

lich erfolgreich waren. Solche Fragen können neben der Beurteilung der Verjüngungssituation durchaus auch anhand der Waldstruktur beantwortet werden. Der Vorteil einer automatischen Strukturansprache mittels Laserscannerdaten liegt in der transparenten und objektiven Vorgehensweise und der einfachen Wiederholbarkeit. Es ist jedoch zu beachten, dass dafür auch entsprechende Validierungs- und Kalibrierungsdaten erforderlich sind, welche durch eine permanente Waldinventur zur Verfügung gestellt werden können.

Die hier präsentierten Strukturmerkmale stellen lediglich eine Auswahl dar. So lässt sich auch die Dichte an Bestandesinnerrändern als Stabilitätsmerkmal sehr gut aus Laserscannerdaten ableiten. Weiters kann die Rauigkeit der Kronenoberfläche als Maßzahl für die Strukturierung herangezogen werden. Durch Analyse der Bestandeslücken kann festgestellt werden, ob die Freifläche in zahlreiche kleine oder wenige große Lücken verteilt ist. Die Stammzahl lässt sich bislang nur unzureichend auf automatischem Wege ermitteln. Es ist aber denkbar, Stammzahl und Durchmesserverteilung über Referenzverteilungen in verschiedenen Bestandesstrukturtypen und Waldentwicklungsphasen zu schätzen. Dies ist jedoch noch Gegenstand derzeitiger Forschungen. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kombination von terrestrischen Inventurdaten und flächendeckenden Laserscannerdaten auch in der Strukturierung praxistaugliche Grundlagen für die forstliche Planung und das Monitoring in Schutzwaldsanierungs- und flächenwirtschaftlichen Projekten liefert.

Mag. Bernhard Maier (Stand Montafon Forstfonds, Montafonerstraße 21, 6780 Schruns, Österreich, bernhard.maier@stand-montafon.at; <http://www.stand-montafon.at>)

Dr. Markus Hollaus (Christian-Doppler-Laboratorium für „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstrasse 27-29, 1040 Wien, Österreich, mh@ipf.tuwien.ac.at; <http://www.ipf.tuwien.ac.at/>)

## Der Holzvorrat Vorarlbergs

Eine landesweite Holzvorratskarte abgeleitet aus Laserscannerdaten und der Österreichischen Waldinventur

von Markus Hollaus, Bernhard Maier & Wouter Dorigo

Der folgende Beitrag fasst die Ergebnisse des vom Landesvermessungsamt sowie der Landesforstverwaltung Vorarlberg geförderten Projektes „Ableitung von Forstparametern aus ALS Daten für Vorarlberg“ zusammen. Das primäre Ziel dieses Projektes lag in der Untersuchung, ob und in welcher Weise die vorhandenen Laserscannerdaten für die landesweite Abschätzung des Holzvorrates herangezogen werden können. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag dabei auf der operationalen Anwendung des entwickelten Modells zur Erstellung einer flächendeckenden Holzvorratskarte Vorarlbergs.

Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe der Österreichischen Waldinventurdaten (ÖWI) ein empirisches Modell kalibriert und anschließend flächendeckend angewandt. Der Nutzen einer derartigen flächigen Verdichtung des ÖWI Stichprobennetzes liegt in erster Linie in der Erhöhung der Aussagekraft für kleinere Einheiten sowie in der Datenbeschaffung von schwer- bzw. unzugänglichen Gebieten. Weiters sollen damit auch Holzvorratschätzungen und die verbesserte Erfassung des Schutzwaldes in Regionen möglich sein, für welche auf Grund der Kleinwaldstruktur keine detaillierten Betriebsinventuren zur Verfügung stehen. Die generierte Holzvorratskarte wurde mit den unabhängigen Betriebsinventurdaten des Stand Montafons

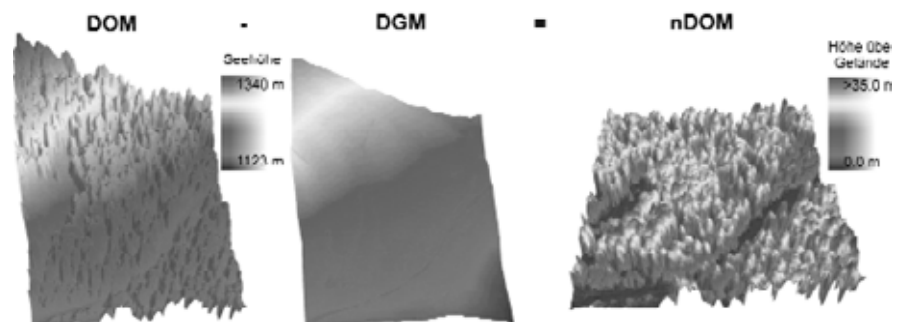
überprüft und zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den terrestrisch aufgenommenen Stichprobendaten.

