

# Einzelbaumdetektion in bewaldetem Gebiet auf Basis von luftgestützten LiDAR-Daten

ANDREAS B. G. BAUMANN<sup>1</sup> & EMMANUEL BALTSAVIAS<sup>1</sup>

*Zusammenfassung: Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Detektion von Einzelbäumen in bewaldetem Gebiet auf Basis von luftgestützten LiDAR-Daten (ALS). Das Untersuchungsgebiet ist ein naturnaher Hochwald am Südhang der Lägern (Aargau, Schweiz) mit Bäumen in unterschiedlichen Wachstumsphasen sowie mit Totholz. Zur Verfügung standen zwei Referenzdatensätze mit Informationen zur Lage und Art des Baumes, sowie dem jeweiligen Durchmesser (BHD) und zwei ALS-Datensätze (un-/belaubt) mit einer Punktdichte von 23.7 und 19.6 Echos/m<sup>2</sup>. Die Punktwolken werden in den Voxelraum überführt und beginnend bei der untersten Ebene werden die Baumstammkandidaten vertikal verfolgt. Mit einer robusten linearen Regression wird die Orientierung des Baumstammkandidaten bestimmt. Weist die resultierende Gerade einen Zenitwinkel von weniger als 25° auf, wird die Lösung als detektierter Baumstamm deklariert. Mit diesem Algorithmus konnten 28.3% der Nadel- und 47.5% der Laubbäume detektiert werden und dies mit einer Nutzergenauigkeit von 81.3%. Es wurden hauptsächlich Bäume detektiert, die einen langen und freistehenden Baumstammbereich haben und es zeigte sich, dass Informationen über die Baumstämme hauptsächlich im unbelaubten ALS-Datensatz vorhanden sind und eine Kombination mit einem belaubten ALS-Datensatz zu keiner Verbesserung führt.*

## 1 Einleitung

Seit Jahrtausenden nutzt der Mensch den Wald als Rohstoffquelle. Das Holz wurde und wird als Brennstoff und Baumaterial für diverse Güter verwendet. Der Wald hat mit seiner artenreichen Fauna und Flora neben dem finanziellen Aspekt auch eine soziale Funktion als Erholungsraum und eine weitreichende Schutzfunktion, namentlich als Boden- (Erosion), Lawinen- (Verhinderung und Verminderung), Wasser- (Speicherung und Filterung) und Immissionschutz (Luftfilterung). Eine weitere nicht zu vernachlässigende Funktion des Waldes gewinnt im Kontext des sich abzeichnenden Klimawandels (IPCC 2014) immer stärker an Bedeutung: Die Produktion von Sauerstoff und die damit einhergehende Speicherung von Kohlenstoff. In diesem Sinne sind für die Eigentümer der Wälder, ebenso wie für die Wissenschaft, das Wissen über die Zusammensetzung und Eigenschaften der einzelnen Bäume – wie der Zustand, die Größe und die Art – unerlässlich. Sie erlauben es zuverlässige Aussagen zu monetären Werten und der vorhandenen Biomasse zu treffen. Diese Angaben mussten – vor dem Aufkommen diverser Fernerkundungsmethoden – mit Hilfe von zeitintensiven Feldarbeiten in repräsentativen Flächen erfasst und auf die restlichen Gebiete extrapoliert werden. Seit etwa 1995 befassten sich zahlreiche wissenschaftliche Studien mit der flächendeckenden Ableitung solcher Informationen aus luftgestützten LiDAR-, multi- und hyperspektralen Datenakquisitionen (VAUHKONEN et al.

---

<sup>1</sup> Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Stefano-Francini-Platz 5, CH-8093 Zürich, E-Mail: kontakt@andreas-baumann.ch, manos@geod.baug.ethz.ch

2012). Bisher hat sich noch keine Methode durchgesetzt und das Forschungsfeld ist noch immer aktiv.

