

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

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 171 (2020)

**Heft:** 1

**Artikel:** Seilllinienplanung : Genauigkeit der Einzelbaumdetektion mit drohnengenerierten Luftbildern

**Autor:** Dietsch, Patrick / Condrau, Curdin / Günter, Mark

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097277>

### **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:** 01.05.2026

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

# Seillinienplanung: Genauigkeit der Einzelbaumdetektion mit drohnengenerierten Luftbildern

**Patrick Dietsch** Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)\*  
**Curdin Condrau** Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)  
**Mark Günter** Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)  
**Luuk Dorren** Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)  
**Martin Ziesak** Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (CH)

## Seillinienplanung: Genauigkeit der Einzelbaumdetektion mit drohnengenerierten Luftbildern

Mit Drohnen erhobene Informationen haben das Potenzial, die Planung und Absteckung von Seillinien zu vereinfachen. Voraussetzung dafür ist, dass 1) die Stammfusskoordinaten potenzieller Stützen- und Ankerbäume und 2) deren Brusthöhendurchmesser (BHD) im aus den Drohnendaten gewonnenen Oberflächenmodell genügend genau ermittelt werden können. Um die erzielbaren Genauigkeiten zu analysieren, wurden zwei Schweizer Marteloskope mit der Drohne eBee Classic von senseFly auf einer Höhe von 180 m befliegen und Luftbilder mit einer Kamera von Sony mit einer Auflösung von 18.2 Megapixel hergestellt. In dem daraus abgeleiteten normalisierten Oberflächenmodell (nDOM) wurden die lokalen Maxima (Baumspitzen) mit der Einzelbaumdetektionssoftware «FINT» bestimmt. Für diese wurden die Koordinaten und der Brusthöhendurchmesser abgeleitet. Die Detektionsrate lag bei beiden Marteloskopen bei 65%. Die Koordinaten wichen im Durchschnitt weniger als 1.4 m von den terrestrisch ermittelten Stammfusskoordinaten ab. Die vorherrschenden und herrschenden Bäume konnten noch genauer lokalisiert werden. Der BHD liess sich im Durchschnitt auf 5 cm genau bestimmen. Ein Praxistest mit neun Seillinien zeigte, dass die ermittelten Koordinaten genügend genau waren, um die im nDOM bestimmten Stützenbäume für die forsttechnische Realisierung der Seillinien zu verwenden. Eine Geländebegehung ist weiterhin erforderlich, um die Verwurzelung und mögliche Schäden der potenziellen Stützenbäume zu überprüfen.

**Keywords:** single tree detection, drone, accuracy, FINT, cable yarding  
**doi:** 10.3188/szf.2020.0028

\* Länggasse 85, CH-3052 Zollikofen, E-Mail patrick.dietsch@bfh.ch

**D**as Rücken des Holzes erfolgt im steilen Gelände in der Regel mit Seilkränen. Konventionell werden die Seillinien ausgehend vom Maschinenstandort abgesteckt (Kuonen 1983). Fehlen Stützen- oder Ankerbäume, muss entweder auf künstliche Stützen zurückgegriffen oder die Linie seitlich verschoben und damit die Absteckung wiederholt werden. Mit Flugzeugen oder Drohnen erhobene Informationen haben das Potenzial, die Planung und Absteckung von Seillinien zu erleichtern.

Bereits in mehreren Studien wurde untersucht, wie Luftbild- und LiDAR-Daten für die Einzelbaumdetektion (EBD) und die Ableitung von Baumattributen verwendet werden können. Eysn et al (2015) verglichen zum Beispiel acht LiDAR-basierte EBD-Methoden mit terrestrischen Referenzdaten durch Anwendung des Nearest-Neighbour-Algorithmus.

Die genauesten Resultate wurden bei reinen Nadelholzbeständen erreicht. Mohan et al (2017) verwendeten für die Einzelbaumerkennung aus drohnengenerierten Luftbildern einen Algorithmus, der die lokalen Maxima sucht, und erreichten eine Genauigkeit von 85%. Gifftthaler (2017) untersuchte, mit welcher Genauigkeit sich Baumhöhen aus Luftbildern von Drohnenbefliegungen ableiten lassen. Er kam zu einer Abweichung der digital bestimmten von den terrestrisch bestimmten Baumhöhen von 1.38 m (Prognosegüte RMSE). Ziegler et al (2001) testeten verschiedene Baumparameter zur Ableitung des Brusthöhendurchmessers (BHD) aus LiDAR-Daten. Mit der Baumhöhe konnte dieser am besten prognostiziert werden. Menk et al (2017) arbeiteten mit unterschiedlichen Rastergrössen und Filterungen, um die EBD mit der Software «Find Individual Trees» (FINT) in LiDAR-Daten zu verbessern.

Bisher wenig beachtet wurde die Nutzung von Luftbild- oder LiDAR-Daten zur Festlegung sogenannter «Infrastrukturbäume» (also von Stützen-, Endmast- und Ankerbäumen) bei der Projektierung von Seillinien. In der Praxis werden, weil der Bau zeit- und kostenintensiv ist, möglichst einfache Stützen (Vorziehhstütze, vorgeneigte Stütze) verwendet. Bäume mit einem ausreichenden Durchmesser in einer Distanz von 0.8 bis 2 m Entfernung seitlich zur Seillinie eignen sich für deren Bau (Nemestóthy et al 2014), wobei in der Praxis diese Werte bisweilen auf 3 m bei Vorziehhstützen und 4 m bei vorgeneigten Stützen ausgedehnt werden. Die EBD muss in der Ermittlung von Stammfusskoordinaten diesen Genauigkeitsanforderungen entsprechen, um einen Mehrwert für die Praxis zu bieten.

Nachfolgend werden Ergebnisse des WHFF-Projekts 2015.15 vorgestellt, in dem der Frage nachgegangen wurde, ob in Luftbilddaten, die mit Drohnen gewonnen wurden, Stützenbäume in genügender Genauigkeit erkannt werden können. Vertieft untersucht wurde die für die forsttechnische Planung notwendige Genauigkeit der Stammfusskoordinaten und des BHD der Bäume. Anschliessend wurde die Methode bei neun Seillinien auf ihre Praxistauglichkeit geprüft.