Die Arbeiten wurden am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Technischen Universität Wien in Zusammenarbeit mit der Forstverwaltung Stand Montafon Forstfonds und dem Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) durchgeführt.

### Laserscannerdaten

In Vorarlberg wurde in den Jahren 2002 bis 2005 Laserscann-Befliegungen durchgeführt und es war somit das erste Bundesland Österreichs mit einem flächendeckenden Laserscannerdatensatz. Der beispielhaften Umsetzung in Vorarlberg folgten inzwischen zahlreiche Befliegungen in den anderen Bundesländern.

Für die Aufnahme hochgenauer topographischer Daten stellt das flugzeuggetragene Laserscanning, häufig auch als Airborne Laserscanning (ALS) bezeichnet, eine Standardmethode dar. Ein im Flugzeug bzw. Helikopter montierter Laserscanner sendet in regelmäßigen Zeitabständen bis zu 200.000 kurze Laserstrahlen pro Sekunde zur Erdoberfläche wo sie von unterschiedlichsten Oberflächen wie beispielsweise Vegetation, Straßen, Autos, Gebäude, Stromleitungen, etc. reflektiert werden.



**Abbildung 1:** Ausschnitt aus den vorhandenen topographischen Modellen. Das linke Bild zeigt ein digitales Oberflächenmodell (DOM), das mittlere ein digitales Geländemodell (DGM) und das rechte ein normalisiertes Oberflächenmodell (nDOM) berechnet aus der Differenz zwischen DOM und DGM. Die Modelle haben eine räumliche Auflösung von 1 m.

Eine im Flugzeug eingebaute Empfangseinheit zeichnet die zurückgestreuten Laserstrahlen auf, wodurch die benötigte Zeit des Laserstrahls zwischen Aussendung und Empfang ermittelt und in weiterer Folge mit Hilfe der Lichtgeschwindigkeit in eine Distanz umgerechnet werden kann. Zusätzlich wird die Position des Flugzeugs mittels differentiellen globalen Positionssystems (dGPS), sowie die Richtung des ausgesandten Laserstrahls mit Hilfe von Neigungsmessern (Inertial Measurement Unit – IMU) registriert. Durch die Kombination dieser Daten kann schlussendlich die dreidimensionale Position eines jeden von einem Laserstrahl beleuchteten Objekts bestimmt werden. Dieses aktive Fernerkundungsverfahren hat speziell im Wald deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen stereoskopischen Auswertungen von Luftbildern da es einerseits zu keiner Beeinflussung des Messvorganges in Schattenbereichen (z.B. Lücken in der Baumkrone, Waldrand, etc.) kommt und andererseits

nicht nur das Kronendach sondern auch die darunter liegende Geländeoberfläche geometrisch beschrieben werden kann. Ermöglicht wird dies durch die Tatsache, dass Teile eines Laserstrahls auf ihren Weg zur Erdoberfläche bereits von der Baumkrone reflektiert werden (first-echo), wohingegen die restlichen Teile durch kleine Lücken im Kronendach den Waldboden erreichen (last-echo). So erhält man neben der horizontalen Baumverteilung eine sehr gute Beschreibung der vertikalen Schichtung.

In Vorarlberg wurden mit derartigen ALS Systemen 1 bis 4 Messungen pro Quadratmeter durchgeführt. Bei der Flugplanung wurde darauf geachtet, dass die Befliegungen zu blattlosen sowie schneefreien Zeiten stattfanden, um eine möglichst präzise geometrische Beschreibung der Geländeoberfläche zu erhalten. Aus den „first-echo“ Daten wurde ein digitales Oberflächenmodell (DOM) berechnet, welches die oberste Fläche (z.B. Kronendach) aus der Sicht des Flugzeuges beschreibt. Im Gegensatz dazu

wurde aus den „last-echo“ Daten ein digitales Geländemodell (DGM) berechnet. Subtrahiert man das DGM vom DOM erhält man das normalisierte Oberflächenmodell ( $nDOM = DOM - DGM$ ), welches im Wald die Bestandes- bzw. Einzelbaumhöhen wiedergibt (siehe Abbildung 1). Das nDOM stellt somit eine äußerst interessante und vielversprechende Datenquelle für eine Vielzahl von forstlichen Aufgaben dar. Die abgeleiteten Modelle (DOM, DGM, nDOM) Vorarlbergs haben eine räumliche Auflösung von 1 m und wurden vom Landesvermessungsamt Feldkirch zur Verfügung gestellt.