Ziel dieser Arbeit war es, zu untersuchen, welche Ansätze es ermöglichen in einem dicht bewaldeten Gebiet einzelne Bäume zu detektieren. Dabei soll nicht nur die Position des Baumstamms, sondern auch die Kronenausdehnung und die Baumklasse (Laub- und Nadelbaum) erkannt werden. Hierzu stehen ALS-Datenakquisitionen des Kantons Aargau von März/April (unbelaubt) und Juni/Juli (belaubt) 2014 zur Verfügung. Für die Untersuchung wurden diese beiden Datensätze auch kombiniert prozessiert. Mit einer Flughöhe von 600-700 m.ü. Grund konnten im Untersuchungsgebiet beim unbelaubten Datensatz eine Punktdichte von 23.7 Echos/m<sup>2</sup> und beim belaubten eine Dichte von 19.6 Echos/m<sup>2</sup> realisiert werden. Die Erfassung erfolgte durch MILAN Geoservice GmbH mit einem LMS-Q680i von RIEGL. Der verwendete full waveform (FW) Laserscanner ermöglicht es, eine sehr hohe Anzahl an Echos zu registrieren. Eine hohe Pulsrepetitionrate von bis zu 400kHz ermöglicht eine effektive Messrate von 266,000 Bodenechos pro Sekunde. Das Sichtfeld beträgt maximal  $\pm 30^\circ$  und hat eine Winkelauflösung von  $0.001^\circ$ . Es wird im Nahinfrarotbereich (1,550nm) gemessen, wobei die Strahlendivergenz weniger als 0.5mrad beträgt, was einem Footprint von 50cm auf 1,000m Distanz entspricht. Für die Messkampagne wurde eine Lage-Standardabweichung von 2 – 15 cm und für die Höhe von 5 – 7 cm angestrebt und innerhalb der Zielspuren auch weitestgehend erreicht. Für diese Arbeit standen ALS-Daten mit Positions- und Intensitätswerten zur Verfügung. Die FW Informationen (z.B. Echobreite) konnten nicht zur Verfügung gestellt werden. Für Visualisierungen und Interpretationen standen zudem multispektrale optische Daten (Orthophotos) zur Verfügung. Das Untersuchungsgebiet befindet sich in einem Naturwaldreservat am südlichen Abhang der Lägern (47°28'42''N / 8°21'52''E), auf rund 700 Metern über Meer. Auf einer Fläche von 7.3 ha mit einer Neigung von bis zu 60% wachsen bis zu 50 Meter hohe Rotbuchen (*Fagus sylvatica*), gemeine Eschen (*Fraxinus excelsior*), Bergahorne (*Acer pseudoplatanus*), Weiß- und Rottannen (*Abies alba* und *Picea abies*) und dreizehn weitere Arten. Die Waldstruktur ist dabei sehr komplex mit Bodenbewuchs (Büsche und Sträucher), Jung und Altbäumen, teilweise geneigten und sich überkreuzenden Baumstämmen, sowie mit einer großen Anzahl an stehendem und liegendem Totholz (Abb. 1).



Abb. 1: Foto des naturbelassenen Hochwaldes auf der Lägern.

Für die quantitative Evaluation der Resultate standen zwei Referenzdatensätze zur Verfügung. Die Bauminventuren der «Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL)» (ETZOLD et al. 2011) und des «Remote Sensing Labors der Universität Zürich (RSL)» (LEITERER et. al. 2015). Beide Datensätze beinhalten Informationen zur Art und Lage der Bäume. Das Inventar des WSL umfasst 659 Bäume, wobei alle Bäume mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) von mind. 4 cm erfasst wurden. Die Lage der Bäume wurde von Vermessungsfachleuten bestimmt und mit einer Lagegenauigkeit von 5cm ausgewiesen. Das Inventar des RSL umfasst 1,365 Bäume und es wurden nur Bäume mit einem BHD von mind. 20 cm erfasst. Das RSL-Untersuchungsgebiet wurde mit einem terrestrischen Laserscanner gescannt und die Lagekoordinaten der Bäume aus deren Punktwolke abgeleitet. Die Positionsangaben beziehen sich auf einen Punkt auf dem Baumstamm und weisen eine Genauigkeit von einem halben Meter aus. Die Datensätze überlagern sich teilweise, weswegen ein Vergleich der Referenzdaten möglich ist. In der folgenden Abb. 2 ist ein Orthophoto und zwei Ausschnitte der Referenzdatensätze erkennbar. In der östlich gelegenen Überschneidung (WSL-1 / RSL) ist eine Translation in Nord-Süd-Richtung von ungefähr zwei Metern erkennbar. Im westlichen Gebiet ist eine Rotation der Datensätze von 10° erkennbar, was zu einem Lageversatz von bis zu sieben Metern führt. Betrachtet man den Hintergrund und die darin sichtbaren Bäume, ist erkennbar, dass der Datensatz des WSL korrekt ist und der Datensatz des RSL in diesem Abschnitt eine Rotation aufweist.



Abb. 2: Vergleich der Referenzdatensätze WSL-1/2 und RSL mit den entspr. Verschiebungsvektoren.

## 2 Prozessierungsmethode

Um einzelne Bäume in einem bewaldeten Gebiet in einer Punktwolke zu differenzieren, kann man sich grundsätzlich auf zwei Bereiche fokussieren: Die teilweise überlappenden Baumkronen können segmentiert oder die Baumstämme extrahiert werden. Bei Baumstämmen wird von der Annahme ausgegangen, dass sie in einer Punktwolke, mindestens teilweise, als lineare Objekte erkennbar sind. Bäume haben ein dichtes Blätterdach und infolgedessen ist insbesondere in der Nähe des Stammes nur ein niedriger Bodenbewuchs vorhanden. Eine Filterung nach freistehenden Punkten innerhalb einer horizontalen Ebene sollte es ermöglichen, Baumstämme zuverlässig zu detektieren.