## Material und Methoden

### Versuchsflächen

Die Genauigkeitsanalyse wurde in zwei Marteloskopien durchgeführt. Marteloscope sind waldbauliche Übungsflächen. Zu diesem Zweck sind auf den Flächen die Bäume ab einem bestimmten BHD terrestrisch eingemessen und wichtige Baumparameter (Baumart, BHD, Baumhöhe, Volumen usw.) erfasst (Thormann et al 2019).

Das Marteloskop Wiliwald befindet sich in Zollikofen (BE) auf 560 m ü.M. Der Nadelholzanteil beträgt ca. 65%. Die betrachtete Fläche umfasst ca.

1 ha; die durchschnittliche Hangneigung liegt unter 5%.

Das Marteloskop Rona liegt südwestlich von Rona (GR) auf 1660 m ü.M. Der Nadelholzanteil beträgt nahezu 100%. Die betrachtete Fläche umfasst ca. 1.1 ha und weist eine durchschnittliche Hangneigung von etwa 60% auf.

Durch die Verwendung von Marteloskopien mussten die Bäume auf den Versuchsflächen nicht extra eingemessen werden. Allerdings erfolgt die Einmessung in Marteloskopien in der Regel mit einfachen Mitteln (z.B. einem Suunto-Kompass), sodass die Genauigkeit nicht derjenigen einer geodätischen Vermessung entspricht. Die Genauigkeit der Baumkoordinaten im Marteloskop Wiliwald wurde auf 0.1 bis 0.2 m geschätzt (Sondermann 2018). Für Rona liegen keine Angaben zur Genauigkeit vor.

### Überprüfen der Datengenauigkeit

Die Genauigkeit der manuell eingemessenen Baumkoordinaten wurde mit einem Verfahren der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen abgeschätzt (Sondermann & Rossmann 2016), das auf 2-D-Laserscanner- sowie Stereokameradaten beruht. Das Verfahren konnte auf 0.55 ha im Marteloskop Wiliwald eingesetzt werden. Auf dem restlichen Teil der Fläche im Wiliwald verhinderte dichter Unterwuchs und in Rona zusätzlich die Hangneigung dessen Einsatz. Auf eine Verifizierung der Baumhöhen durch Fällen und Vermessen der Bäume wurde verzichtet.

Die Qualität des Orthofotomosaiks, welches aus drohnen generierten Luftbildern erstellt worden ist, wurde durch einen optischen Vergleich mit dem digitalen Orthofotomosaik SWISSIMAGE 25 cm von swisstopo (Bodenauflösung 25/50 cm; Flugjahr: 2016 [BE] und 2017 [GR]) beurteilt. Qualitativ verglichen wurde es auch mit dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) des Kantons Bern (Auflösung von 50 cm, Flugjahr 2014) sowie demjenigen von swisstopo (Auflösung von 2 m unterhalb 2000 m ü.M., Flugjahr 2003 [GR]).

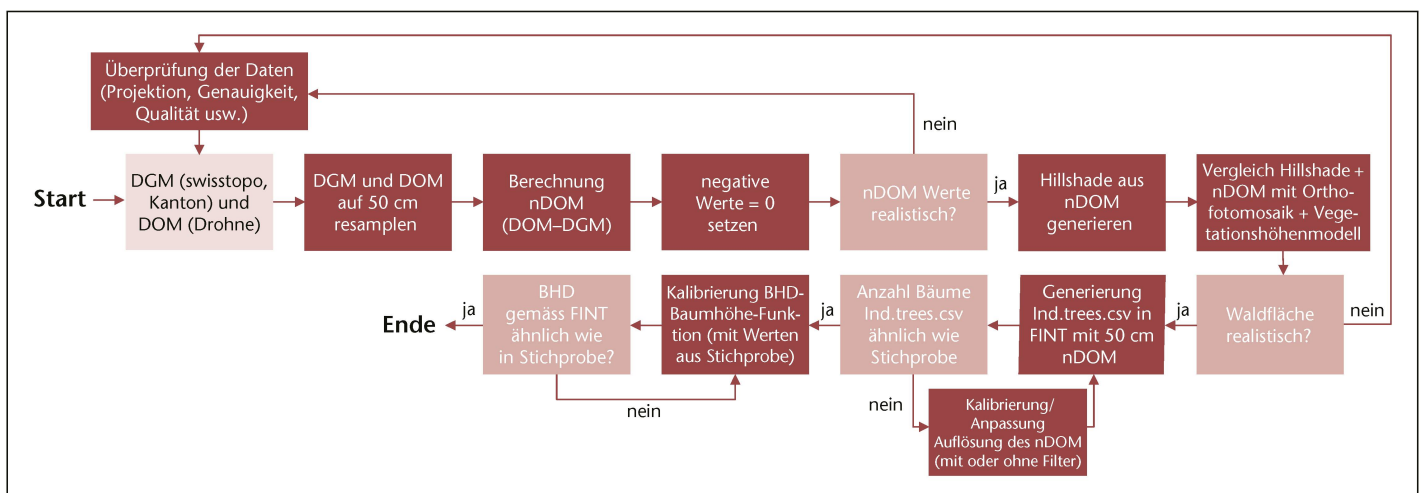


Abb 1 Workflow der Genauigkeitsanalysen. DGM: Digitales Geländemodell, DOM: Digitales Oberflächenmodell, nDOM: normalisiertes Oberflächenmodell.

