

# Vor lauter Pixeln den Wald sehen

## Einleitung

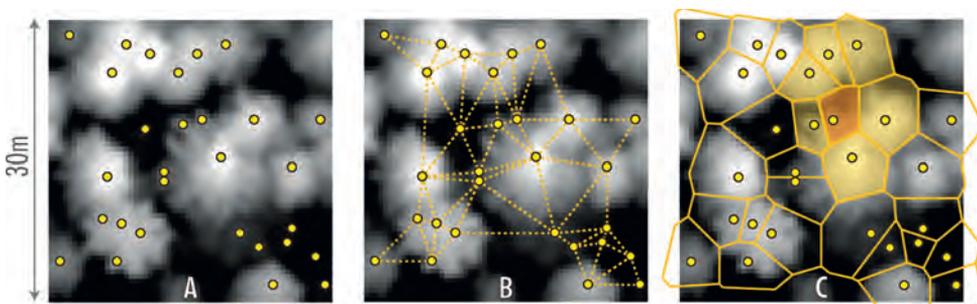
Im September 2010 wurde die Region Klosters/Davos mit einem Laserscanner befliegen. Aus den gewonnenen LiDAR-Daten (Light Detection and Ranging) wurde im Anschluss ein digitales Terrain- und Oberflächenmodell (DTM, DOM) als Raster mit einer Auflösung von  $0,5 \times 0,5\text{m}$  erzeugt (40000 Rasterpixel = 1 ha). Aus der Differenz zwischen DOM und DTM lässt sich für jede Rasterzelle die Vegetationshöhe berechnen. Im resultierenden Vegetationshöhenmodell (VHM, analog ist der Begriff «Kronenhöhenmodell» gebräuchlich) erkennt man bei hoher Auflösung die einzelnen Baumkronen der herrschenden Schicht im Wald. In Zusammenarbeit mit dem Amt für Wald und Naturgefahren AWN des Kantons Graubünden entwickelt die Professur für Forstliches Ingenieurwesen an der ETH Zürich zurzeit Methoden, um automatisch forstlich relevante Merkmale aus dieser neuartigen Datengrundlage über den Wald zu bestimmen. Im nächsten Abschnitt stellen wir die Repräsentation des Waldes als Baumnetzwerk vor, das aus einem VHM be-

stimmtbar ist. Aus diesem Netzwerk lassen sich Karten für praktische Fragestellungen erstellen, was wir anhand einer Bestandes- und Vorratsdichtekarte im Anschluss aufzeigen. Schliesslich zeigen wir die Schwierigkeiten bei der Anwendung von VHM auf und formulieren Herausforderungen für die Praxis.

## Repräsentation des Waldes

Stellen Sie sich vor, Sie möchten einen Wald im Raum mit einem Minimum an Informationen beschreiben. Die Lage jedes Baumes könnten Sie durch einen Punkt erfassen und Merkmale wie Baumart oder Brusthöhendurchmesser zuweisen. Wollen Sie Aussagen zur Waldstruktur machen, müssten Sie im Anschluss benachbarte Bäume in Beziehung setzen. Durch das Verbinden zweier benachbarter Bäume mit einer Kante könnten sie diese Beziehung erfassen. Mit dieser Kombination aus Punkten und Kanten entsteht ein Netzwerk wie in Abbildung 1 B dargestellt. Ein hochaufgelöstes VHM ermöglicht die automatische Bestimmung dieses Netzwerks.

**Abb. 1:** Vegetationshöhenmodell mit automatisch bestimmten Baumspitzen (A) sowie dem hergeleiteten Baumnetzwerk (B), das die Waldstruktur als die Bäume der herrschenden Schicht (Punkte) und den Nachbarschaften zu den nächsten Bäumen (Kanten) erfasst. Aus dem Netzwerk lassen sich zudem die Standflächen erzeugen (C). Für jeden Baum (C, rot) können die Nachbarbäume (C, orange) bestimmt werden. (Bild: Jochen Breschan, Datenherr LiDAR : Gemeinden Klosters/Davos; Amt für Wald und Naturgefahren GR; Remote Sensing Laboratories RSL, Universität Zürich)



