

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 168 (2017)

Heft: 3

Artikel: Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten

Autor: Menk, Julia / Dorren, Luuk / Heinzl, Johannes

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1097478>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 02.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten

Julia Menk Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)*
Luuk Dorren Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)
Johannes Heinzel Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Mauro Marty Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)
Markus Huber Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (CH)

Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, ob das Tool FINT (Find Individual Trees) in unterschiedlichen Waldtypen und auch in steilen Hanglagen Einzelbäume in Kronenhöhenmodellen (KHM) genügend präzise erkennen kann, um die Schutzwaldwirkung abschätzen zu können. Hierfür wurden in den Regionen Bündner Herrschaft und Schanfigg (Kanton Graubünden, Schweiz) in zwölf zufällig gewählten Probeflächen Referenzbäume eingemessen und beschrieben. Für diese Probeflächen wurden aus luftgestützten Laserscanning-Daten KHM unterschiedlicher Auflösung und Glättung erstellt und anschliessend mit FINT prozessiert. Zusätzlich wurde getestet, ob ein Modell, das den Mindestabstand zwischen einem Baum und den benachbarten Bäumen in Abhängigkeit von seiner Höhe definiert (MBA-Modell), zu besseren Detektionsergebnissen führt. Die Studie zeigte, dass eine feinere KHM-Auflösung kombiniert mit einer stärkeren Glättung zu Resultaten führt, die mit jenen vergleichbar sind, welche mit einem ungeglätteten, gröber aufgelösten KHM erreicht werden. Die kleinste Abweichung zwischen der Anzahl eingemessener und detektierter Bäume wurde mit dem KHM in 1-m-Auflösung erzielt, welches ungeglättet und ohne MBA-Modell angewendet wurde. Es hat sich gezeigt, dass FINT Grundlagen liefern kann, um die Wirkung des Schutzwaldes mit seinen heutigen Strukturen abschätzen zu können. Diese FINT-Resultate können schliesslich – nach Evaluierung im Gelände – direkt in Naturgefahren-Simulationsmodelle integriert werden.

Keywords: airborne laser scanning (ALS), single tree detection, tool «Find Individual Trees» (FINT), local maxima, canopy height model (CHM), protection forest

doi: 10.3188/szf.2017.0151

* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail julia.menk@bfh.ch

Rund 42% des Schweizer Waldes dienen direkt oder indirekt dem Schutz von Siedlungen, Verkehrswegen und sonstigen wichtigen Infrastrukturanlagen vor Naturgefahren wie Steinerschlag, Lawinen oder Hangrutschungen (Huber et al 2015). Das Stichprobennetz des Schweizerischen Landesforstinventars (LFI) mit 1.4 km Maschenweite erlaubt repräsentative Aussagen über den Zustand und die Veränderung des Schutzwaldes im Durchschnitt über grössere Regionen (beispielsweise die Schutzwaldregionen, siehe Duc et al 2010). Jedoch kann mit diesem Stichprobendesign der Schutzwald nicht flächendeckend mit den für seine Beurteilung relevanten Kenngrössen wie Baumarten, Baumpositionen, Baumhöhen, Deckungsgraden und Bestandeslücken erfasst werden.

Für die Extraktion solcher Kenngrössen erweist sich die Fernerkundung seit vielen Jahren als

geeignete Methode (Maier & Hollaus 2006, Dorren et al 2007, Bauerhansl et al 2010). Die ersten methodischen Ansätze wurden von Haenel et al (1987) und Pinz (1989) auf der Grundlage von spektralen Daten entwickelt, wobei sich bereits bei ihnen die typische Limitierung der Einzelbaumerkennung auf dominante und kodominante Bäume zeigte.

Seit den 2000er-Jahren haben für die Einzelbaumerkennung die Daten des flugzeuggetragenen Laserscannings (airborne laser scanning, ALS; auch als light detection and ranging, LiDAR, bezeichnet) die rein spektralen Daten nahezu ersetzt. Die hieraus ableitbaren rasterbasierten Kronenhöhenmodelle (KHM; Hyyppä & Inkinen 1999, Hyyppä et al 2001, Falkowski et al 2006, Heinzel et al 2011) finden dabei eine breite Verwendung. Diese KHM ordnen jeder horizontalen Position (x und y) genau einen Höhenwert (z) zu. Sie repräsentieren in diesem

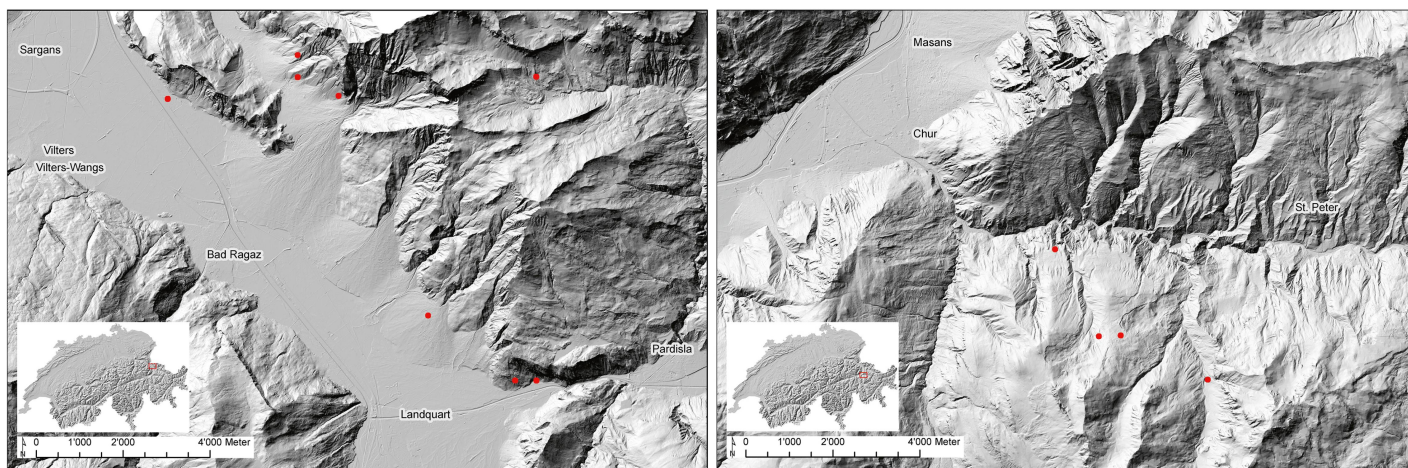


Abb 1 Lage der Untersuchungsplots (rote Punkte) im Kanton Graubünden (Schweiz): links Bündner Herrschaft, rechts Schanfigg.