## 2.1 Vorprozessierung

Um die Prozessierung zu beschleunigen und die zu verarbeitende Datenmenge zu reduzieren, erfolgt eine Vorprozessierung der Punktwolken. Wegen des dichten Bodenbewuchses und dem liegenden Totholz werden nur Echos, die mindestens zwei Meter über Grund liegen, berücksichtigt. Dieser Hörschwelldwert wurde verwendet, weil er in zahlreichen Publikationen (VAUHKONEN et al. 2012) angewandt und empfohlen wurde. Die nicht ausgeschlossenen Punkte werden zuerst in den Voxel- und anschließend in den Bildraum überführt. Der Voxelraum bildet sich aus regelmäßig angeordneten und nicht überlappenden Voxeln mit einer Kantenlänge von je einem Meter. Die Überführung erfolgt, indem die Echos dem jeweils umschließenden Voxel zugeteilt werden (Abb. 3a). Danach wird jeder Höhenstufe im Voxelraum ein Bild und jedem Voxel innerhalb der Höhenstufe ein entsprechendes Pixel im Bild (Abb. 3b) zugeordnet. Im Bildraum können Informationen als Grauwerte gespeichert werden. Für die Baumstammverfolgung wurde eine Schwarz-Weiß-Abbildung gewählt. Sofern einem Voxel ein oder mehrere Punkte zugeordnet sind, wird dem entsprechenden Pixel der Wert «1», ansonsten der Wert «0» zugewiesen. Ein Parameter minimale Intensität wird hier als Selektionskriterium eingeführt. Bei genauer Betrachtung der Punktwolken hat sich herausgestellt, dass schwache Intensitäten oftmals auf dünne Äste/Blätter oder Multipath zurückzuführen sind. Mit einem empirisch festgelegten Schwellwert von 15dB können diese herausgefiltert werden. Dadurch bleiben nur Baumstämme und andere großflächige Objekte erhalten.

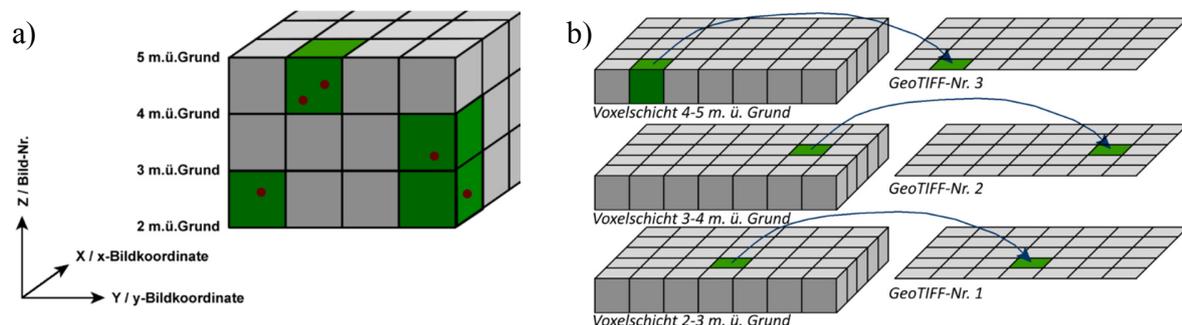


Abb. 3: (a) Zuordnung der ALS-Echos im Voxelraum und (b) Übertragung in den Bildraum.

## 2.2 Baumstammextraktion mittels Linienverfolgung

### 2.2.1 Dreistufige Filterung

Die dreistufige Filterung soll die Daten prozessieren, damit nur noch die Echos erhalten bleiben, die mit großer Wahrscheinlichkeit einem Baumstamm zugeordnet werden können. Die erste Filterstufe befasst sich mit der *maximalen Pixelgruppengröße*. Ein visueller Vergleich zwischen den generierten Bildern und den Referenzdaten zeigt, dass Baumstämme oftmals als Einzelpixel oder Zweierpixelgruppen auftreten (Abb. 4a). Größere Pixelgruppen sind meist auf Bodenbewuchs oder den Baumkronenbereich zurückzuführen. Als mögliche Kandidaten werden deshalb nur Pixelgruppen von bis zu zwei Pixeln (Parameter: Pixelgruppengröße) innerhalb einer 8er-Nachbarschaft der jeweiligen Hörschicht berücksichtigt.

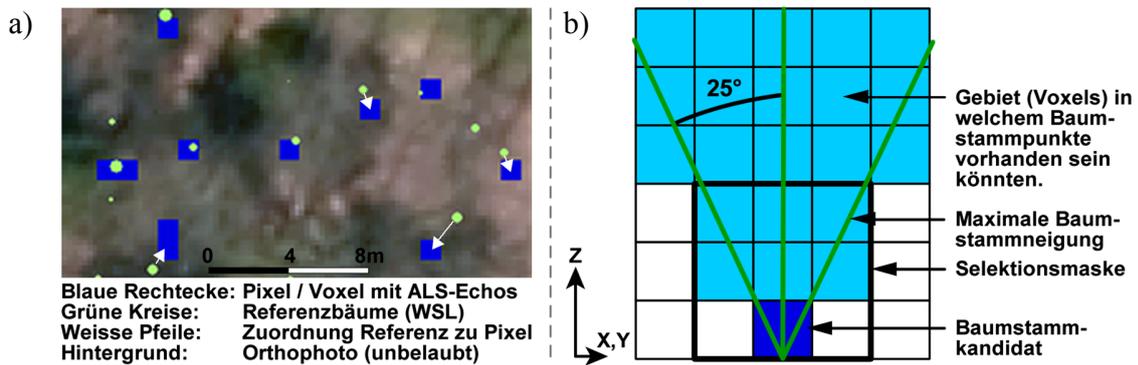


Abb. 4: (a) Ausschnitt aus Untersuchungsgebiet 1 (b) Querschnitt durch Voxelraum.