Hierfür werden durch Erkennung der Baumspitzen auf dem VHM zuerst die Bäume lokalisiert (Abbildung 1 A). Die Baumhöhen lassen sich dann direkt an den Baumpositionen aus dem VHM ablesen. Aufgrund der Baumhöhe lassen sich weitere Grössen (BHD, Baumvolumen) mit Hilfe von Funktionen schätzen, die aus regionalen terrestrischen Messungen hergeleitet wurden (z. B. Landesforstinventar). Im Anschluss bedient man sich der Delaunay-Triangulation, um Nachbarbäume (Punkte) mit Kanten zu verbinden (Abbildung 1 B). Damit ist auch die Kantenlänge bestimmt. Zuletzt werden die Standflächen auf Basis des entstandenen Netzwerks bestimmt, indem man ein Voronoi-Diagramm erzeugt (Abbildung 1 C).

### **Anwendungsbeispiele**

Mit Hilfe der Netzwerk-Repräsentation eines Waldes lässt sich eine Vielzahl forstlich relevanter Merkmale automatisch bestimmen. Dieser Abschnitt stellt Methoden zur Bestimmung der Bestandes- und Vorratsdichtekarte vor.

Bestände konnten in der Vergangenheit mit Hilfe von Luftbildern visuell abgegrenzt werden, indem u. a. abrupte Änderungen in der Waldstruktur identifiziert wurden. Die Netzwerk-Repräsentation erlaubt es, diese Abgrenzung alternativ durch Lösen eines mathematischen Optimierungsproblems vorzunehmen, das möglichst ähnliche benachbarte Bäume zu Beständen bündelt. Abbildung 2 illustriert die Bestandesausscheidung für die Fälle, dass (2 A) benachbarte Bäume und (2 B) ähnliche benachbarte Bäume aufgrund der Kantenlängen gebündelt werden. Entsprechen die Kantenlängen den euklidischen Distanzen, resultieren zusammenhängende Bestände bestehend aus benachbarten

Bäumen (2 A). Die Grenzen werden jedoch nicht an den Stellen abrupter Änderung in der Waldstruktur gezogen. Dies wird berücksichtigt, indem die Kanten zusätzlich in Funktion der BHD-Differenz der benachbarten Bäume gewichtet werden. Das entstehende gewichtete Netzwerk in Abbildung 2 B muss man sich in einem virtuellen Raum vorstellen, in dem benachbarte Bäume mit hoher BHD-Differenz (d. h. unähnliche Bäume) weit auseinanderstehen. Bei der Bündelung aufgrund der Kantenlänge können jetzt abrupte Änderungen in der Waldstruktur berücksichtigt werden. Die Rücktransformation der gebündelten Bäume in den realen Raum führt zu plausiblen Bestandesgrenzen.

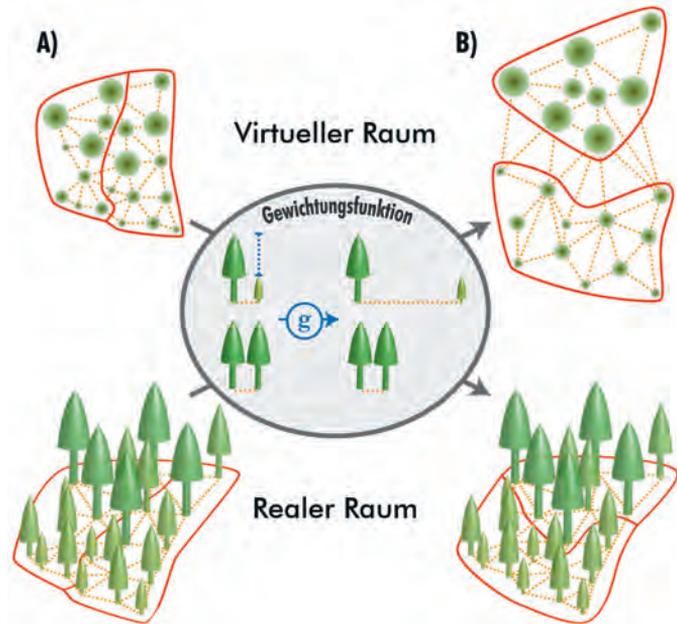
In der Vorratsdichtekarte schätzt man den lokalen Vorrat in  $m^3$  pro ha für jede Standfläche. Für die «lokale» Schätzung werden neben der betreffenden Standfläche auch deren Nachbarn berücksichtigt (Illustration siehe Abbildung 1 C). Der Vorrat wird dann geschätzt, indem man die Summe der Baumvolumina durch die Summe der Flächen der betreffenden Standflächen teilt.