Quelle: Bundesamt für Landestopografie: swissALTI3D, Swissnames

Sinne die Höhe des Waldes an einem bestimmten Ort. Für die Einzelbaumerkennung werden potenzielle Kronenspitzen mithilfe der lokalen Höhenwertmaxima im KHM extrahiert. Eysn et al (2015) haben aktuelle, auch auf ALS-Daten beruhende Methoden der Einzelbaumerkennung im alpinen Raum untersucht. Aus dieser Arbeit lässt sich schliessen, dass der kronenspitzenorientierte Ansatz mit lokalen Höhenmaxima sehr gute Ergebnisse liefert, er aber allenfalls noch verbessert werden kann durch ein vorgängiges Glätten des KHM mit einem Gauß-Filter. Alternativ zu den rasterbasierten KHM-Ansätzen können die Einzelbäume auch direkt aus ALS-Punktwolken detektiert werden (Wang et al 2008, Reitberger et al 2009, Gupta et al 2010). Für sehr grosse Flächen ist dieser Lösungsansatz jedoch aufgrund des deutlich grösseren Rechenaufwandes oft weniger gut geeignet.

In einem Pilotprojekt des LFI in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL) wird derzeit untersucht, ob und wie es möglich ist, aus Fernerkundungsdaten flächige Informationen über die Bestandesstruktur und die Verjüngung von Schutzwäldern abzuleiten. Dabei kommt unter anderem das automatische Einzelbaumdetektions-Tool FINT (Find Individual Trees; Dorren 2014) zur Anwendung, welches ebenfalls auf dem Ansatz lokaler Höhenwertmaxima basiert. Um den zukünftigen schweizweiten Einsatz von FINT zu ermöglichen, sollte das Tool Einzelbäume in unterschiedlichen Waldtypen und auch in sehr steilen Hanglagen erkennen können. Hauptfaktoren der Einzelbaumerkennung sind einerseits die räumliche Auflösung der KHM und andererseits die lokale Höhenvariabilität. Ist die räumliche Auflösung zu grob (z.B. 10×10 m), kann die Höhe einzelner Bäume nicht detektiert werden, sondern nur die durchschnittliche Höhe der Bäume, die sich innerhalb dieser Zone befinden. Ist hingegen die Auflösung zu fein, besteht

die Gefahr, dass Bildrauschen auftritt und eine Baumkrone mehrere lokale Höhenmaxima besitzt. Als Folge davon detektiert FINT fälschlicherweise zu viele Baumwipfel. Um dies zu verhindern, muss folglich eine adäquate KHM-Auflösung verwendet werden, und es müssen gegebenenfalls auch störende Kleinstrukturen vorgängig herausgefiltert werden.

Bei der vorliegenden Arbeit wird mit einem systematischen Vergleich ermittelt, welche Kombination aus KHM-Auflösung und -Glättung sich am besten für die Einzelbaumdetektion mit FINT eignet. Zusätzlich wird getestet, ob ein neuartiges Modell, das den Mindestabstand zwischen benachbarten Bäumen in Abhängigkeit ihrer Höhe definiert (MBA-Modell), zu besseren Detektionsergebnissen führt.

Material und Methoden

Perimeter

Die automatische Einzelbaumdetektion wurde in den Schweizer Alpen, in den Gebieten Bündner Herrschaft und Schanfigg (Kanton Graubünden), getestet. Hierfür wurden in diesen beiden Regionen zwölf Probeflächen des LFI oder der Waldinventur des Kantons Graubünden zufällig als Testplots bestimmt (Abbildung 1).

Die Plots befinden sich mehrheitlich in Gelände mit 25 bis knapp 40 Grad Neigung. Jene im Gebiet Bündner Herrschaft liegen zwischen 500 und 1000 m ü. M., also in montanen Lagen, jene im Schanfigg reichen mit Höhenlagen zwischen 1000 und 1900 m ü. M. teilweise bis ins Subalpin. Die zwölf Plots sind planimetrisch kreisrund und haben eine Fläche von 200 m² (innerer Erhebungskreis) beziehungsweise 500 m² (äusserer Erhebungskreis). Sie enthalten hauptsächlich Nadelholz (87%; Fichte [*Pinus abies*], Waldföhre [*Pinus sylvestris*], Tanne [*Abies alba*] und Lärche [*Larix decidua*]). Der Rest ist überwiegend Buche (*Fagus sylvatica*).

Parameter	Schätzwert	Standardfehler	p-Wert
a	11.53	0.311	<0.001
b	-1.378	0.103	<0.001
c	-0.00009	0.00002	<0.001

Tab 1 Parameterschätzungen für das Modell in Gleichung 1.

Referenzdaten

Für die Validierung der detektierten Bäume wurde von Referenzbäumen die Stammposition auf 1.3 m Höhe eingemessen. Dabei wurden nur jene Bäume berücksichtigt, welche innerhalb des inneren Erhebungskreises der Stichprobe (von 200 m²) die Kluppschwelle von 12 cm überschritten. Die im äusseren Kreis (500 m²) erhobenen Bäume, welche die Kluppschwelle von 36 cm überschritten, wurden bei der Validierung der Anzahl detektierter Bäume bewusst weggelassen und nur für einen visuellen Vergleich verwendet. Somit basiert die Schätzung der lokalen Stammzahl pro Hektare auf den Daten des inneren Erhebungskreises. Hierfür wurden nur die lebenden Bäume mit einer gemessenen Mindesthöhe von 10 m berücksichtigt. Aufgrund der Fläche von 200 m² des inneren Erhebungskreises wurde die Anzahl der berücksichtigten Bäume mit 50 multipliziert, um eine Abschätzung der Anzahl Bäume pro Hektare zu erhalten, im Folgenden als N_{obs_ha} bezeichnet. Zusammen mit der Baumposition wurden von jedem Baum Attribute wie Baumhöhe, Baumart, Brusthöhdurchmesser (BHD), Wuchsform und Eigenschaften wie «Spitze abgebrochen» oder «Krone abgebrochen» erhoben. Der Datensatz enthielt insgesamt 126 Bäume. Die Stammzahldichte auf den Plots variierte zwischen 100 und 700 Bäumen pro Hektare.

Eingangsdaten

Die automatische Einzelbaumdetektion erfolgt auf der Grundlage von KHM. Diese wiederum basieren auf ALS-Daten, die mit dem Sensor LMS-Q780 von Riegl am 5. und 6. August 2015 erhoben worden sind. Die durchschnittlich erreichte Punktdichte beträgt 30 Punkte/m² (alle Reflexionen) beziehungs-

weise 12 Punkte/m² (letzte Reflexion). Die vertikale Genauigkeit der ALS-Daten im Vergleich zu Referenzmessungen liegt im Durchschnitt bei 10 cm. Aus der ALS-Punktwolke wurden drei KHM in den Auflösungen 0.25 m, 0.50 m und 1.00 m erstellt.

Die Vorgehensweise kann folgendermassen zusammengefasst werden:

1. Klassierung von Bodenpunkten des ALS-Datensatzes. Die Punktdichte der Bodenpunkte beträgt durchschnittlich 4.2 Punkte/m².
2. Normalisierung, d.h. punktweise Berechnung der Höhendifferenz zwischen den Punkten und dem durch Bodenpunkte repräsentierten Terrainmodell.
3. Erstellung der KHM-Raster in den unterschiedlichen räumlichen Auflösungen. Hierfür wurde der «pit-free CHM»-Algorithmus von Khosravipour et al (2014) verwendet, welcher in der Software LASTools (Rapidlasso GmbH, Gilching, Deutschland) implementiert ist.