#### Holzvorratsmodell

Das angewandte Modell zur Abschätzung des Holzvorrates aus ALS Daten wurde am Institut für Photogrammetrie

und Fernerkundung entwickelt und im Zuge eines früheren Pilot-Projektes im inneren Montafon erfolgreich angewandt. Es handelt sich um ein empirisches Modell, welches annimmt, dass sich der Holzvorrat als lineare Funktion des Schirmvolumens beschreiben lässt. Als Schirmvolumen wird dabei jenes Volumen definiert, welches innerhalb einer Probefläche mit einem Durchmesser von 20 m zwischen der Geländeoberfläche und der durch die „first-echos“ beschriebenen Kronenoberfläche liegt. Um das Modell besser an die lokalen Wuchsbedingungen in einem Gebiet anpassen zu können, wird das Schirmvolumen innerhalb einer Probefläche für unterschiedliche Höhenklassen bestimmt. In der durchgeführten Pilot-Studie wurden bei Verwendung von vier Höhenklassen (2-12 m, 12-22 m, 22-32 m, >32 m) die besten Ergebnisse erzielt. Um den Einfluss von niedriger Vegetation sowie Steinen zu verringern, wurden Bereiche mit Höhenwerten  $nDOM < 2.0$  m auf Null gesetzt und haben somit keinen Einfluss auf die Abschätzung des Holzvorrates.

#### Modellkalibrierung

Für die Bestimmung der Modellkoeffizienten werden die statistisch ermittelten Holzvorräte der Österreichischen Waldinventur (ÖWI) der Erhebungsperiode 2000/02 als Referenzdaten herangezogen. Die ÖWI beruht auf einem permanenten Stichprobenverfahren mit systematischer Verteilung der Erhebungseinheiten (Trakte) im Abstand von 3,89 km (siehe Abbildung 2). Jeder der vier Trakteckpunkte im Abstand von 200 m ist unter anderem Aufstellungsort für das Relaskop zur Winkelzählprobe nach Bitterlich mit Zählfaktor 4. Für das vorliegende Projekt stehen die Daten von 126 ÖWI Stichproben für das Bundesland Vorarlberg zur Verfügung.

Eine Grundvoraussetzung für die Verwendung der ÖWI als Referenzdatensatz ist eine exakte lagemäßige Übereinstimmung mit den Laserscannerdaten. Da die relative Lagegenauigkeit zwischen ALS Daten und ÖWI Stichproben großteils unzureichend ist, wurde die Position einer jeden Stichprobe (innerhalb eines maximal definierten Suchradius von  $\pm 30.0$  m) an die Laserscannerdaten angepasst. Somit konnten 96 von den 126 vorhandenen ÖWI Stichproben lagemäßig eindeutig an die ALS Daten angepasst und in weiterer Folge für die Bestimmung der Modellkoeffizienten heran-