Für die Güte der Einzelbaumdetektion mit FINT wurden die beiden Masse «Vollständigkeit» und «Korrektheit» verwendet (Straub 2004). Mit der Vollständigkeit wird der Anteil der richtig detektierten Bäume an der Gesamtzahl der auf dem Marteloskop vorhandenen Bäume (BHD >12 cm) beurteilt; mit der Korrektheit der Anteil der richtig detektierten Bäume an der Gesamtzahl der detektierten Bäume. Die beiden Masse berechnen sich wie folgt:

$$\text{Vollständigkeit (\%)} = \frac{\text{richtig detektierte Bäume}}{(\text{richtig detektierte Bäume} + \text{nicht detektierte Bäume})} \times 100 \quad 1)$$

$$\text{Korrektheit (\%)} = \frac{\text{richtig detektierte Bäume}}{(\text{richtig detektierte Bäume} + \text{falsch detektierte Bäume})} \times 100 \quad 2)$$

### Ableiten von Stammfusskoordinaten und BHD

Für die Versuche wurde eine Drohne von senseFly (eBee Classic) verwendet, die mit einer Akkuladung eine Befliegung von etwa 30 ha bei der gewählten Flughöhe von 180 m erlaubt. Die Flugbahnen wurden so gewählt, dass sich die Bilder in Flugrichtung um 75% und seitlich um 70% überlappten. Die verwendete Kamera von Sony hatte eine Auflösung von 18.2 Megapixel und ermöglichte eine Pixelauflösung von 6 bis 7 cm. Die Bilddaten wurden mit einer hochgenauen GNSS-Einheit (GPS- und GLONASS-Daten mit RTK-Korrektursignal von swi-*stopos*) verortet, mit welcher eine Genauigkeit von mindestens 3 cm in der Lage und 5 cm in der Höhe erreicht wird.<sup>1</sup> Zur Flugplanung und -durchführung wurde die Software eMotion verwendet. Nach der Befliegung wurden die Bilder mit der Software Pix4Dmapper stereofotogrammetrisch zusammengefügt, und es wurden das DOM und das Orthofotomosaik generiert.

Durch Abzug des digitalen Geländemodells (DGM) swissALTI<sup>3D</sup> wurde mit ArcGIS (V.10.4.1) das normalisierte Oberflächenmodell (nDOM) gebildet. SwissALTI<sup>3D</sup> ist ein Höhenmodell der Schweiz mit einem Nachführungszyklus von sechs Jahren. Verwendet wurde der Rasterdatensatz mit 2 m Maschenweite. Durch einen Vergleich mit dem Vegetationshöhenmodell LFI (Basis: Luftbilder von swisstopo aus dem Jahr 2013 [BE] und 2015 [GR]) wurde die Plausibilität des nDOM überprüft.

Mit FINT wurden die lokalen Maxima des nDOM abgeleitet. Diese entsprechen im Nadelholz den Baumspitzen. Im Laubholz ist die EBD aufgrund der Kronenform erschwert. Oft werden mehrere lokale Maxima für den gleichen Baum erkannt. Die Funktionsweise von FINT kann Dorren (2017) entnommen werden. Als minimale Baumhöhe wurden 2 m definiert; Werte unter 2 m wurden nicht als Baum detektiert. Auf eine Glättung des Input-Rasters wurde verzichtet, weil eine solche nicht immer zu besseren Resultaten führt. Stattdessen wurde eine Anpassung der Rastergrösse vorgenommen. Gemäss Menk et al

(2017) wird damit ein ähnlicher Effekt wie mit der Glättung erzielt. Die Rastergrösse wurde iterativ angepasst, bis die mit FINT bestimmten lokalen Maxima eine hohe Übereinstimmung mit zufällig gewählten digitalen Probeflächen (30 m × 30 m) aufwiesen. Die Übereinstimmung wurde in ArcGIS optisch beurteilt. Für das Marteloskop Wiliwald wurde schliesslich eine Rastergrösse von 90 cm, für Rona eine solche von 50 cm verwendet. Welche Rastergrösse sich bei welchen Ausgangsbedingungen (Mischungsgrad, Hangneigung usw.) am besten eignet, wurde nicht untersucht. Dorren (2017) empfiehlt eine Rastergrösse von 0.5 m, 1 m oder 2 m, wobei die Genauigkeit der lokalen Maxima mit zunehmender Zellgrösse abnimmt. Je höher die Auflösung des Rasters ist, desto mehr lokale Maxima werden erkannt. Meistens wird die Auflösung des Rasters mit einem Bildausschnitt kalibriert. In Nadelholzbeständen kann erfahrungsgemäss eine höhere Auflösung als in Laubholzbeständen gewählt werden. Die Baumhöhen wurden für alle lokalen Maxima aus dem Eingaberaster (nDOM) übernommen.