Methoden

Mindestbaumabstand-Modell

Ein Modell zur Schätzung des Mindestabstands zwischen benachbarten Bäumen in Abhängigkeit von der Baumhöhe (MBA-Modell) könnte die Gefahr einer Überdetektion von Bäumen durch FINT verringern. In Anlehnung an den Ansatz von Reineke (1933) wurde basierend auf den Daten des LFI1 (EAFV & BFL 1988) mittels Quantilregression durch das 99. Perzentil ein statistisches Modell zur Schätzung der maximalen Stammzahl pro Hektare (N_{ha}) in Abhängigkeit von der Bestandesmittelhöhe (BMH_m ; m) und der Seehöhe (SH ; m ü. M.) parametrisiert (Schätzwerte vgl. Tabelle 1). Das Modell hat folgende Form:

$$\ln(N_{ha}) = a + b \times \ln(BMH_m) + c \times \ln(BMH_m) \times SH \quad (1)$$

Die Bestandesmittelhöhe wurde berechnet als die mit der repräsentierten Stammzahl gewichtete mittlere Höhe der Probestämme, wobei für jeden Probestamm zuvor die Baumhöhe mittels allometrischer Modelle (Kaufmann 2001) geschätzt wurde. Es wurden nur LFI-Probestflächen in einschichtigen Bes-

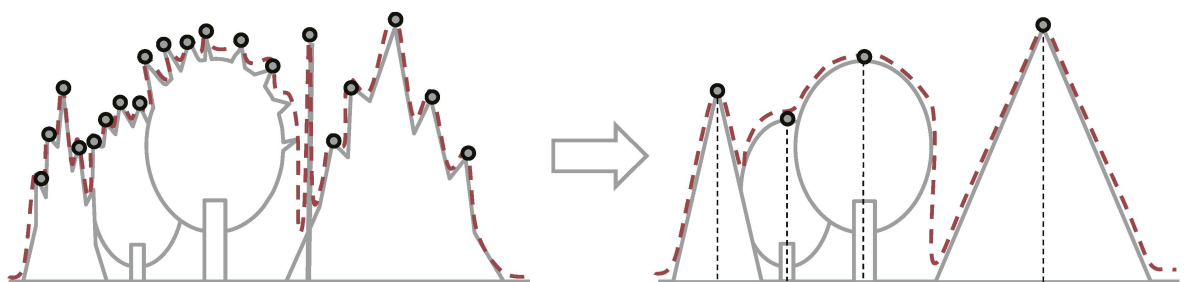


Abb 2 Links: schematische Profilansicht der Oberfläche von Einzelbäumen, wie sie in einem hochauflösenden, unglätteten KHM (rot gestrichelte Linie) erscheint. Baumstrukturen wie Äste oder auch Artefakte (siehe senkrechten Strich rechts der Mitte) würden ohne Glättung als lokale Maxima (schwarze Punkte) detektiert und so zu einer Überdetektion von Einzelbäumen führen. Rechts: schematische Profilansicht der Oberfläche von Einzelbäumen, wie sie nach Glättung der KHM (rot gestrichelte Linie) erscheint.

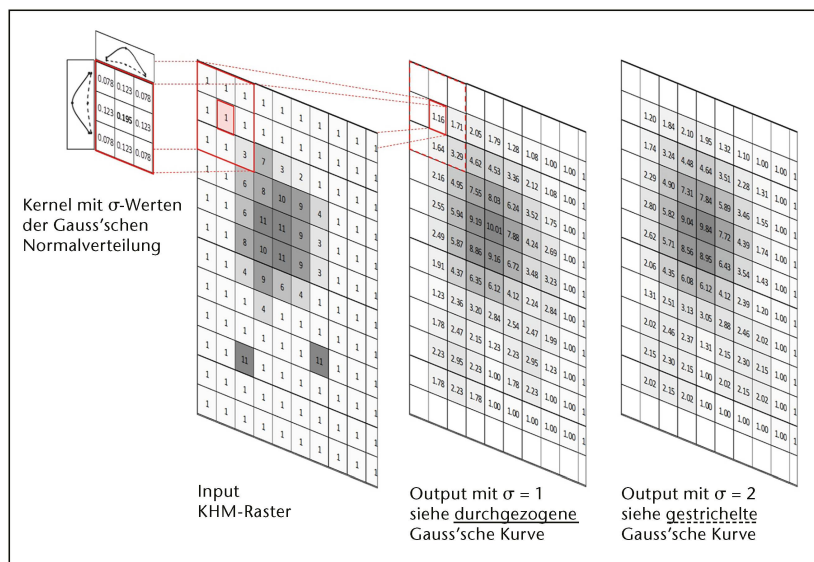


Abb 3 Funktionsweise und Effekt eines Gauss-Filters bei Verwendung eines Kernel von 3×3 Pixeln und unterschiedlichem σ zur Glättung eines KHM.

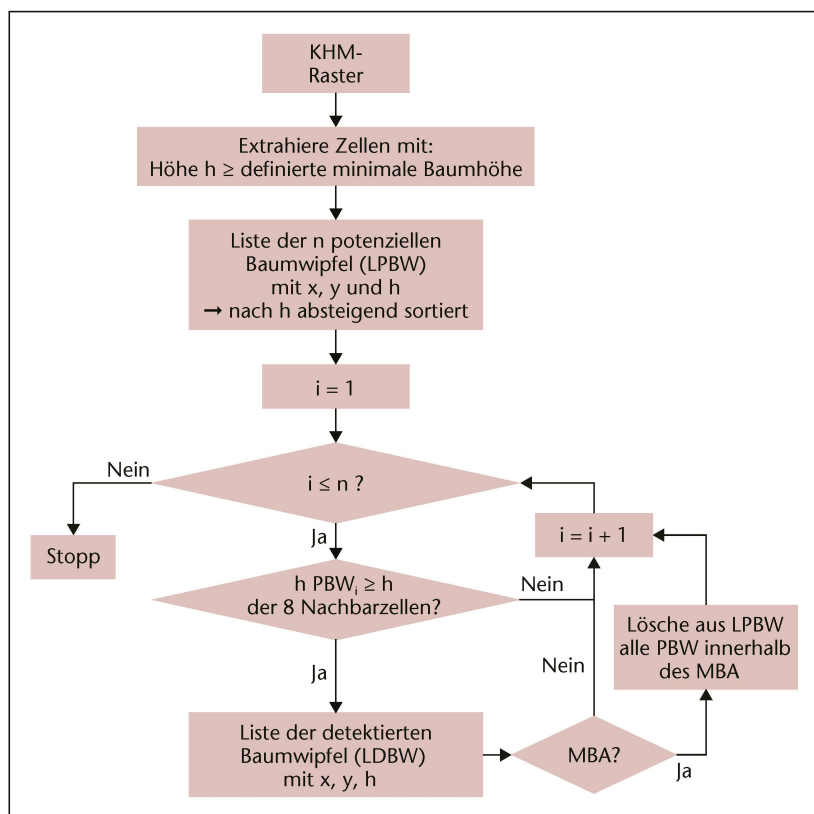


Abb 4 Ablauf des FINT-Analyseprozesses. PBW: potenzieller Baumwipfel.

tänden mit dem Schlussgrad «gedrängt», «normal/locker» und «räumig» verwendet. Mehrschichtige Bestände, stufige Bestände oder Bestände mit Rotenstruktur wurden somit ausgeschlossen. Der Stichprobenumfang betrug 3346 Probeflächen.