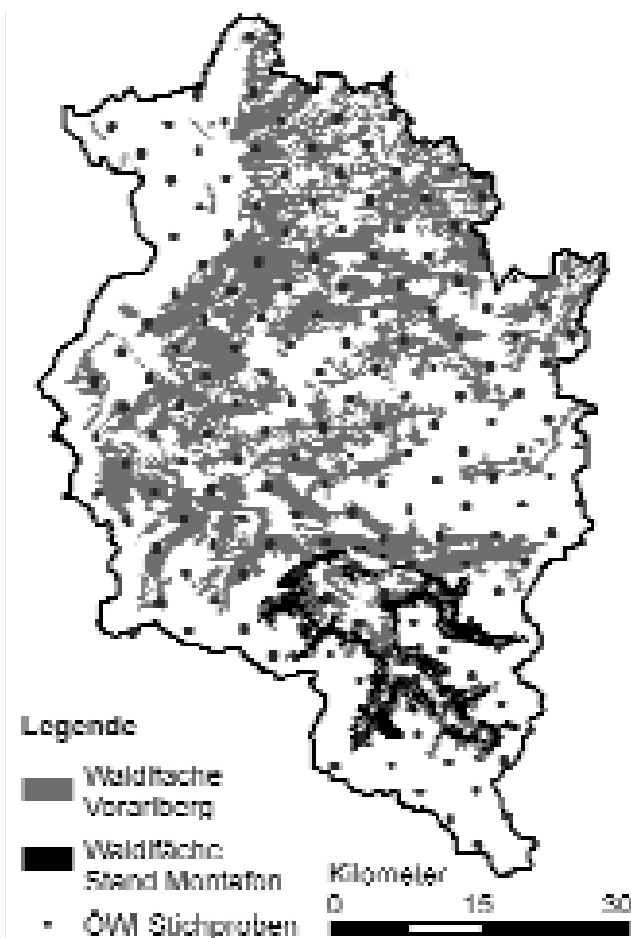


Abbildung 2: Untersuchungsgebiet Vorarlberg. Dargestellt ist die Waldfläche überlagert mit den Stichprobenpunkten der Österreichischen Waldinventur. Die Waldflächen des Stand Montafon Forstfonds sind in dunkelgrün dargestellt.

gezogen werden. Bei den restlichen Stichproben handelt es sich einerseits um Stichproben in Jungwaldbereichen wo keine Lagerzuordnung auf Einzelbaumniveau möglich ist und andererseits um Laub- bzw. Mischwaldbereiche wo aufgrund der oftmals sehr geringen Laserscannerpunktdichte das Erkennen von Einzelbäumen nur sehr schwer und somit nicht eindeutig möglich ist.

Zunächst konnte unabhängig von der Baumart ein Holzvorratsmodell mit einem Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) von 0,75 sehr genau kalibriert werden. Um den Einfluss der Baumarten zu untersuchen erfolgte eine Einteilung der Stichproben anhand der dominanten Baumarten (Laub- bzw. Nadelholzanteil > 50%). Somit konnten für Laub- und Nadelwald individuelle Schätzmodelle abgeleitet und speziell für Nadelwald ein höheres  $R^2$  von 0,78 erreicht werden. Für Laubwald konnte aufgrund der sehr geringen Anzahl an Stichproben (8 Stichproben mit einem Laubholzanteil > 50%) kein Schätzmodell zuverlässig kalibriert werden. Eine anschließende Kreuzvalidierung ergab für die baumartenunabhängige Holzvorratsschätzung einen statistischen Fehler von rund 36% bzw. 33% für das Nadelwaldmodell. Diese Angaben beziehen sich auf die Abschätzung des Holzvorrates für eine Probefläche von ca. 314 m<sup>2</sup> entsprechend einem Radius von 10 m. Diese Unsicherheiten scheinen auf den ersten Blick sehr hoch, verringern sich jedoch mit zunehmender Größe (z.B. >1 ha), für die der Vorrat geschätzt wird.

### Holzvorratskarte

Für die Erstellung der Holzvorratskarte wurde das kalibrierte baumartenunabhängige Holzvorratsmodell auf das vorliegende normalisierte Oberflächenmodell (nDOM) angewandt. So wurde für die ca. 97 000 ha Wald Vorarlbergs der Holzvorrat mit einer Auflösung von 1 m abgeschätzt. In Abbildung 3 ist ein Ausschnitt des südlichen Teils Vorarlbergs dargestellt und zeigt Bereiche des Gargellen-, Ill- und Silbertales.

Eine unabhängige Validierung der generierten Holzvorratskarte erfolgte über die Stichproben der Stand Montafon Betriebsinventur. Dazu wurden 104 Stichproben im Bereich des Gargellentals lagemäßig an die ALS Daten angepasst und die Holzvorräte der Betriebsinventur mit jenen aus der abgeschätzten Holzvorratskarte vergli-

chen. Die Analysen zeigen, dass die abgeschätzten Holzvorräte sehr gut mit den Betriebsinventurdaten übereinstimmen. Dabei wurde ein  $R^2$  von 0,75 erreicht und die bei der Kalibrierung des Modells erzielte Genauigkeit bestätigt. Ebenso konnte ein vergleichbarer statistischer Fehler (32%) für Stichproben mit einer Fläche von je ca. 314 m<sup>2</sup> beobachtet werden.

