827, Sep. 2011.
- Heinzel, J., and B. Koch, „Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification”, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 13, no. 1, pp. 152-160, Feb. 2011.
- Hilker, T., M. van Leeuwen, N.C. Coops, M.A. Wulder, G.J. Newnham, D.L.B. Jupp, and D.S. Culvenor, „Comparing canopy metrics derived from terrestrial and airborne laser scanning in a Douglas-fir dominated forest stand”, *Trees - Structure and Function*, vol. 24, no. 5, pp. 819-832, 2010.
- Hug, C., A. Ullrich, and A. Grimm, „Litemapper 5600 a waveform-digitizing lidar terrain and vegetation mapping system”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 8, p. W2, 2004.
- Jones, T.G., N.C. Coops, and T. Sharma, „Assessing the utility of LiDAR to differentiate among vegetation structural classes”, *Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 231-238, May 2012.
- Jonsson, M., and D.A. Wardle, „Structural equation modelling reveals plant-community drivers of carbon storage in boreal forest ecosystems”, *Biology Letters*, vol. 6, no. 1, pp. 116-119, Feb. 2010.
- Kaartinen, H., J. Hyyppä, X. Yu, M. Vastaranta, H. Hyyppä, A. Kukko, M. Holopainen, C. Heipke, M. Hirschmugl, F. Morsdorf, E. Næsset, J. Pitkänen, S. Popescu, S. Solberg, B.M. Wolf, and J.C. Wu, „An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning,” *Remote Sensing*, vol. 4, no. 4, pp. 950-974, 2012.
- Kim, S., R.J. McGaughey, H.-E. Andersen, and G. Schreuder, „Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 8, pp. 1575-1586, Aug. 2009.
- Koch, B., „Status and future of laser scanning, synthetic aperture radar and hyperspectral remote sensing data for forest biomass assessment”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 65, no. 6, pp. 581-590, Nov. 2010.

- Korpela, I., H.O. Ørka, M. Maltamo, T. Tokola, and J. Hyyppä, „Tree species classification using airborne LiDAR - effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type”, *Silva Fennica*, vol. 44, no. 2, pp. 319-339, 2010.
- Leeuwen, M. and M. Nieuwenhuis, „Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing”, *European Journal of Forest Research*, vol. 129, no. 4, pp. 749-770, Jul. 2010.
- Lemmens, M., „Airborne Lidar Sensors”, *GIM International*, vol. 23, no. 2, pp. 16-19, Feb. 2009.
- Lindberg, E. and M. Hollaus, „Comparison of methods for estimation of stem volume, stem number and basal area from airborne laser scanning data in a hemi-boreal forest”, *Remote Sensing*, vol. 4, no. 4, pp. 1004-1023, Apr. 2012.
- Lindberg, E., K. Olofsson, J. Holmgren, and H. Olsson, „Estimation of 3D vegetation structure from waveform and discrete return airborne laser scanning data”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 118, no. 4, pp. 151-161, Mar. 2012
- Liu, C., P., Frazier, and L. Kumar, „Comparative assessment of the measures of thematic classification accuracy”, *Remote Sensing of Environment*, no. 107, pp. 606-616, 2007.
- Mallet, C., and F. Bretar, „Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 1, pp. 1-16, Jan. 2009.
- Morsdorf, F., C. Nichol, T. Malthus, and I.H. Woodhouse, „Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modeling”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 113, no. 10, pp. 2152-2163, Oct. 2009.
- Mücke, W., C. Briese, and M. Hollaus, „Terrain echo probability assignment based on full waveform airborne laser scanning observables”, *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXVIII/7A, pp. 157-162, Vienna, Austria, 2010.
- Nadkarni, N.M., A.C.S. McIntosh, and J.B. Cushing, „A framework to categorize forest structure concepts”, *Forest Ecology and Management*, vol. 256, no. 5, pp. 872-882, Aug. 2008.
- Neuenschwander, A.L., L.A. Magruder, and M. Tyler, „Landcover classification of small-footprint, full-waveform lidar data”, *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 3, no. 1, article no. 033544, Aug. 2009.
- Persson, Å., U. Söderman, J. Töpel, and S. Ahlberg, „Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data”, *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. 36, no. 3, p. W19, 2005.
- Purves, D., and S. Pacala, „Predictive models of forest dynamics”, *Science*, vol. 320, no. 5882, pp. 1452-1453, Jun. 2008.

- Reitberger, J., Cl. Schnörr, P. Krzystek, and U. Stilla, „3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 64, no. 6, pp. 561-574, Nov. 2009.
- Roberts, J., S. Tesfamichael, M. Gebreslasie, J. van Aardt, and F. Ahmed, „Forest structural assessment using remote sensing technologies: an overview of the current state of the art,” *Southern Hemisphere Forestry Journal*, vol. 69, no. 3, pp. 183-203, Dec. 2007.
- Sierra, C.A., H.W. Loescher, M.E. Harmon, A.D. Richardson, D.Y. Hollinger, and S.S. Perakis, „Interannual variation of carbon fluxes from three contrasting evergreen forests: the role of forest dynamics and climate”, *Ecology*, vol. 90, no. 10, pp. 2711-2723, Oct. 2009.
- Strand, G., W. Dramstad, and G. Engan, „The effect of field experience on the accuracy of identifying land cover types in aerial photographs”, *International Journal of Applied Earth*, vol. 4, no. 2, pp. 137-146, Nov. 2002.
- Wagner, W., M. Hollaus, C. Briese, and V. Ducic, „3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners”, *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 5, pp. 1433-1452, Mar. 2008.
- Wagner, W., A. Ullrich, V. Ducic, T. Melzer, and N. Studnicka, „Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner”, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 60, no. 2, pp. 100-112, Apr. 2006.
- Wulder, M.A., C.W. Bater, N.C. Coops, T. Hilker, and J.C. White, „The role of LiDAR in sustainable forest management,” *The Forestry Chronicle*, vol. 84, no. 6, pp. 807-826, Nov. 2008.
- Xue, B.-L., T. Kumagai, S. Iida, T. Nakai, K. Matsumoto, H. Komatsu, K. Otsuki, and T. Ohta, „Influences of canopy structure and physiological traits on flux partitioning between understory and overstory in an eastern Siberian boreal larch forest”, *Ecological Modelling*, vol. 222, no. 8, pp. 1479-1490, Apr. 2011.
- Yang, R., and M.A. Friedl, „Modeling the effects of three-dimensional vegetation structure on surface radiation and energy balance in boreal forests”, *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, vol. 108, no. 16, pp. GCP 10-1 - GCP 10-11, 2003.
- Zhao, K., S. Popescu, X. Meng, Y. Pang, and M. Agca, „Characterizing forest canopy structure with lidar composite metrics and machine learning”, *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 8, pp. 1978-1996, Aug. 2011.