Unter der Annahme, dass die Bäume gleichmässig im Bestand verteilt sind, lässt sich das Stammzahlmodell (Formel 1) mithilfe der Formel (2) einfach zum gesuchten MBA-Modell umformen.

$$DIST = \sqrt{\frac{10 \cdot 000}{N \cdot h_a}} \quad (2)$$

KHM-Glättung

Die Einzelbaumdetektion mit FINT basiert auf der Analyse von lokalen Maxima in Rasterzellen des KHM. Verwendet man ein ungeglättetes KHM als FINT-Input, besteht die Gefahr, dass das Tool bei stark strukturierten Oberflächen oder als Folge von Artefakten zu viele Einzelbäume detektiert (Abbildung 2).

Um eine geeignete Grundlage für die Analyse lokaler Maxima zu schaffen, müssen demnach die ungewollten Strukturen vorgängig reduziert werden. Dies kann durch das Herabsetzen der KHM-Auflösung geschehen, was aber einen Datenverlust mit sich bringt, oder durch das Herausglätten dieser Strukturen, beispielsweise mit einem Gauss-Filter. Dieser Filter berücksichtigt bei der Glättung einer Zelle all deren Nachbarzellen innerhalb einer bestimmten Distanz (hier 3×3 Pixel) und gewichtet diese Zellen jeweils mit σ -Werten der Gauß'schen Normalverteilung (Abbildung 3). Hierbei kann mit dem Streuungsparameter σ die Breite der Normalverteilung gewählt werden. Als Folge davon werden die Nachbarzellen mit zunehmendem Abstand geringer gewichtet als die Zentrumszelle. Bei einem grossen σ erhalten die entfernter gelegenen Zellen im Verhältnis zur Zentrumszelle ein stärkeres Gewicht als bei einem kleinen σ . Ein grösseres σ führt demnach zu einer stärkeren Mittelung der Werte und somit zu einer stärkeren Glättung eines Rasters. In der vorliegenden Untersuchung wurden drei Glättungsstärken verwendet ($\sigma = 1$ [sanfte Glättung] bis $\sigma = 3$ [starke Glättung]).

Der Vorteil des Gauss-Filters liegt darin, dass grosse Strukturen wie Baumkronen trotz Glättung deutlich erhalten bleiben. Kleine Strukturen und Artefakte im KHM (siehe einzelne, dunkel eingefärbte Rasterzellen in Abbildung 3) verschwinden hingegen fast gänzlich. Weil der Gauss-Filter bei der Glättung die Werte der lokalen Maxima reduziert, müssen die effektiven Höhen der Bäume dem noch nicht geglätteten KHM entnommen werden.

Einzelbaumdetektion mit FINT

Das allfällig geglättete KHM wird als Input-Raster für die Einzelbaumdetektion mit FINT verwendet. Diese läuft folgendermassen ab (Abbildung 4): Zunächst werden vom Input-KHM nur jene Zellen ausgelesen, welche grössere Werte aufweisen als die minimal definierte Baumhöhe, hier 10 m. Diese Zellen stellen potenzielle Baumwipfel (PBW) dar. Von diesen werden die Koordinaten (x, y) sowie die Höhe (h) in die Liste der potenziellen Baumwipfel (LPBW) übertragen. Diese Liste wird nach absteigender Baumhöhe sortiert, damit der höchste potenzielle Baumwipfel (PBW) als erster weiter analysiert und verarbeitet wird.

Die nun folgenden Schritte sind Bestandteile einer Schleife, welche alle PBW der LPBW abarbei-

Merkmal	Variante
Auflösung Kronenhöhenmodell (KHM)	0.25, 0.5 und 1.0 m
MBA-Modell	Ja/nein
Glättung KHM mit Gauss-Filter	Ja/nein
Glättungsstärke (σ)	1, 2 und 3

Tab 2 Eingangsdaten und Parameter der getesteten Varianten. MBA-Modell: Mindestbaumabstand-Modell.

tet: Als Erstes wird überprüft, ob die Höhe von PBW_i grösser oder gleich ist wie die Höhe der acht Nachbarzellen (siehe auch Abbildung 3). Trifft dies nicht zu, so handelt es sich nicht um ein lokales Maximum und somit auch nicht um einen Baumwipfel. In dem Fall wird die Schleife sogleich mit dem nächsten potenziellen Baumwipfel (PBW_{i+1}) der LPBW durchlaufen. Ist die Höhe der Zentrumszelle hingegen grösser als jene der Nachbarzellen, so handelt es sich um ein lokales Maximum, und der PBW_i wird als effektiv detektierter Baum in die Liste der detektierten Baumwipfel (LDBW) eingetragen.

Wurde eingangs bestimmt, dass das MBA-Modell angewendet werden soll, kommt ein weiterer Schritt hinzu: In diesem werden alle potenziellen Baumwipfel, die sich innerhalb des Mindestabstands zu PBW_i befinden, aus der Liste gelöscht. Nach diesem Löschprozess wird die Schleife mit dem nächsten der noch verbleibenden potenziellen Baumwipfel der Liste durchlaufen.

Gegenüberstellung der Varianten

In der vorliegenden Untersuchung wurden insgesamt 24 Varianten getestet, die sich aus der Kombination von KHM-Auflösung, KHM-Glättung und Anwendung des MBA-Modells ergaben. Tabelle 2 rekapituliert die für FINT verwendeten Einstellungen. Um die Varianten evaluieren und priorisieren zu können, wurden in einem ersten Schritt folgende Kennzahlen für jeden Plot und jede Variante berechnet:

- Absolute Abweichung (AE; Absolute Error) zwischen der auf den Probeflächen beobachteten (N_{obs_ha}) und der mit FINT detektierten Stammzahl pro Hektare (N_{det_ha})
- Mit N_{obs_ha} normalisierte absolute Abweichung (NAE; Normalized Absolute Error)

In einem zweiten Schritt wurden Kennzahlen für die Validierung der Varianten über alle Plots hinweg ermittelt:

- Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE; Root Mean Squared Error)
- Durchschnittliche normalisierte absolute Abweichung (MNAE; Mean Normalized Absolute Error)
- Mittlere Entdeckungsrate im inneren Erhebungskreis (MDR; Mean Detection Rate = N_{det_ha} / N_{obs_ha})

Da die RMSE-Kennzahl die grösseren Stammzahlabweichungen stärker gewichtet als die kleineren und weil diese Kennzahl den Fehler ohne Berücksichtigung der Vergleichsbasis darstellt, wurde für die spätere Beurteilung der FINT-Varianten auch der MNAE berechnet, welcher die durchschnittliche prozentuale Abweichung von N_{det_ha} zu N_{obs_ha} zeigt.