Die zweite Filterstufe widmet sich der Linienverfolgung. Die gefilterten Pixel einer jeden Höhenstufe sollen miteinander verknüpft werden (Clustering). Es wird die Annahme getroffen, dass ein Baum grundsätzlich vertikal wächst, aber infolge von Umwelteinflüssen (Instabilität des Bodens durch die Hangneigung, ständige, starke, gleichgerichtete Winde infolge der Exposition, etc.) bis zu 25° Grad geneigt sein kann (Abb. 4b). Die Linienverfolgung beginnt in der untersten Höhenstufe und jede darin enthaltene Pixelgruppe wird angesteuert. Über jede Pixelgruppe wird eine dreidimensionale Selektionsmaske gelegt, welche in x/y-Richtung um ein Voxel und in die positive z-Richtung um zwei Höhenstufen erweitert wird (Parameter: Selektionsmaskenhöhe). Alle Voxel, die sich innerhalb dieses Selektionsfilters befinden, werden einem Cluster zugeordnet. Sind Voxel bereits einem anderen Cluster zugeordnet, werden die Cluster vereint. Dies wird für alle Stufen und Voxel durchgeführt und am Ende werden alle Cluster denen mindestens drei oder mehr Voxel zugeordnet sind als potenzielle Baumstämme deklariert.

Abhängig von den gewählten Parametern können nahe beieinander stehende Bäume zu einem Cluster vereint werden. Um solche Baumgruppencluster aufzulösen, wurde ein empirischer Schwellenwert festgelegt: Sobald einem Baumcluster 40 oder mehr Echos zugeordnet sind, wird dieser aufgesplittet. Hierzu wird in der xy-Ebene eine Fläche aufgespannt. An jeder Position werden die in der z-Ebene übereinanderliegenden Voxel aufsummiert. Daraus resultiert ein Histogramm (Abb. 5a-b) an welches anschließend eine Segmentierung der Cluster via Watershed-Algorithmus (Abb. 5c) angewandt wird.

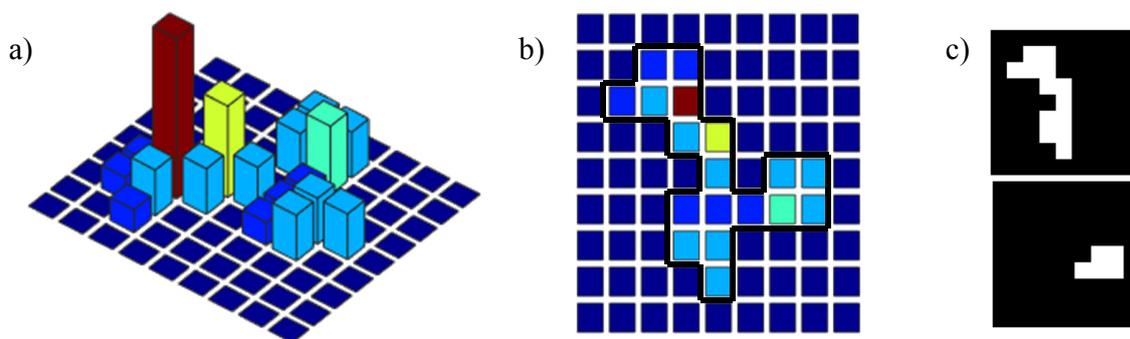


Abb. 5: Voxelhistogramm eines Baumstammkandidaten in der Seitenansicht (a) und Aufsicht (b), sowie den resultierenden Segmenten (c).

Die Cluster der potenziellen Baumstämme enthalten zahlreiche ALS-Punkte, die nicht nur Teil des Stammes sondern auch Bodenbewuchs, Nebenäste und Baumkronen wiedergeben. Um diese zu reduzieren wird in der dritten Filterstufe der freistehende Baumstammbereich detektiert. Dieser ist definiert als die Zone zwischen der Oberkante Bodenvegetation (OB) und der Unterkante Baumkrone (UB). Im Baumkronen- und Bodenvegetationsbereich gibt es im Vergleich zum Baumstammbereich zahlreiche Echos (Abb. 6). Die Vegetationskanten werden durch Segmentierung des Höhen-Histogramms der ALS-Punktewolke auf Basis der Dichteänderung bestimmt und beinhaltet folgende Schritte:

- a) Approximation der Baumstammposition. Das zuvor berechnete Voxelhistogramm wird hinzugezogen. Die Cluster-Voxel die der höchsten Säule zugeordnet sind werden selektiert und die enthaltenen Echos ausgelesen. Die Baumstammposition wird dann aus dem Mittelwert der X- und Y-Koordinaten dieser Echos geschätzt.
- b) Im Umkreis von fünf Metern um die approximierten Baumstammposition werden alle Echos des unbelaubten Datensatzes (Abb. 6, rote Kreuze), die nicht der Klasse Boden zugeordnet sind, selektiert und für die Berechnung des relativen Höhenhistogramm (Schichtdicke: ein Meter) verwendet.
- c) In Abb. 6 ist gut zu erkennen, dass die Histogramme lokale Maxima aufweisen, welche mit einem gleitenden Mittelwert (3er Nachbarschaft in der vertikalen Richtung) reduziert werden können.
- d) Ausgehend von der höchsten Säule im Histogramm (höchste Dichte in %) wird die UB gesucht. Die UB wird jeweils um einen Meter Richtung Boden verschoben, solange bis die folgenden beiden, empirisch festgelegten Bedingungen erfüllt sind:
  - Schwellenwert A =  $1/7 \cdot \text{Säulenhöhe}_{\text{höchste Dichte}} \quad \text{Säulenhöhe}_i \leq \text{Schwellenwert A}$
  - Schwellenwert B =  $1/70 \cdot \text{Säulenhöhe}_{\text{höchste Dichte}} \quad \text{Nachbardifferenz}_i \leq \text{Schwellenwert B}$
- e) Für die Oberkante der Bodenvegetation wird anschließend die höchste Säule die unterhalb der UB liegt ausgelesen. Hat diese eine höhere Dichte als der zuvor bestimmte Schwellenwert A, erfolgt die Detektion der OB nach dem gleichen Verfahren wie zur Bestimmung von UB, doch in umgekehrter Richtung. Hat die Säule eine geringere Dichte, wird die OB auf zwei Meter über Boden festgelegt.

### 2.2.2 Lineare Regression und RANSAC

Als nächstes wird überprüft, ob sich mindestens zwei dem Baumcluster zugeordnete Echos zwischen OB und UB befinden (Abb. 6, gelbe Ebenen). Trifft dies zu, könnte es sich um einen Baumstamm handeln. Für alle Echos, die dem Baumcluster zugeordnet sind und sich zwischen OB und UB befinden (Abb. 6, blaue Kreise), wird die Streuungsellipse (95% Konfidenzintervall) der projizierten Lage berechnet. Empirisch wurde eine minimale Halbachsenlänge von 75cm festgelegt, um eine zu starke Vorselektion zu verhindern. Diese Streuungsellipse wird zwischen OB und UB aufgespannt (Abb. 6, schwarze Ellipsen). Alle unbelaubten Echos die sich innerhalb des Zylinders befinden, werden für die Berechnung der Baumstammorientierung hinzugezogen. Dieser Schritt wird durchgeführt, weil Baumstammunkte – infolge fehlender Echos – zu weit auseinander liegen könnten, um miteinander verknüpft zu werden oder weil einfallende Äste zu große Pixelgruppen bilden. Auf die selektierten Punkte wird eine robuste lineare Regression

durchgeführt, um eine Gerade zu bestimmen, wobei das robuste Fitting auf dem RANSAC-Algorithmus (FISCHLER & BOLLES 1981) basiert. Von den Lösungen wird jene bevorzugt, welche die geringste Anzahl an groben Fehlern (Abstand von Gerade  $\geq 30\text{cm}$ ) und den kleinsten Zenitwinkel aufweist. Ist der Zenitwinkel kleiner als  $25^\circ$ , wird die Lösung als «detektierter Baumstamm» deklariert und abgespeichert.