### Anwendungen und Ausblick

Die Ergebnisse des vorgestellten Projekts bestätigen die Übertragbarkeit des im Zuge des Pilotprojekts entwickelten Holzvorratsmodells auf die gesamte Waldfläche Vorarlbergs. Die erzielten Resultate der Holzvorratsschätzung liegen im Genauigkeitsbereich der terrestrischen Waldinventur und stellen in Kombination mit dem detaillierten Laser-Geländemodell eine ausgezeichnete Datengrundlage für eine Vielzahl forstlicher Planungen wie beispielsweise der Planung und Optimierung von Forststraßen und Seilkrananlagen dar. Die abgeleitete Holzvorratskarte hat so wie das nDOM eine Pixelgröße von 1 m und kann für die Ermittlung von Holzvorräten für unterschiedlichste Bezugsgrößen (z.B. Bestände, Gemeinden, einzelne Täler, Bezirke, etc.) herangezogen werden. Somit steht für das gesamte Land Vorarlberg eine einheitliche Information über den Holzvorrat zur Verfügung, welche eine ausgezeichnete Datenquelle für unterschiedlichste Studien (z.B. Biomasseaufkommen, etc.) darstellt. Vergleichbar mit den Ergebnissen des Pilotprojektes im inneren Montafon zeigte sich auch in diesem Projekt, dass die Holzvorratsschätzungen im Genauigkeitsbereich der terrestrischen Waldinventur liegen. Obwohl terrestrisch gemessene Stichprobendaten zur Kalibrierung benötigt werden, kann jedoch mit einem ausgedünnten Netz an Stichproben das Auslangen gefunden werden. Die lokale Aussagegenauigkeit wird dadurch deutlich erhöht, was zu einem Kostenvorteil in einer Waldinventur führt. Zusammenfassend kann erwähnt werden, dass die vorgestellte Verdichtung der Österreichischen Wal-

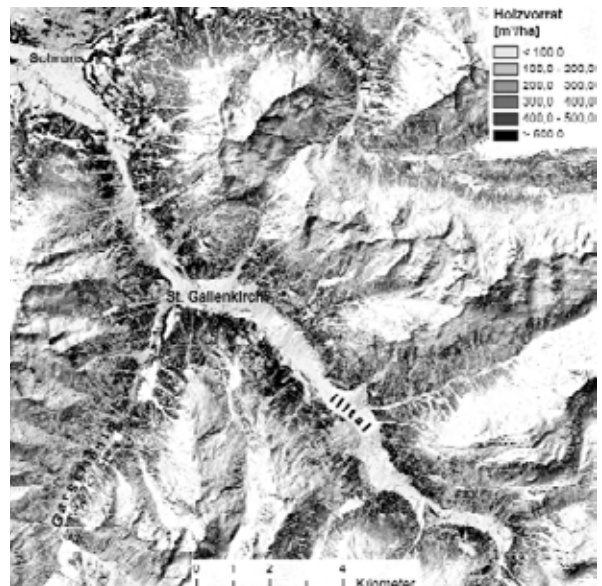


Abbildung 3: Ausschnitt aus der erstellten Holzvorratskarte Vorarlbergs. Abgebildet sind Teile des Ill-, Gargellen- sowie Silbertals. Die räumliche Auflösung der Holzvorratskarte beträgt 1 m. Im Hintergrund ist ein Beleuchtungsbild (Hillshade) des Geländemodells zu sehen © Landesvermessungsamt Feldkirch.

dinventur mit Hilfe der landesweiten Laserscannerdaten einen praxistauglichen Ansatz darstellt.

Derzeit werden die Methoden auf ein 2 500 ha großes Mischwaldgebiet in Niederösterreich übertragen und evaluiert. Diese Arbeiten werden im Zuge des vom BMLFUW finanzierten Forschungsprojekt „Regionalisierung von Waldinventurdaten mit Hilfe von Methoden des luftgestützten Laserscannings“ (ÖWI-Regio) durchgeführt. Des Weiteren wird derzeit analysiert inwieweit sich anhand der Laserdaten eine Unterscheidung in Nadel- und Laubwald durchführen lässt.

**Dr. Markus Hollaus** (Christian-Doppler-Laboratorium für „Räumliche Daten aus Laserscanning und Fernerkundung“ am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich, mh@ipf.tuwien.ac.at; <http://www.ipf.tuwien.ac.at/>)

**Mag. Bernhard Maier** (Stand Montafon Forstfonds, Montafonerstraße 21, 6780 Schruns, Österreich, bernhard.maier@stand-montafon.at; <http://www.stand-montafon.at>)

**Dr. Wouter Dorigo** (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien, Gusshausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich, wd@ipf.tuwien.ac.at; <http://www.ipf.tuwien.ac.at/>)