Ergebnisse

Die Ergebnisse in Tabelle 3 zeigen, dass mit zunehmender Auflösung auch eine stärkere Glättung des KHM nötig ist. Ferner ist feststellbar, dass eine feinere KHM-Auflösung kombiniert mit einer stärkeren Glättung zu Resultaten führt, die mit jenen vergleichbar sind, welche mit einem ungeglätteten, gröber aufgelösten KHM erreicht werden.

Die RMSE variieren bei den präsentierten FINT-Varianten im Bereich zwischen 117 und 152 Bäumen/ha. Der kleinste RMSE wurde mit dem KHM in 1-m-Auflösung erzielt, welches ungeglättet und ohne MBA-Modell angewendet wurde. Der kleinste MNAE wurde ebenfalls mit dem KHM in 1-m-Auflösung erzielt, jedoch unter Verwendung des MBA-Modells. Die gezeigten Varianten über- oder unterschätzen alle die Stammzahl pro Plot um jeweils rund einen Drittel. Die MDR bewegt sich bei den besten Varianten zwischen 71% und 81%. Auch bei dieser Kennzahl schneidet die Variante ohne MBA-Modell jeweils besser ab als die Gegenvariante mit MBA-Modell. Allerdings werden bei vier beziehungsweise sieben von zwölf Einzelplots durch die Gegenvariante die besseren Resultate erzielt.

KHM- Auflösung	Variante	MBA-Modell	Gauss-Filter	RMSE (Stämme/ha)	MNAE (%)	MDR (%)	Anzahl Plots mit besserer MDR dank MBA
1.00 m	Partiell beste Variante	ohne	ohne	117	35	81	7 von 12
	MBA-Gegenvariante	mit	ohne	130	29	73	
0.50 m	Beste Variante	ohne	mit $\sigma = 1$	134	31	76	4 von 12
	MBA-Gegenvariante	mit	mit $\sigma = 1$	152	31	67	
0.25 m	Beste Variante	ohne	mit $\sigma = 2$	118	31	71	4 von 12
	MBA-Gegenvariante	mit	mit $\sigma = 2$	149	32	59	

Tab 3 Ausgewählte Ergebnisse aus der Variantenanalyse zur Einzelbaumerkennung mit FINT. Dargestellt sind jeweils die beste Variante pro KHM-Auflösung sowie die jeweilige MBA-Gegenvariante. KHM: Kronenhöhenmodell; MBA-Modell: Mindestbaumabstand-Modell; σ : Glättungsstärke (Stärke des Gauss-Filters); RMSE: Root mean squared error; MNAE: Mean normalized absolute error; MDR: Mean detection rate.

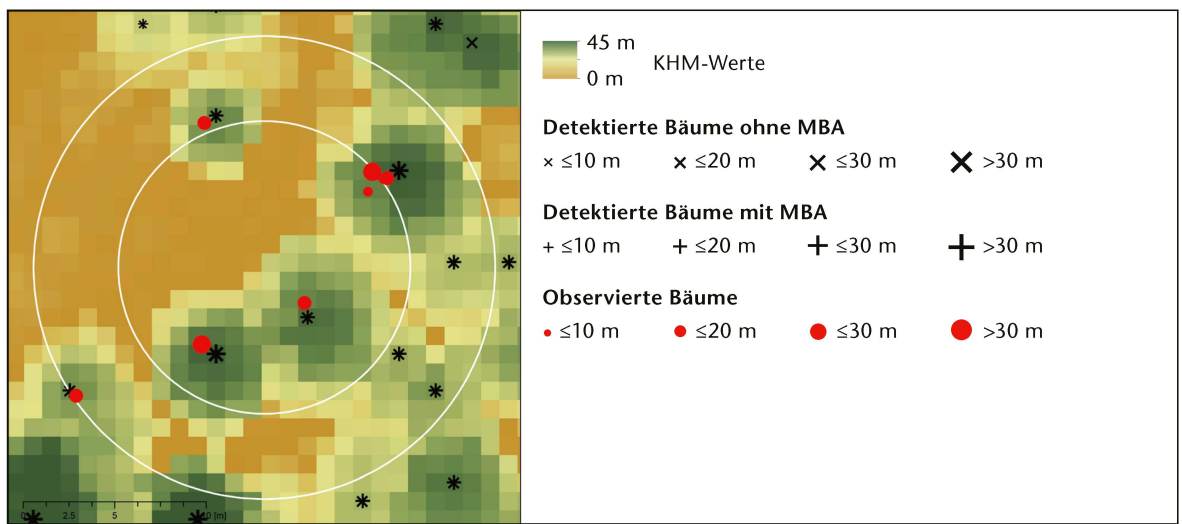


Abb 5 Beste FINT-Variante (x), deren Gegenvariante (+) sowie die Kombination aus beidem (*) zur Veranschaulichung des Effektes des MBA-Modells bei der Detektion von Nadelbäumen mit ausgeprägten Baumkronen (Region Schanfigg; Plot 76 667 mit 100% Nadelbäumen). Die Ergebnisse basieren auf einem ungeglätteten KHM mit einer Auflösung von 1 m. Weisse Kreise: Erhebungskreise (innerer Kreis: 200 m², Kluppschwelle 12 cm; äusserer Kreis: 500 m², Kluppschwelle 36 cm).

Die grössten Abweichungen betragen 4581 Stämme/ha (RMSE) beziehungsweise 1563% (MNAE; nicht dargestellt). Fehler dieser Grössenordnung traten vermehrt bei den KHM mit Auflösung von 0.25 m auf, die ohne Gauss-Filter und ohne MBA-Modell prozessiert worden waren.

Bei der Visualisierung der Ergebnisse in einem GIS (Abbildung 5) lässt sich erkennen, dass mit FINT Einzelbäume mit markanten Baumkronen in einem ungeglätteten KHM mit 1-m-Auflösung gut detektiert werden können. In Plots mit wenig ausgeprägten Baumkronen ist das Erkennen der Einzelbäume viel schwieriger. Wie die Abbildung 6 (oben links) zeigt, erkennt FINT in einem ungeglätteten KHM mit 0.25-m-Auflösung und ohne Einsatz des MBA-Modells viel zu viele Bäume. Die Verwendung des MBA-Modells führt zu einem bedeutend besseren Resultat (Abbildung 6, oben rechts). Noch besser wird dieses, wenn statt der Anwendung des MBA-Modells das KHM zuerst geglättet wird (Abbildung 6, unten links). Die Berücksichtigung des MBA-Modells zusätzlich zur Glättung (Abbildung 6, unten rechts), führt nur noch zu geringfügigen Verbesserungen, sowohl visuell als auch bezüglich der statistischen Auswertungen.