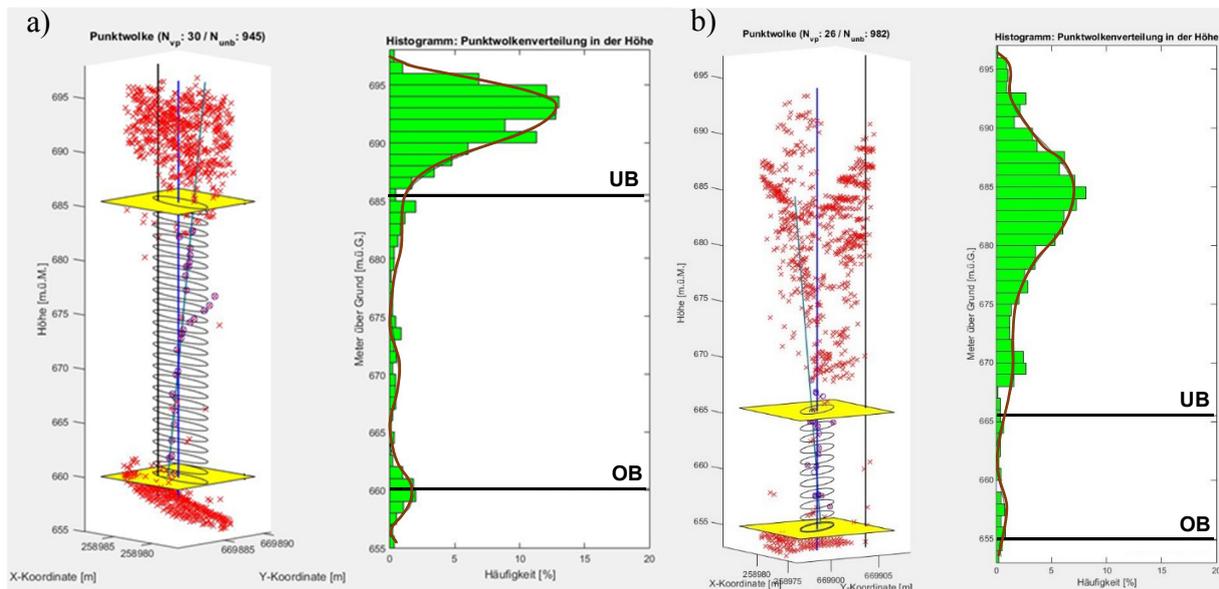


Abb. 6: Punktwolke und Höhenhistogramm eines (a) korrekt und (b) falsch detektierter Baumstammes. Punktwolke: Vertikale schwarze Linie: Baumstammposition nach Referenzdaten; Vertikale blaue Linie: approx. Baumstammposition; Nahezu vertikale, grüne Linie: Detektierter Baumstamm. Rote Kreuze: unb. Echos im Umkreis von 5 Meter um die approx. Baumstammposition; Blaue Kreise: Dem Baumcluster zugeordnete Echos; Gelbe Ebene: Vegetationskanten; Schwarze Ellipsen: Streuungsellipse (95%); Höhenhistogramm: Grüne Balken: Relative Punktdichte je Höhenschicht; Braune Polylinie: Gleitendes Mittel der relativen Punktdichte. Überschriften: NVP: Anzahl Echos die dem Baumcluster zugeordnet sind; Nunb: Gesamtzahl an unbelaubten Echos innerhalb des Umkreises von 5 Metern.

### 2.3 Baumstammextraktion mittels Lückendetektion

Die Baumstammextraktion mittels Lückendetektion ist eine zweite Methode, die getestet wurde. Bei dieser Methode wird nach etwas gesucht, das nicht vorhanden ist, also eine Lücke aufweist. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass – wenn man den Boden und die niedrige Vegetationsschicht betrachtet – Punkte überall auftauchen, ausser dort, wo massive Objekte sind, die über die niedrige Vegetationsschicht hinausragen (Abb. 7). Wenn diese Lücken betrachtet werden, sind die ovalen Objekte mit grosser Wahrscheinlichkeit Baumstämme.

Für die Evaluation des Algorithmus wurden zwei Datensätze verwendet: Die kombinierten ALS-Punktwolken (un-/belaubt) und Aufnahmen eines terrestrischen Laserscanners, welche im Rahmen der Bachelorarbeit «Erfassung archäologischer Steinreihen (Reusseggmauer) mittels terrestrischem Laserscanning» durchgeführt wurden.

Die Detektion läuft in drei Hauptschritten ab. Der erste Schritt beinhaltet die Selektion der relevanten Punkte. Als Selektionskriterium wird ein Höhenwert (Meter über Grund) festgelegt

und alle Echos die darunter liegen werden selektiert. Im zweiten Schritt werden diese Echos auf eine Ebene projiziert und als Rasterdatei abgespeichert. Der letzte Schritt beinhaltet die eigentliche Objektdetektion auf Basis der Rasterdatei und wurde im Rahmen dieser Arbeit nur manuell mittels visueller Interpretation durchgeführt. In der Rasterdatei wurde nach kreisförmigen Lücken gesucht, welche von Baumstämmen hinterlassen wurden. Es zeigte sich, dass dieser Ansatz für die Baumstammdetektion erst ab einer Punktdichte von 25 Echos/m<sup>2</sup> eindeutige Ergebnisse liefern würde und deshalb wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

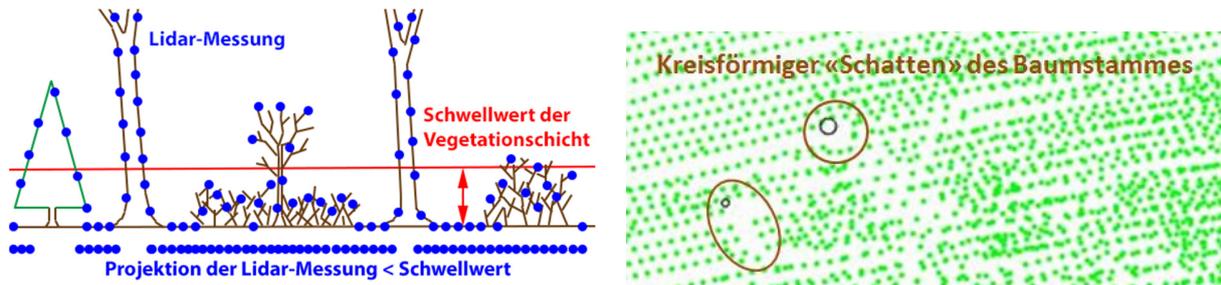


Abb. 7: (a) Querschnitt eines skizzierten Waldstücks und (b) Visualisierung aller Echos die bis zu einer Höhe von 2m über Grund liegen (grüne Punkte) und die Referenzdaten (schwarze Kreise)