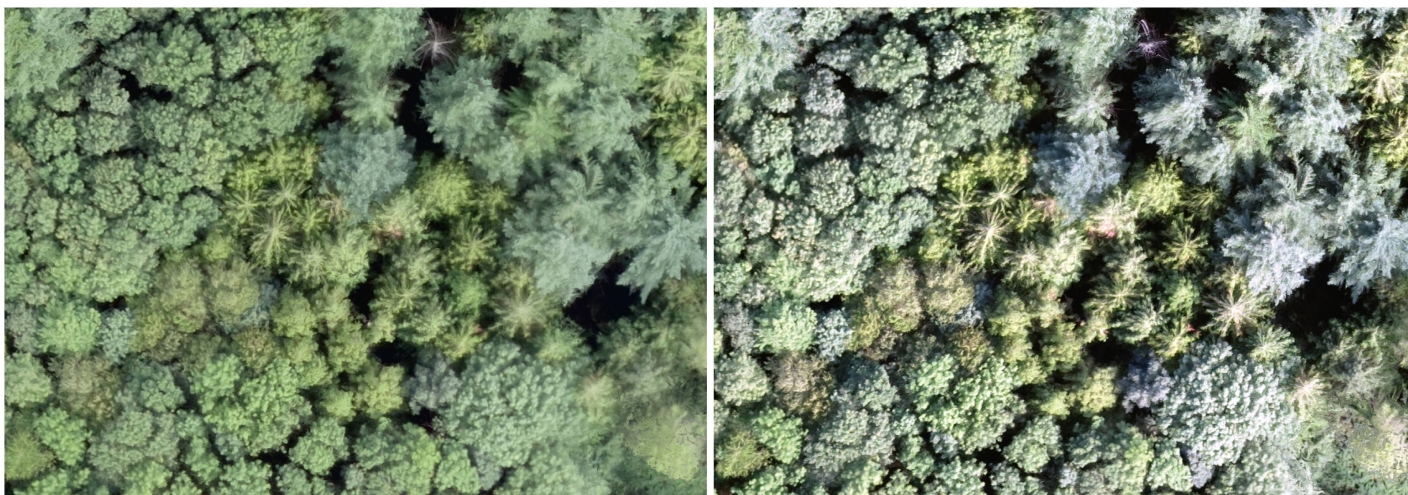
Der BHD wurde mithilfe einer allometrischen Funktion aus der Baumhöhe ermittelt. Für deren Ableitung wurden bei einer Stichprobe ( $n_{\text{Wiliwald}} = 42$ ,  $n_{\text{Rona}} = 118$  Bäume) die Höhe (Vertex IV von Haglöf, 3 Messungen) und der BHD (Kluppierung übers Kreuz) gemessen. Bedingt durch die Kluppschwelle beim Einrichten der Marteloscope wurden Bäume unter 12 cm BHD nicht berücksichtigt. Für die Koordinaten der Baumspitzen (lokale Maxima) wurde anschliessend der BHD berechnet. Fehlerhafte Koordinaten wirken sich in Rona wegen der grösseren Hangneigung stärker auf die abgeleiteten BHD aus. Weicht ein lokales Maximum in der Hangfalllinie zum Beispiel um einen Meter von der Realität ab, führt dies zu einem Fehler in der Höhenbestimmung von 0.6 m in Rona gegenüber 0.08 m im Wiliwald. Es wurde unterstellt, dass die Position der ermittelten Baumspitzen (lokale Maxima) den Stammfusskoordinaten entspricht. Abweichungen wegen nicht senkrechter Wuchsform der Bäume wurden damit nicht berücksichtigt, obwohl diese gemäss Eysn et al (2015) bis zu 5 m betragen können.

Die statistische Auswertung erfolgte mit Excel, NCSS (V.9) und R (V.3.4.1). Die verwendeten statistischen Tests sind bei den Resultaten aufgeführt.

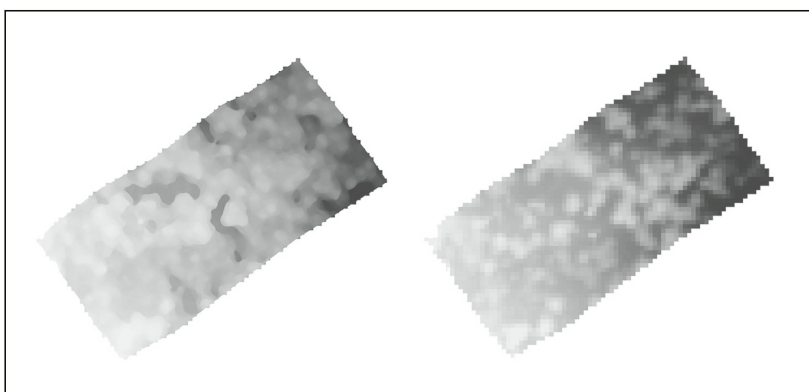
### Einfluss der Kraft'schen Baumklasse

Um den Einfluss der sozialen Stellung auf die Genauigkeit der Resultate zu beurteilen, wurden die Bäume beider Marteloscope in die Kraft'schen Baumklassen (Kraft 1884) eingeteilt (0: vorherrschend, 1: herrschend, 2: mitherrschend, 3: beherrscht, 4: unterdrückt; Wiliwald: 302, Rona: 370 Bäume). Die mit FINT detektierten Baumspitzen wurden den

<sup>1</sup> Mit Drohnen von senseFly erreichbare Genauigkeiten: [www.sensefly.com/drones/compare-drones](http://www.sensefly.com/drones/compare-drones) (15.11.2019)



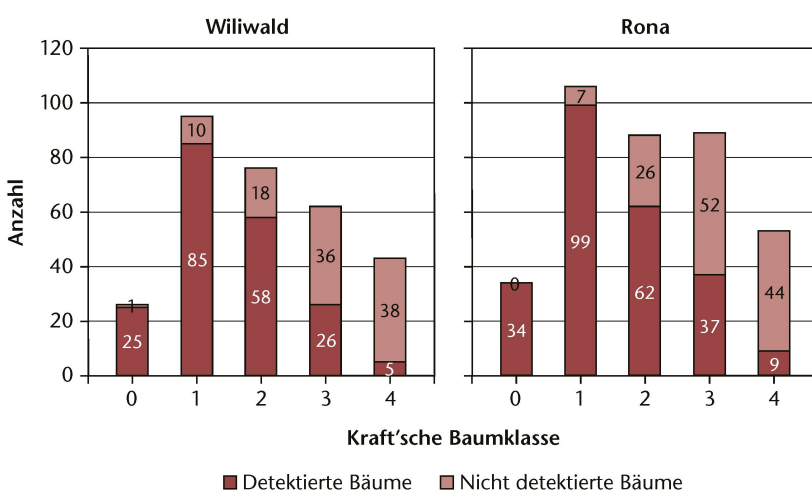
**Abb 2** Ausschnitt aus dem Orthofotomosaik SWISSIMAGE 25 cm von swisstopo (links) und dem aus Drohnendaten generierten (rechts; Flughöhe 180 m) für das Marteloskop Wiliwald. Masstab 1:250.



**Abb 3** Ausschnitt aus dem DOM von swisstopo (links) und dem aus Drohnendaten generierten (rechts) für einen Ausschnitt des Marteloskops Rona.

Marteloskop	Vollständigkeit (%)	Korrektheit (%)
Wiliwald	65.9	67.9
Rona	65.1	43.1

**Tab 1** Vollständigkeit und Korrektheit der Detektionen mit FINT in den Marteloskopen Wiliwald und Rona. Anzahl Bäume:  $n_{Wiliwald} = 302$ ,  $n_{Rona} = 370$ .