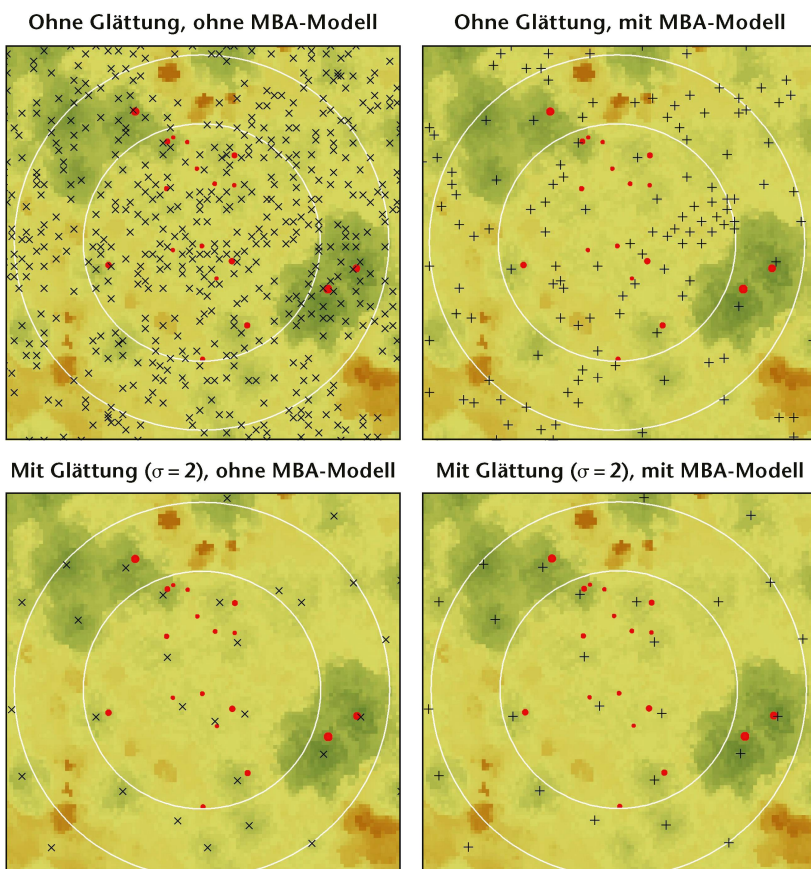


Abb 6 Gegenüberstellung der Ergebnisse von vier unterschiedlichen FINT-Varianten bei Laubbäumen mit wenig ausgeprägten Baumkronen (Region Bündner Herrschaft; Plot 55 253 mit 100% Laubbäumen). KHM mit einer Auflösung von 0.25 m. Erklärung der Symbole vgl. Abbildung 5.

Diskussion

KHM-Auflösung und -Glättung

Eine Glättung von hoch aufgelösten KHM zur Vermeidung einer Überdetektion ist vor allem in Plots mit dicht beieinanderstehenden Bäumen (1–2 m) und in solchen mit wenig ausgeprägten Kronenspitzen, wie das oft bei Laubbäumen der Fall ist, von grosser Bedeutung (Abbildung 7). Ohne vorgängige Glättung des KHM werden die durch Äste und Artefakte verursachten störenden Kleinstrukturen fälschlicherweise als Baumwipfel detektiert. Dies wurde auch schon von Eysn et al (2015) beobachtet. So haben auch ihre Vergleiche von geglätteten und ungeglätteten KHM mit einer Auflösung von 0.25

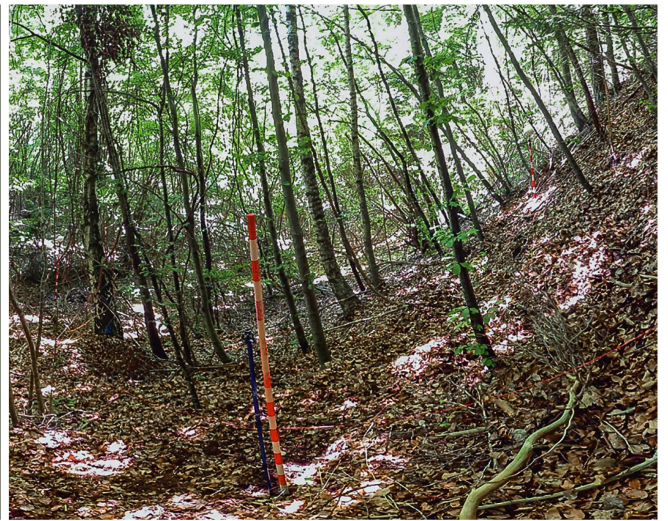
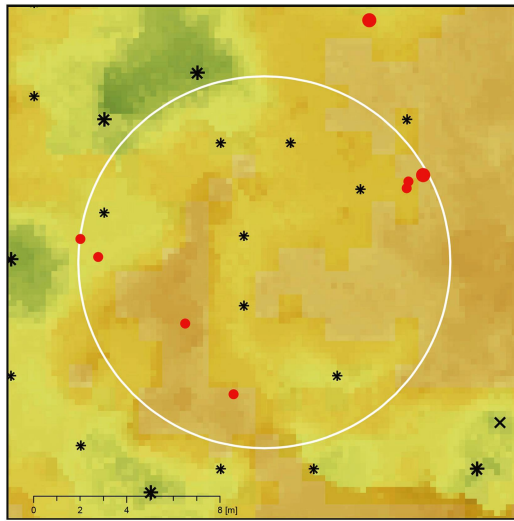


Abb 7 Links: Beste FINT-Variante (+), deren Gegenvariante (x) sowie die Kombination aus beidem (*) zur Veranschaulichung des Effektes des MBA-Modells bei der Detektion von dicht stehenden jungen Laubbäumen (Region Bündner Herrschaft; Plot 55 253). Die Ergebnisse basieren auf einem ungeglätteten KHM mit einer Auflösung von 0.25 m. Erklärung der Symbole: vgl. Abbildung 5. Rechts: Ausschnitt aus einer 360°-Aufnahme mit einer Sphärenkamera. Der Stab in der Mitte der Aufnahme stellt den Plot-Mittelpunkt dar.