### 3 Resultate und Diskussion

Der Algorithmus wurde mit unterschiedlichen Parametern (Pixelgruppengröße und Selektionsmaskenhöhe) getestet. Der Einfluss der Echofilterung auf Grund einer minimalen Intensität und des Splittings der Voxelgruppen wurde ebenso analysiert. Für die Überprüfung der Resultate wurden die detektierten Bäume zusammen mit den Referenzdaten (WSL-1/-2) visualisiert und anschließend manuell zugeordnet. In Abb. 8 sind die Resultate dieser Auswertung für das erste, Gebiet (WSL-1) ersichtlich. Es kann festgestellt werden, dass sich – mit Berücksichtigung einer minimalen Intensität von 15dB – die Erkennungsrate von Nadelbäumen nur geringfügig verändert (31.9% → 29.7%), hingegen hat sie bei Laubbäumen einen signifikanten Einfluss. Sie steigt um 7.4% von 43.6% auf 51%. Mit zunehmender Selektionsmaskenhöhe (3-5 Meter) nimmt die Anzahl Detektionen ab. Weiterhin ist mit zunehmender Pixelgruppengröße (2-3 Pixel) eine Abnahme der Detektionsrate von 5-10% feststellbar. In den Resultaten zeigte sich ebenfalls, dass das Splitting der Voxelgruppen essentiell ist. Abhängig von der Wahl der Parameter haben die «Splitting»-Bäume einen prozentualen Anteil zwischen 4 und 51% aller detektierten Bäume. Würde kein Splitting durchgeführt, könnte pro Voxelgruppe nur jeweils ein Baum detektiert werden, was zu einer stark verringerten Detektionsrate führen würde.

Durchschnittlich konnten  $41.5 \pm 2.9\%$  aller Bäume im Gebiet detektiert werden, was 122 von insgesamt 293 Exemplaren ( $BHD \geq 15\text{cm}$ ) entspricht. Dabei ist ein Unterschied zwischen Nadel- und Laubbäumen feststellbar. Nur  $28.3 \pm 2.7\%$  der Nadelbäume konnten detektiert werden (26 von 91 Exemplaren), demgegenüber steht eine Erkennungsrate von  $47.5 \pm 3.5\%$  bei Laubbäumen (96 von 202 Exemplaren). Nicht nur wie viele Bäume detektiert werden, ist wichtig um einen Algorithmus einschätzen zu können, sondern auch, wie zuverlässig das Resultat ist. Im Gebiet wurden bis zu 10% der Bäume mehrfach detektiert, was darauf zurückzuführen ist, dass die Cluster aufgrund ihrer großen Höhendifferenz, nicht miteinander vereint werden konnten. Des

Weiteren wurden 28 Objekte fälschlicherweise als Bäume detektiert, was einer Nutzergenauigkeit von  $81.3 \pm 1.3\%$  entspricht.

Bei näherer Untersuchung der falsch detektierten Bäume hat sich gezeigt, dass sie sehr oft bei kleinen Lichtungen auftreten, beispielsweise dort wo Tannen sehr nahe beieinander stehen. Durch das dichte Baumkronendach dringen nur wenige Signale hindurch und dort wo die Kronen sich überschneiden, entsteht ein Trichter, an dem die Pulse reflektiert werden und die registrierten Echos eine Linie bilden. Die Punktwolken (Abb. 6, rot) und dazugehörigen Höhenhistogramme (Abb. 6, grün) zeigen in diesem Fall ein ähnliches Bild wie bei einem «echten» Baumstamm.