**Abb 4** Verteilung der mit FINT detektierten und nicht detektierten Bäume in den Marteloskopen Wiliwald (links) und Rona (rechts) nach Kraft'schen Baumklassen (0: vorherrschend, 1: herrschend, 2: mitherrschend, 3: beherrscht, 4: unterdrückt). Anzahl Bäume:  $n_{Wiliwald} = 302$ ,  $n_{Rona} = 370$ .

Referenzbäumen des Marteloskops händisch zugewiesen, wofür die Parameter Distanz zum Referenzbaum und soziale Klasse verwendet wurden. Eine Automatisierung der Zuweisung mit dem von Eysn et al (2015) verwendeten «Nearest-Neighbour»-Algorithmus wurde verworfen, weil sie keine Differenzierung nach falsch bzw. nicht detektierten Bäumen erlaubt hätte.

## Resultate

### Beurteilung der Datenqualität

Mit dem Verfahren der RWTH Aachen wurde im Wiliwald ein Positionsfehler der manuell eingemessenen Bäume von im Mittel unter einem halben Meter ermittelt (Sondermann 2018). Die Referenzdaten wiesen also im Mittel eine Ungenauigkeit von maximal 0.5 m auf. In Rona war keine Aussage zur Genauigkeit der terrestrischen Referenzdaten möglich, weshalb die Ergebnisse vorsichtig zu interpretieren sind.

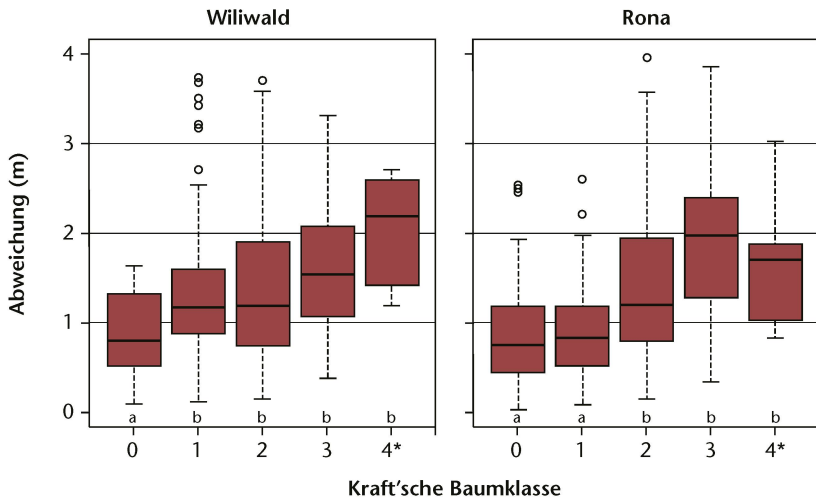
Sowohl auf dem mit Drohnendaten erstellten Orthofotomosaik als auch auf dem von swisstopo (SWISSIMAGE 25 cm) sind Einzelbäume gut erkennbar und Laub- und Nadelbäume unterscheidbar (Abbildung 2). Mit der gewählten Flughöhe und der hohen Qualität der Kamera konnte mit der Drohne im DOM eine ähnlich gute Auflösung erzielt werden wie im von swisstopo erstellten Produkt (Abbildung 3).

### Vollständigkeit und Korrektheit der EBD

Die Vollständigkeit der EBD lag in beiden Marteloskopen bei etwa 65% (Tabelle 1). Dagegen war die Korrektheit in Rona mit 43% deutlich geringer als im Wiliwald mit 68%. Dies bedeutet, dass in Rona lokale Maxima öfter fälschlicherweise als Bäume detektiert wurden. Die als Stützen geeigneten herrschenden und vorherrschenden Bäume wurden jedoch in den meisten Fällen erkannt (Abbildung 4).

Marteloskop	Detektierte Bäume (n)	Abweichung Stammfusskoordinaten (m)				
		Kleinste	Grösste	Mittelwert	Median	Standardabweichung
Wiliwald	199	0.10	3.73	1.37	1.19	0.805
Rona	241	0.02	3.96	1.24	1.03	0.81

**Tab 2** Statistische Kennwerte zur Abweichung der mit FINT detektierten lokalen Maxima von den terrestrisch erfassten Referenzdaten in den Marteloskopen Wiliwald und Rona. Die Unterschiede zwischen den beiden Marteloskopen sind nicht signifikant (Wilcoxon-Signed-Rank-Test für nicht normalverteilte Daten).



**Abb 5** Abweichung zwischen den mit FINT detektierten lokalen Maxima und den Stammfusskoordinaten in den Marteloskopen Wiliwald (links) und Rona (rechts) nach Kraft'schen Baumklassen (0: vorherrschend, 1: herrschend, 2: mitherrschend, 3: beherrscht, 4: unterdrückt). Für die Anzahl detektierte Bäume pro Baumklasse siehe Tabelle 3. Die mit unterschiedlichen Buchstaben gekennzeichneten Baumklassen unterscheiden sich in Bezug auf die Abweichung innerhalb des jeweiligen Marteloskops signifikant (Dunn-Test mit Bonferroni-Korrektur). \* Der Stichprobenumfang in Baumklasse 4 beträgt lediglich 5 (Wiliwald) bzw. 9 Bäume (Rona).

### Abweichung Stammfusskoordinaten

Im Durchschnitt war in beiden Marteloskopen eine Abweichung von weniger als 1.4 m zwischen den lokalen Maxima und den Stammfusskoordinaten zu verzeichnen. In Bezug auf die Mediane

waren die Abweichungen (Wiliwald: 1.19 m, Rona: 1.03 m) noch etwas geringer (Tabelle 2). Die maximale Abweichung lag bei 3.7 m (Wiliwald) bzw. 4 m (Rona). Die deutlich grössere Hangneigung führte in Rona also nicht zu schlechteren Resultaten. Die vorherrschenden (Wiliwald) bzw. die herrschenden und vorherrschenden Bäume (Rona) wurden signifikant genauer detektiert als die mitherrschenden, beherrschten oder unterdrückten Bäume (Abbildung 5). So beläuft sich zum Beispiel der Median der Abweichung bei den vorherrschenden Bäumen im Wiliwald lediglich auf 0.81 m und in Rona auf 0.76 m.