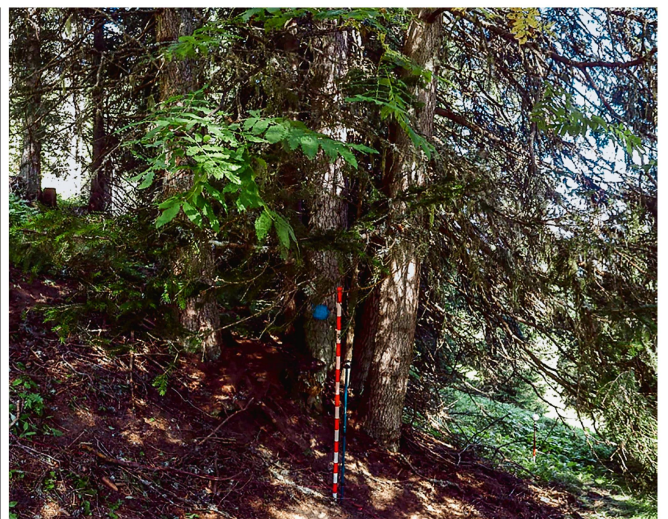
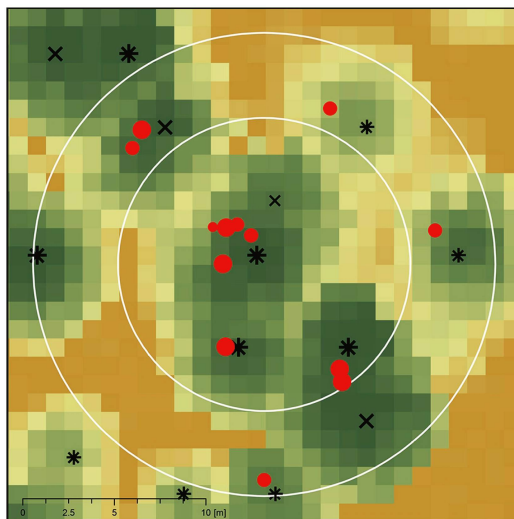


Abb 8 Links: Beste FINT-Variante (x), deren Gegenvariante (+) sowie die Kombination aus beidem (*) zur Veranschaulichung des Effektes des MBA-Modells bei der Detektion von in Rotten stehenden Nadelbäumen (Region Schanfigg; Plot 76 668). Die Ergebnisse basieren auf einem ungeglätteten KHM mit einer Auflösung von 1 m. Erklärung der Symbole vgl. Abbildung 5. Rechts: Ausschnitt einer 360°-Aufnahme mit einer Sphärenkamera. Der Stab in der Mitte der Aufnahme stellt den Plot-Mittelpunkt dar.

beziehungsweise 0.50 m ergeben, dass eine adäquate Glättung des KHM einer Überdetektion bedeutend entgegenwirken kann.

Eine generelle Aussage zur allgemein besten KHM-Auflösung ist also nicht möglich. Vielmehr muss bei gegebener Kronen- beziehungsweise Waldstruktur und bei gegebener Auflösung des KHM die passende Glättung gewählt werden.

Mindestbaumabstand-Modell

Die Ergebnisse zeigen, dass das MBA-Modell im KHM mit 1-m-Auflösung eine Überdetektion von Bäumen verhindern kann. Auch bei höher aufgelösten KHM verhindert das MBA-Modell eine Überdetektion, es ist aber weniger wirksam als die vorgängige adäquate KHM-Glättung.

Weniger geeignet hingegen ist das MBA-Modell, wenn die Stämme in Rotten wachsen (Abbildung 8). Bei diesen im Gebirgswald häufig vorkommenden Strukturen führt seine Anwendung zu einer Unterdetektion. Grund dafür ist, dass die geklumpte räumliche Anordnung der Bäume nicht den Prämissen des MBA-Modells entspricht, welches von einer gleichmässigen räumlichen Verteilung ausgeht. An dieser Stelle muss jedoch festgehalten werden, dass auf Basis dieser wenigen Ergebnisse keine abschliessende Aussage gemacht werden kann zum effektiven Beitrag des MBA-Modells zur Verbesserung von FINT. Eine Analyse mit einer weit grösseren Anzahl Plots, ausgestattet mit unterschiedlichen Baumarten und Waldstrukturen, könnte diesbezüglich Abhilfe schaffen.

Generelle Beobachtungen und Bemerkungen

Eine «korrekte» Validierung von FINT-Ergebnissen stellt für sich allein bereits eine methodische Herausforderung dar, denn sie kann auf unterschiedliche Weise, mit unterschiedlichen Daten und aus unterschiedlichen Perspektiven erfolgen. Bei einer visuellen Evaluation auf Basis von ALS-Daten (vertikaler Blick von oben auf die Baumkronen) mag es vielleicht einfach nachvollziehbar sein, wo FINT Einzelbäume detektiert. Werden die Daten hingegen im Wald verifiziert, eröffnet der horizontale Blick auf die Bäume vielleicht ganz andere Perspektiven. Dies nicht nur die Stammzahl betreffend, sondern auch in Bezug auf die Position der Bäume. Gerade im Gebirgswald können die aus ALS-Daten extrahierten Positionen der Kronenwipfel deutlich von den manuell gemessenen Stammpositionen in 1.3 m Höhe abweichen. Eysn et al (2015) gehen bei ihrer Untersuchung davon aus, dass die Position von Stammfuss und Baumwipfel in der Horizontalen bis zu fünf Meter auseinanderklaffen kann (wobei diese fünf Meter auch die Mess- und die Detektionsungenauigkeiten mit einschliessen). Oder wie bereits beschrieben, können die Kronen von nahe beieinander wachsenden Bäumen fälschlicherweise von oben als eine einzige Krone «gesehen» und demnach als Einzelbaum detektiert werden. Ferner treten Abweichungen zwischen observierten und detektierten Bäumen auf, wenn erstere anhand ihres BHD erhoben (entsprechend der Kluppschwelle), letztere aber anhand ihrer Baumhöhe detektiert werden. Sind die Bäume hoch, ihre Stämme aber zu dünn, werden sie zwar mit FINT detektiert, im Feld aber nicht erhoben.

Diese Beispiele machen deutlich, wie schwierig es ist, Methoden wie FINT allein durch statistische oder visuelle Vergleiche mit Waldinventurdaten zu validieren. Abhilfe könnte ein Ansatz verschaffen, bei dem nur jene Inventurbäume für die Validierung verwendet werden, die auch im Kronendach sichtbar sind. Die Validierung würde sich dann auf die Position und die Stammzahl der Bäume der Ober-schicht beschränken.

Ferner muss man sich stets bewusst sein, welches Ziel man mit einer grossflächigen Einzelbaumerkennung auf Basis von ALS-Daten verfolgt. Geht es um die automatische Auswertung von Schutzwaldstrukturen, also beispielsweise um die Fragen, wo sich ein geschlossener Bestand und wo sich grosse Lücken befinden, so kann ein Tool wie FINT durchaus nützliche Resultate liefern. Nach Validierung der FINT-Ergebnisse mit den im Gelände erhobenen Stammzahlen können die mit FINT detektierten Bäume beispielsweise direkt in Naturgefahren-Simulationsmodelle integriert werden. In diesem Schritt fliessen schliesslich auch die essenziellen Parameter der lokalen Naturgefahr (z.B. Steingrösse und bewaldete Hanglänge) und das Schadenpotenzial in die

Naturgefahren-Simulationsmodelle ein. Erst dann kann die Wirkung des Schutzwaldes mit seinen heutigen Strukturen tatsächlich abgeschätzt werden. In diesem Sinne können die FINT-Ergebnisse bereits wertvolle Hinweise dazu liefern, ob und wo gegebenenfalls zusätzliche Daten im Feld aufgenommen werden müssen.