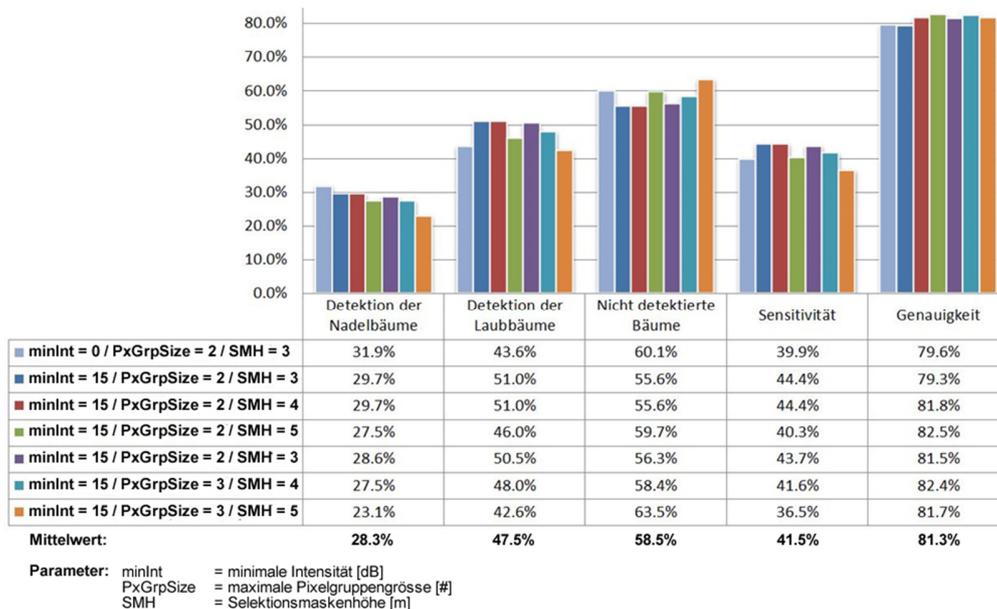


Abb. 8: Genauigkeit der Baumstammdetektion für Bäume mit BHD  $\geq 15$ cm im Referenzgebiet 1 (WSL-1).

## 4 Fazit

Es zeigte sich, dass für die Extraktion mittels Linienverfolgung nicht alle Echos verwendet werden sollten. Auf die belaubten ALS-Daten kann verzichtet werden, weil Messungen am Baumstamm fast ausschließlich in den unbelaubten ALS-Daten vorhanden sind. Des Weiteren sollten Punkte mit einer niedrigen Intensität vorgängig gefiltert werden, dadurch können 5-10% mehr Baumstämme detektiert werden. Ebenfalls ist das Splitting der Baumstammkandidaten wichtig, weil je nach gewählten Parameterwerten Cluster mit mehreren Bäumen gebildet werden. Die Erkennung der Kronenunterkante und der Bodenvegetationsoberkante funktioniert zuverlässig, weswegen der Baumstammbereich gut extrahiert werden kann. Es wurden nur die dem Cluster zugewiesenen Echos berücksichtigt, welche zwischen den Vegetationskanten liegen. Gab es Ausreißer bei diesen Echos oder handelte es sich bei diesen um Bodenvegetations- oder Kronenpunkte, wurde dies nicht überprüft und direkt versucht eine Linie an diese Punkte anzupassen. Dies kann unter Umständen zu falsch detektierten Bäumen führen.

Betrachtet man die Anzahl an detektierten Bäume, stellt man fest, dass nur gut 28.3% der Nadelbäume und 47.5% der Laubbäume detektiert werden können. Es konnten fast nur hohe Bäume, mit einem entsprechend langen, freistehenden Baumstamm detektiert werden. Jungbäume können, in Folge mangelnder Baumstammpunkte, nicht detektiert werden. Im Rahmen einer zukünftigen Arbeit sollte untersucht werden, ob die Fullwave-Informationen, insbesondere die Echobreite, durch eine verbesserte Echo-Filterung zu einer besseren Erkennungsrate führt. Ebenfalls könnte untersucht werden, ob die ALS-Punktwolke – basierend auf der Dichteänderung des Höhenhistogramms – separiert werden sollten, um die jeweiligen Segmente mit unterschiedlichen Algorithmen zu prozessieren. So könnten die hohen Bäume mit der Baumstammextraktion und die niedrigen Bäume mit einem Watershed-Algorithmus detektiert werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es alleine unter Zuhilfenahme der Baumstammextraktion nicht möglich ist, alle Bäume zu erfassen. Es ist unerlässlich, dass andere Methoden (bspw. Watershed auf Canopy Height Models) und weitere Daten (bspw. multi-/hyperspektrale Daten) hinzugezogen werden, um eine vollständigere Erfassung des Baumbestandes zu ermöglichen.

## 5 Literaturverzeichnis

- ETZOLD, S., RUEHR, N. K., ZWEIFEL, R., DOBBERTIN, M., ZINGG, A., PLUESS, P., HÄSLER, R., EUGSTER, W. & BUCHMANN, N., 2011: The carbon balance of two contrasting mountain forest ecosystems in Switzerland: Similar annual trends, but seasonal differences. *Ecosystems* **14** (8), 1289-1309.
- FISCHLER, M. & BOLLES, R., 1981: Random Sample Consensus: Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. *Communications of the ACM* **24** (6), 381-395.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Core Writing Team, Pachauri, R.K & Meyer, L.A. (eds.), IPCC, Switzerland, 151 p.
- LEITERER, R., FURRER, R., SCHAEPMAN, M. E., & MORSORF, F., 2015: Forest canopy-structure characterization: A data-driven approach. *Forest Ecology and Management* **358**, 48-61.
- VAUHKONEN, J., ENE, L., GUPTA, S., HEINZEL, J., HOLMGREN, J., PITKÄNEN, J., Solberg, S., Wang, Y., Weinacker, H., Hauglin, K.M., Lien, V., Packalén, P., Gobakken, T., Koch, B., Næsset, E., Tokola, T. & Maltamo, M., 2012: Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry* **85** (1), 27-40.