### Abweichung BHD

Die aus dem nDOM abgeleiteten BHD unterschätzten die terrestrisch ermittelten im Durchschnitt um etwa 5 cm im Wiliwald und um etwa 1 cm in Rona (Tabelle 3). Dabei streuten die abgeleiteten BHD mit einer Standardabweichung von  $\pm 9$  cm (beide Marteloskope) und einer Spanne zwischen grösster Unter- und grösster Überschätzung von 48.6 cm (Wiliwald) bzw. 69.0 cm (Rona) in einem grossen Bereich. Bei den vorherrschenden und herrschenden Bäumen wurde der BHD im Durchschnitt unterschätzt, bei den beherrschten und unterdrückten Bäumen dagegen überschätzt. Besonders ausgeprägt war die Unterschätzung bei den vorherrschenden Bäumen. Entgegen den Erwartungen war die BHD-Ableitung in Rona genauer als im Wiliwald.

In Bezug auf die Infrastrukturbäume für unsere Seillinien im Praxistest bedeutete dies, dass bei den vorherrschenden Bäumen erwartet werden konnte, dass der BHD in der Realität höher ist als der mit FINT aus dem nDOM abgeleitete. Ab den mitherrschenden Bäumen musste dagegen damit gerechnet werden, dass FINT den BHD überschätzt und sich damit der Baum möglicherweise nicht als Infrastrukturbäum eignet.

Marteloskop	Klasse	Detektierte Bäume (n)	Abweichung BHD (cm)					
			Max. Unterschätzung	Max. Überschätzung	Mittelwert	Median	Standardabweichung	RMSE
Wiliwald	Alle	199	-31.3	17.3	-4.8	-4.7	9.4	10.5
	0	25	-27.7	0.3	-14.8	-13.9	7.8	16.7
	1	85	-24.5	7.8	-6.9	-6.0	7.0	9.8
	2	58	-20.2	17.3	-1.1	-0.3	7.9	7.9
	3	26	-31.3	12.9	0.4	3.5	10.7	10.5
	4	5	-	13.8	10.0	9.3	2.9	10.3
Rona	Alle	241	-41.7	27.3	-1.3	-1.0	9.0	9.1
	0	34	-41.7	8.1	-8.7	-6.9	10.0	13.2
	1	99	-24.6	23.7	-3.5	-3.4	7.9	8.6
	2	62	-15.9	17.7	0.7	-0.6	6.6	6.6
	3	37	-10.1	27.3	5.9	6.2	7.0	9.1
	4	9	-0.8	21.7	8.0	9.0	6.6	10.1

**Tab 3** Statistische Kennwerte zur Abweichung des aus den lokalen Maxima abgeleiteten BHD vom terrestrisch erhobenen in den Marteloskopen Wiliwald und Rona. Positive Werte bedeuten eine Überschätzung, negative eine Unterschätzung des terrestrisch erhobenen BHD. Kraft'sche Baumklassen: 0: vorherrschend, 1: herrschend, 2: mitherrschend, 3: beherrscht, 4: unterdrückt. RMSE = Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (Prognosegüte).

## Diskussion

### Beurteilung der Datenqualität

Die unbekanntete Genauigkeit der Vermessung auf den Marteloskopern beeinflusste die Aussagekraft der Untersuchungen negativ. Aufgrund der Aufnahme auf einem Teil der Fläche mit dem Verfahren der RWTH Aachen darf angenommen werden, dass die Vergleichsdaten im Marteloskop Wiliwald höchstens 0.5 m von der wahren Position der Bäume abweichen (Sondermann 2018). Für Rona fehlt eine solche Genauigkeitsabschätzung der Vergleichsdaten.

Sowohl das beigezogene Orthofotomosaik SWISSIMAGE 25 cm von swisstopo als auch das aufgrund der Befliegung mit einer Drohne generierte eignen sich für eine optische Ansprache sowie die EBD im nDOM. Swisstopo aktualisiert derzeit die Orthofotos (Bezahlversion, SWISSIMAGE 10 cm) im 3-Jahres-Rhythmus. Drohnendaten können dagegen jederzeit erhoben werden. Dies bringt zum Beispiel nach Kalamitäten einen Mehrwert.

Bedingt durch die Flughöhe und die hohe Qualität der Kamera konnten mit der Drohne sehr hoch aufgelöste Bilddaten erzeugt werden. Für die EBD konnte diese hohe Auflösung allerdings nicht vollständig genutzt werden, weil sonst zu viele lokale Maxima erkannt worden wären. Derzeit kann nur die Empfehlung gegeben werden, die von FINT berechneten lokalen Maxima mit einer digitalen Stichprobe abzugleichen und bei ungenügender Übereinstimmung die Rastergrösse zu verändern. Bewährt hat sich die Verringerung der Auflösung bei den Drohnendaten (i.d.R. mind. 50 cm) und die Anpassung der Rastergrösse beim DGM auf die gleiche Grösse.

### Genauigkeitsanalyse

Die Flughöhe der Drohne von 180 m kann hinterfragt werden. Verschiedene Studien zur EBD aus Drohnendaten wurden mit einer Befliegungshöhe von 90 bis 100 m durchgeführt (Bayer et al 2013, Sperlich et al 2014). Ausschlaggebend für die Qualität der Rohdaten ist aber ohnehin die Kamera. Auch ungünstige Lichtverhältnisse können die Datenqualität reduzieren. Erfahrungsgemäss entstehen die besten Bilder an bewölkten Tagen.

Die ermittelte Detektionsrate von etwa 65% in beiden Marteloskopern erscheint gering. In vergleichbaren Untersuchungen lag die Vollständigkeit der Detektion bei bis zu 87% (Bayer et al 2013, Sperlich et al 2014). Vaukhonen et al (2012) stellten fest, dass die Kluppschwelle einen Einfluss auf die Vollständigkeit hat. Dies war auch in unserer Untersuchung der Fall. Bei einer Kluppschwelle von 22 cm wäre die Vollständigkeit um 9% (Wiliwald) bzw. 21% (Rona) höher gewesen und hätte damit im Bereich bisheriger Untersuchungen gelegen.