Letztlich sind Ergebnisse, die allein auf Fernerkundungsdaten oder auf statistischen Modellansätzen basieren, bis heute stets mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Daher sind sie als alleinige Grundlage für waldbauliche Entscheide noch nicht geeignet. Zusätzliche Geländeaufnahmen sind daher unabdingbar. Ein kombinierter Ansatz aus FINT und zusätzlichen Geländeaufnahmen könnte jedoch zu einer Effizienz- und Qualitätssteigerung bei waldbaulichen Entscheiden führen. ■

Eingereicht: 6. Oktober 2016, akzeptiert (mit Review): 21. März 2017

Dank

Diese Studie wurde im Rahmen des Landesforstinventars durchgeführt. Wir danken Natalia Rehus und Björn Dreier für ihre Unterstützung während der Feldarbeiten. Ein spezieller Dank geht auch an das Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden für die Mithilfe in diesem Projekt.

Literatur

- BAUERHANSL C, BERGER F, DORREN L, DUC P, GINZLER C ET AL (2010) Development of harmonized indicators and estimation procedures for forests with protective functions against natural hazards in the alpine space. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, JRC Scientific and Technical Report 56151. 181 p.
- DORREN L, BERGER F, MAIER B (2007) Cartographie la structure de la végétation forestière avec un système lidar aéroporté en terrain montagnard. Rev Fr Photogramm Télédét 186: 54–59.
- DORREN L (2014) FINT – Find individual trees. User manual. Geneva: ecorisQ, paper: 5. www.ecorisq.org/docs/FINT_manual_EN.pdf (31.01.2017)
- DUC P, ABEGG M, BRÄNDLI UB (2010) Schutzwald. In: Brändli, UB, editor. Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der dritten Erhebung 2004–2006. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL. pp. 231–251.
- EAFV, BFL (1988) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der Erstaufnahme 1982–1986. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt forstl Vers.wesen, Bericht 305. 375 p.
- EYSN L, HOLLAUS M, LINDBERG E, BERGER F, MONNET J ET AL (2015) A benchmark of Lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. Forests 6: 1721–1747.
- FALKOWSKI M, SMITH A, HUDAK A, GESSLER P, VIERLING L ET AL (2006) Automated estimation of individual conifer tree height and crown diameter via two-dimensional spatial wavelet analysis of lidar data. Can J Remote Sens 32: 153–161.
- GUPTA S, WEINACKER H, KOCH B (2010) Comparative analysis of clustering-based approaches for 3-D single tree detection using airborne fullwave Lidar data. Remote Sens 2: 968–989.

- HAENEL S, TRÄNKNER H, ECKSTEIN W (1987)** Automatische Baumkronendeckung im Luftbild – der Weg durch den Engpass. In: Proc 2. DFVLR-Statusseminar Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung, Oberpfaffenhofen/München, 30. November – 2. Dezember 1987. pp. 53–66.
- HEINZEL J, WEINACKER H, KOCH B (2011)** Prior knowledge based single tree extraction. *Int J Remote Sens* 32: 4999–5020.
- HUBER M, BRANG P, SANDRI A (2015)** Schutz vor Naturgefahren. In: Rigling A, Schaffer HP, editors. Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes. Bern: Bundesamt Umwelt. pp. 94–97.
- HYYPÄ J, INKINEN M (1999)** Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *Photogramm J Finl* 16: 27–42.
- HYYPÄ J, SCHARDT M, HAGGRÉN H, KOCH B, LOHR U ET AL (2001)** The first European-wide attempt to derive single-tree information from laser scanner data. *Photogramm J Finl* 17: 58–68.
- KAUFMANN E (2001)** Estimation of standing timber, growth and cut. In: Brassel P, Lischke H, editors. Swiss national forest inventory: Methods and models of the second assessment. Birmensdorf: Swiss Federal Res Inst WSL. pp. 162–196.
- KHOSRAVIPOUR A, SKIDMORE A, ISENBURG M, WANG T, HUSSIN Y (2014)** Generating pit-free canopy height models from airborne Lidar. *Photogramm Eng Remote Sens* 80: 863–872.
- MAIER B, HOLLAUS M (2006)** Laserscanning. Ein Wald aus Punkten. *Bündner Wald* 59 (3): 47–53.
- PINZ A (1989)** Final results of the vision expert system VES: Finding trees in aerial photographs. *Wissensbasierte Mustererkennung. OCG Schriftenreihe* 49: 90–111.
- REINEKE L (1933)** Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J Agr Res* 46: 627–638.
- REITBERGER J, SCHNORR C, KRZYSZEK P, STILLA U (2009)** 3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 64: 561–574.
- WANG Y, WEINACKER H, KOCH B (2008)** A Lidar point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modelling in forest. *Sensors* 8: 3938–3951.

Effacité du balayage laser aéroporté pour la détection automatique d'arbres individuels

La présente étude avait pour but de déterminer si l'outil FINT (Find Individual Trees) détecte les arbres individuels dans des modèles numériques de canopée (MNC) avec une précision suffisante pour permettre d'estimer l'effet protecteur de forêts, y compris dans des zones à forte pente. Pour ce faire, des arbres de référence ont été mesurés et décrits dans douze placettes d'échantillonnage choisies au hasard dans les régions de Bündner Herrschaft et de Schanfigg (canton des Grisons, Suisse). Des données de ces placettes, obtenues par balayage laser aéroporté, ont été utilisées pour générer des MNC à des résolutions et des lissages différents, qui ont ensuite été analysés avec FINT. En outre, un modèle définissant la distance minimale entre un arbre et ses voisins en fonction de sa hauteur (modèle MBA) a été testé afin de déterminer s'il améliorerait la qualité des résultats. L'étude a montré que les MNC combinant une résolution élevée et un haut degré de lissage produisent des résultats comparables à ceux des MNC non lissés et de résolution inférieure. C'est avec un MNC à 1 m de résolution, sans lissage ni recours au modèle MBA, que l'écart entre le nombre d'arbres mesurés sur place et le nombre d'arbres détectés était le plus faible. En conclusion, FINT peut fournir des données permettant d'estimer l'effet protecteur des structures actuelles d'une forêt, et ces données, après vérification sur le terrain, peuvent être directement intégrées dans des modèles de simulation des dangers naturels.

Evaluation of automated single-tree recognition from airborne laser scanning data

In the present study, we investigated whether the detection tool FINT (Find Individual Trees) can identify single trees out of canopy height models (CHM) precisely enough to assess the protective effect of forests, even on steep slopes. For this purpose, reference trees were measured and described in twelve randomly selected sample plots in the Bündner Herrschaft and Schanfigg regions (Canton Graubünden, Switzerland). CHMs of different resolution and smoothing were generated from airborne laser scanning data for each sample plot and subsequently processed with FINT. In addition, we tested whether the use of a model that defines the minimum distance between a tree and its neighbours based on its height (MBA model) improved the quality of the results. The study showed that a finer-resolution CHM combined with stronger smoothing produced results comparable to those obtained with an unsmoothed and lower-resolution CHM. The smallest difference between the numbers of trees measured and detected was achieved with the 1-m resolution CHM, with no smoothing and no MBA model. In conclusion, FINT can provide a basis for assessing the protective effect of a forest with its existing structures, and its results – after evaluation in the field – can be directly integrated into natural hazard simulation models.