Abbildung 3 zeigt einen Ausschnitt aus einer Abteilung in der Gemeinde Serneus, wo im Rahmen der Pilotstudie die Methoden zurzeit getestet werden. Die wichtigste Erkenntnis einer ersten Begehung mit Vertretern des Forstdienstes war, dass die Auflösung der Bestandeskarte angemessen an die Grenzen der Wahrnehmung gewählt werden soll. Konkret bedeutet dies, dass Grenzen auf der Karte auch im Feld erkannt werden sollten. Die Bestandeskarte in Abbildung 3 ist Resultat eines verbesserten Modells, das ähnliche Bestände zusammenfasst. Die Volumendichtekarte stellt die Vorratsverteilung in hoher Auflösung dar und gibt ein realistisches Bild über die räumliche Verteilung der Vorräte.

## Schwierigkeiten

Vegetationshöhenmodelle eignen sich bei hoher Auflösung zur Beschreibung der herrschenden Schicht im Wald. Verjüngungsflächen sind jedoch schwierig zu erfassen. Eine Hochstaudenflur kann in einem VHM ein ähnliches Muster wie ein Jungwuchs erzeugen. Zudem wird mit einem VHM die Verjüngung unter Schirm nicht erfasst. Punktwolken aus «Full Wave Form LiDAR»-Befliegungen beinhalten hingegen auch Punkte, die an Objekten unter Schirm reflektiert wurden. Es gibt Ansätze, diese Informationen zur Charakterisierung des Unterstandes zu verwenden. Des Weiteren gibt es Ansätze, welche aufgrund von LiDAR-Daten die Unterscheidung von Laub-, Nadelholz und einzelnen Baumarten erlauben. Hierzu werden u. a. Resultate aus Befliegungen im belaubten und unbelaubten Zustand sowie Intensitätswerte der Laserpulse herangezogen, die mit dem reflektierten Medium variieren.

Die zuverlässige Schätzung biometrischer Größen mit Hilfe eines VHM bedarf der Kombination mit lokalen terrestrischen Messungen, um dem Einfluss von Standortbedingungen gerecht zu werden. Im Fall einer 2-phasigen Stichprobeninventur lassen sich aus dem VHM abgeleitete Informationen mit Schätzungen aufgrund terrestrischer Messungen über ein Regressionsmodell koppeln. Für die restliche Fläche kann dann an jeder beliebigen Stelle des VHM eine Schätzung vorgenommen und via Regressionsmodell mit den besseren terrestrischen Schätzungen korrigiert werden. Bei der Vorratsschätzung (und bei der Schätzung biometrischer Größen im Allgemeinen) steigt in der Regel der Schätzfehler, je kleiner die Flächeneinheit für die Schätzung gewählt wird. Eine hohe räumliche Auflösung mit entsprechend kleinen Flächeneinheiten wie