In Bezug auf die Abweichung der lokalen Maxima von den Stammfusskoordinaten erzielte unsere Untersuchung recht ähnliche Resultate wie die von Eysn et al (2015). So war die maximale Abweichung bei uns etwas kleiner (4 m statt 5 m) dafür die mittlere Abweichung etwas grösser (1.2 m statt 0.9 m). Die besten Resultate erzielten wir in unserer Untersuchung bei den Bäumen der vorherrschenden Klasse. Hier betrug die mittlere Abweichung lediglich etwa 0.8 m. Eine abnehmende Genauigkeit bei der Detektion mit abnehmender Dominanz der Bäume wie sie von Jakubowski et al (2013) und Heinrich (2006) beschrieben wird, konnten wir ebenfalls feststellen. Die als Infrastrukturbäume geeigneten dominanten Bäume (vorherrschend und herrschend) wurden in den meisten Fällen erkannt und wiesen im Mittel eine Verortungsgenauigkeit von unter 1.2 m auf. Somit lässt sich die Linienfindung bei der Seilkrankenplanung anhand dieser drohnengenerierten Information unterstützen.

Eine abnehmende Genauigkeit in der Lagebestimmung mit zunehmender Hangneigung (Khosravipour et al 2015) war nicht erkennbar. Im Marteloskop Rona mit der grösseren Hangneigung waren die Resultate teils sogar genauer. Eine Erklärung dafür ist der höhere Nadelholzanteil, der es ermöglichte, mit einer kleineren Rastergrösse und damit verbunden einer höheren Auflösung als im Marteloskop Wiliwald zu arbeiten.

Die grosse Streuung bei den BHD kann damit erklärt werden, dass zur Ableitung lediglich die Baumhöhe genutzt wurde. Bücken (2014) konnte zum Beispiel zeigen, dass sich die Genauigkeit der BHD-Ableitung verbessert, wenn die Kronenfläche einbezogen wird.

### Folgerungen unter Einbezug der Praxistests

Die drohnenbasierte Planungsmethode wurde an neun Seillinien in der Praxis geprüft. Alle Infrastrukturbäume waren mit den Orthofotos und den projektierten Linien auffindbar. Die mit FINT ermittelten Koordinaten der Bäume waren genügend genau, um die bestimmten Infrastrukturbäume für die forsttechnische Realisierung der Seillinien zu verwenden. Als günstig erwies sich, dass bei der Projektierung besonders darauf geachtet wurde, nur die durchmesserstärksten Bäume der herrschenden oder vorherrschenden Klasse als Infrastrukturbäume auszuwählen (Abbildung 6). So musste keine Absteckung wegen falsch eingeschätzter Baumdurchmesser wiederholt werden. Eine Feldbegehung ist auch bei der drohnenbasierten Planungsmethode noch notwendig. Sie dient dazu, aus der Luft nicht sichtbare Parameter (Verwurzelung, Verletzungen, Rotfäule) zu beurteilen und damit die Tauglichkeit der



**Abb 6** Ein mit der drohnenbasierten Planungsmethode identifizierter Ankerbaum. Foto: Patrick Dietsch

vorab identifizierten Infrastrukturbäume zu beurteilen. So musste bei zwei der neun Seillinien aufgrund von mangelhafter Verankerung und Rotfäule ein Ersatzbaum bestimmt werden.

Der Mehrwert des mit Fernerkundungsdaten gestützten Ansatzes liegt darin, dass positive Kardinalpunkte für die Seillinie bereits vorab im Büro festgelegt werden können. Dazu reicht ein aktuelles Orthofoto aus, das sich mit Drohnen verhältnismässig günstig erstellen lässt. Das aufwendige seitliche Verschieben der Linie während der Geländearbeit kann damit im Normalfall verhindert werden, und es ergeben sich Zeit- und Kostenvorteile, die in den Untersuchungen jedoch nicht quantifiziert wurden. Die EBD liefert zusätzliche Informationen (Stammfusskoordinaten, Höhe, BHD), die für die Seillinienplanung wertvoll sind. Zum Beispiel kann die mögliche Stützenhöhe abgeleitet werden. Für eine praxistaugliche Umsetzung wäre die Integration dieser Information in ein GIS-gestütztes Projektierungsprogramm für Seillinien wünschenswert.

Beim Einsatz von Drohnen sind rechtliche Rahmenbedingungen zu beachten. Die Drohne darf nur auf Sicht geflogen werden, Flugverbotszonen sind zu berücksichtigen; im Gebirge ist die Suche nach einem Start- und Landeplatz aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse oft eine Herausforderung.

Eingereicht: 25. Juli 2019, akzeptiert (mit Review): 26. November 2019

## Dank

Ein besonderer Dank geht an den Wald- und Holzforschungsfonds für die finanzielle Unterstützung des Projektes. Zudem danken wir dem Forstbetrieb Sigriswil (BE) und dem Amt für Landwirtschaft und Wald des Kantons Luzern für die Flächen zur Überprüfung der Praxistauglichkeit sowie der RWTH Aachen für die Überprüfung der Genauigkeit der Koordinaten im Marteloskop Wiliwald.