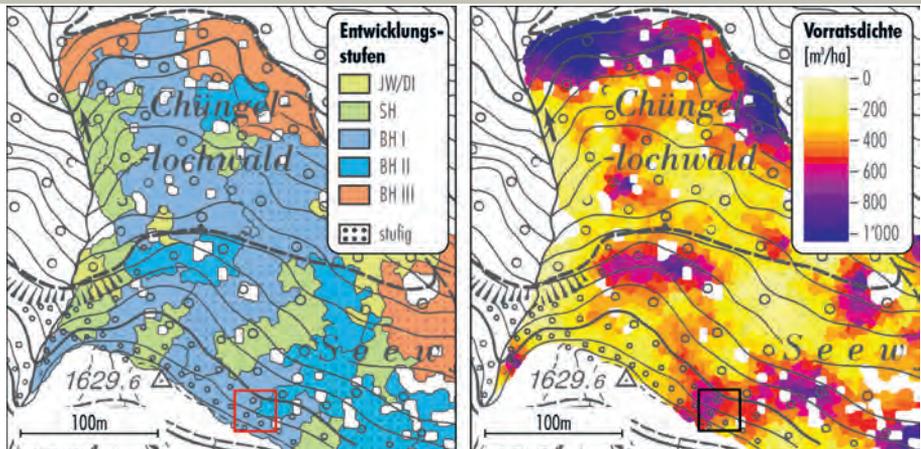


**Abb. 2: Automatisches Bündeln von sowohl ähnlichen als auch benachbarten Bäumen in Bestände.** (Bild: Jochen Breschan)

eine Vorratsdichtekarte kann demnach zu grösseren Schätzfehlern führen. Möchte man den Vorrat für ein Kleingebiet ermitteln (z. B. Bestand, Seillinie), sollte daher die Schätzung besser für das ganze Gebiet als über das Aufsummieren der Werte (und damit der Fehler) aus einer Vorratsdichtekarte erfolgen.

## Herausforderungen

Die Repräsentation des Waldes als 3-D-Vegetationshöhenmodell bietet heute die Möglichkeit, die Waldstruktur automatisch in abstrakter Form als Netzwerk zu erfassen, und damit forstlich relevante Merkmale zu schätzen. Dieser neue Weg der Informationsbeschaffung stellt die Praxis vor drei Herausforderungen.



**Abb. 3:** Automatisch erzeugte Bestandes- und Vorratsdichtekarte. Die Bestandeskarte ist nach Entwicklungsstufen gegliedert und unterscheidet stufige Bestände. Das Quadrat entspricht dem Ausschnitt in Abb. 1. (Bild: Übersichtsplan (UP), Kanton Graubünden, 10. 7. 2012.)

Die erste Herausforderung besteht darin, Vertrauen in Methoden aufzubauen, welche völlig anders als das menschliche Auge auf dem Luftbild Merkmale aufgrund von Rechenregeln auf einem Netzwerk bestimmen. Hierzu ist ein Grundverständnis über erstens die Datengrundlage, zweitens der daraus abgeleiteten Repräsentation des Waldes, und drittens der darauf angewandten Regeln von Nöten. Hiermit ist zudem die Brücke zur Forschung geschlagen, um im gegenseitigen Austausch die Methoden zu verbessern.

Die zweite Herausforderung besteht im Umgang mit dem neuen Kartenmaterial, das Waldmerkmale in hoher Auflösung und nicht mehr gemittelt über Bestände (die in Gebirgswäldern sehr gross sein können) beschreibt. Die räumliche Verteilung der Bäume ist damit realistisch charakterisierbar, wie am Beispiel der Vorratsdichtekarte aufgezeigt wurde (Abbildung 3).

Wo Überblick von Nöten ist, können Flächen mit ähnlichen Merkmalen automatisch zu grösseren Einheiten zusammengefasst (siehe Beispiel Bestandesausscheidung) und für diese wiederum die bestmöglichen Schätzungen (z. B. Vorrat) gemacht werden.

Die dritte Herausforderung besteht in der Möglichkeit, mit wiederholter Aufnahme eines VHM die Veränderungen im Wald über die Zeit zu messen. Denkbar wäre, diese räumlich-zeitliche Information grossflächig zur Erfolgskontrolle von Massnahmen einzusetzen und mit Felddaten zu ergänzen, wo die aus einem VHM gewonnenen Daten zu wenig Aussagekraft besitzen (z. B. Jungwuchsbeurteilung).

Eine hohe Fachkompetenz sowohl in der GIS-Modellierung als auch in der Statistik ist vonnöten, um aus Vegetationshöhenmodellen realistische Informationen für die Forstwirtschaft zu rechnen. Dies erfordert die Integration dieser Fachbereiche in der Ausbildung, um zukünftige Fachleute mit Brückenfunktion aufzubauen.

**Dr. Jochen Breschan**



ETH Zürich, Professur für Forstliches Ingenieurwesen  
8092 Zürich  
jochen.breschan@env.ethz.ch