## Literatur

- BAYER S, MIRI M, BUCHER T (2013) Automatisierte Einzelbaumerfassung auf Basis von hochaufgelösten TrueOrtho-Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen. In: Seyfert E, editor. Proc 33. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung DGPF, 27. Feb.–1. März 2013, Freiburg i.Br. (Deutschland). Berlin: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung Geoinformation e.V. pp. 26–35.
- BÜCKEN A (2014) Automatische Modellierung von Waldlandschaften für virtuelle Welten und mobile Roboter. Aachen: Vieweg + Teubner. 194 p.
- DORREN L (2017) FINT – Find Individual Trees. User manual. Geneva: ecorisQ. 5 p.
- EYSN L, HOLLAUS M, LINDBERG E, BERGER F, MONNET JM ET AL (2015) A benchmark of Lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space. *Forests* 6: 1721–1747.
- GIFTHALER M (2017) Ermittlung von Einzelbaumhöhen basierend auf Fernerkundungsdaten unbemannter Luftfahrtsysteme. *J angew Geoinformatik* (3): 142–152.
- HEURICH M (2006) Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. München: Techn Univ München. 331 p.
- JAKUBOWSKI M, LI W, GUO Q, KELLY M (2013) Delineating individual trees from Lidar data. *Int J Remote Sens* 5: 4163–4186.
- KHOSRAVIPOUR A, SKIDMORE A, WANG T, ISENBURG M, KHOSHESHAM K (2015) Effect of slope on treetop detection using a LiDAR Canopy Height Model. *ISPRS J Photogramm Remote Sens* 104: 44–52.
- KRAFT G (1884) Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover: Klindworth's Verlag. 147 p.
- KUONEN V (1983) Wald- und Güterstrassen. Planung – Projektierung – Bau. Pfaffhausen: Eigenverlag. 743 p.
- MENK J, DORREN L, HEINZEL J, MARTY M, HUBER M (2017) Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten. *Schweiz Z Forstwes* 168: 151–159. doi: 10.3188/szf.2017.0151
- MOHAN M, SILVA C, KLAUBERG C, JAT P, CATTS G ET AL (2017) Individual tree detection from unmanned aerial vehicle (UAV) derived canopy height model in an open canopy mixed conifer forest. *Forests* 8 (9): 340.
- NEMESTÓTHY N, SPERRER S, STAMPFER J (2014) Holzernte im Seilgelände – methodische Arbeit. Wien: Kooperationsplattform Forst Holz Papier. 192 p.
- SONDERMANN B (2018) Simulationsgestützte Landmarkendetektion, Lokalisierung und Modellgenerierung für mobile Systeme. Aachen: Rheinisch-Westfälische Techn Hochschule Aachen. 249 p.
- SONDERMANN B, ROSSMANN J (2016) Semantic environment perception and modeling for automated SLAM. *Int J Simul Syst Sci Tech* 17: 5.1–5.8.

- SPERLICH M, KATTENBORN T, KOCH B, KATTENBORN G (2014) Potential of unmanned aerial vehicle based photogrammetric point clouds for automatic single tree detection. In: Syfert E, Gülch E, Heipke C, Schiewe J, Sester M, editors. Proc 34. Wissenschaftlich-technische Jahrestagung DGPF, 26.–28. März 2014, Hamburg (Deutschland). Berlin: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung Geoinformation e.V. Beitrag 260.
- STRAUB BM (2004) Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. München: Bay Akad Wissensch. 99 p.
- THORMANN JJ, ALLENSPACH-SCHLISSBACH K, BUGMANN H, FREHNER M, JUNOD P ET AL (2019) Bedeutung von Marteloscopen für Praxis und Lehre in der Schweiz. Schweiz Z Forstwes 170: 60–68. doi: 10.3188/szf.2019.0060
- VAUHKONEN J, ENE L, GUPTA S, HEINZEL J, HOLMGREN J ET AL (2012) Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. Forestry 85: 27–40.
- ZIEGLER M, WIMMER O, SCHARDT M, ECKMÜLLNER A, HOFRICHTER J (2001) Hoचाuflösende Gelände- und Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten. Österr Z Verm Geoinf 89: 18–25.

### Planification des lignes de câble: précision de la détection des arbres grâce aux images aériennes de drones

Les informations recueillies par les drones peuvent simplifier la planification et le tracé des lignes de câble. Pour cela, la condition est que 1) les coordonnées des potentiels arbres-pylônes et arbres d'ancrage à leur pied et 2) leur diamètre à hauteur de poitrine (DHP) puissent être déterminés avec une précision suffisante dans le modèle de surface obtenu à partir des données de drone. Afin d'analyser les précisions atteignables, un drone eBee Classic a volé à 180 m au-dessus de deux marteloscopes suisses et a réalisé des photos aériennes avec une caméra Sony, d'une résolution de 18.2 mégapixels. Dans le modèle de surface normalisé (nDOM) obtenu grâce à elles, les maxima locaux (cimes des arbres) ont été déterminés avec le logiciel de détection des arbres «FINT». Leurs coordonnées et diamètre à hauteur de poitrine ont ensuite été dérivés. Le taux de détection est d'environ 65% dans les deux marteloscopes. Les coordonnées varient en moyenne de 1,4 m par rapport à celles relevées sur le terrain, au pied des arbres. Les arbres prédominants et dominants sont localisés plus précisément. Le DHP est déterminé avec une précision de 5 cm en moyenne. Un test pratique sur neuf lignes de câble a montré que les coordonnées ainsi déterminées étaient suffisamment précises pour utiliser les arbres-pylônes déterminés dans nDOM lors de la réalisation technique des lignes de câble. Une inspection du site reste nécessaire pour vérifier l'enracinement et l'absence de dégâts des arbres-pylônes potentiels.

### Skyline planning: accuracy of single-tree detection with drone-generated aerial photos

Information collected with drones has the potential to simplify the planning and marking of skylines. The prerequisite for this is that 1) the tree coordinates of potential intermediate support and anchor trees and 2) their diameter at breast height (DBH) can be determined with sufficient accuracy in the surface model obtained from the drone data. To analyse the achievable accuracies, two Swiss marteloscopes were surveyed with a senseFly eBee Classic drone at a height of 180 m and aerial photos were taken with a Sony camera with a resolution of 18.2 megapixels. In the resulting normalised surface model (nDOM) the local maxima (treetops) were determined with the single-tree detection software "FINT". For these treetops the coordinates and the DBH were determined. The detection rate for both marteloscopes was 65%. On average, the coordinates deviated less than 1.4 m from the terrestrial reference tree coordinates. The predominant and dominant trees could be located even more precisely. The DBH was determined with an average accuracy of 5 cm. A practical test with nine skylines showed that the coordinates were accurate enough to use the support trees determined in the nDOM for the technical realisation of the skylines. However, an on-site inspection is still necessary to check the potential intermediate support trees for damages, invisible in the aerial view.