

# Methodenbeschreibung

## zum Handbuch

### Marteloskope im Gebirgswald



**Version 1.0**

Dezember 2017



ETH zürich



## Impressum

### Projektleitung

Jean-Jacques Thormann, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Abteilung Waldwissenschaften, Fachgruppe Gebirgswald, Naturgefahren und GIS, Länggasse 85, 3052 Zollikofen.  
[Jean-jacques.thormann@bfh.ch](mailto:Jean-jacques.thormann@bfh.ch)

### Projektmitarbeit

Kathrin Kühne und Marc Günter, HAFL  
Harald Bugmann und Dominic Michel, ETH Zürich

### Projektbegleitung

Karin Allenspach, Amt für Wald Kanton Bern  
Riet Gordon, Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Graubünden  
Lukas Glanzmann und Raphael Schwitter, ibW Maienfeld / Fachstelle für Gebirgswaldpflege  
David Forrester und Andreas Zingg, Eidg. Forschungsanstalt WSL

### Projektfinanzierung

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung (WHFF)  
Amt für Wald des Kantons Bern  
Amt für Wald und Naturgefahren des Kantons Graubünden

### Autoren

Kathrin Kühne, Jean-Jacques Thormann

## Inhaltsverzeichnis

Modul 1: Beschriftung der Bäume	5
Modul 2a: Baumart	5
Modul 2 b: Brusthöhendurchmesser (BHD)	6
Modul 2c: Baumpositionen	7
Modul 3: Kronenprojektion	12
Modul 4: Baumhöhen	14
Modul 5: Beschreibung Standort und Boden	17
Modul 6: Naturgefahr und Herleitung des Handlungsbedarfs nach NaiS	17
Modul 7a: Verjüngungsgünstige bzw. -feindliche Kleinstandorte	17
Modul 7b: Vorhandene Verjüngung	18
Modul 7c: Licht- bzw. Wärmeverfügbarkeit / Öffnungsgrösse	18
Modul 8a: Einzelbaumstabilität	23
Modul 8 b: Kollektivstabilität	24

## Zusammenfassung

Die im Handbuch zur Einrichtung von Gebirgswaldmarteloscopen vorgeschlagene Methodik erlaubt das einheitliche, nachvollziehbare und praxistaugliche Einrichten neuer Flächen mit konventionellen Erhebungsmethoden sowie die Beurteilung simulierter Eingriffe auf Basis quantitativer und qualitativer Auswertungen. Wie die vorliegende Prüfung verschiedener Alternativen zur Aufnahme zeigt, besteht in der Anwendung luftbildgestützter Verfahren aber Potenzial zur Weiterentwicklung, um räumlich basierte Daten automatisch abbilden und deren künftige Entwicklung nach einem Eingriff modellieren zu können. Insbesondere die Abbildung der dreidimensionalen Kronenstruktur einzelner Bäume und die Modellierung der Interaktionen zwischen Baumkronen könnten Aufschluss über Struktur und Textur (Bestandesgefüge) und damit zur Kollektivstabilität, Konkurrenz und Waldwachstum geben. Entsprechende Grundlagen im Gebirgswald fehlen aber noch weitgehend und können deshalb heute nicht ohne weitere Forschungsarbeit abgebildet werden. Auch die Modellierung der Sonneneinstrahlung vor bzw. nach einem Eingriff zur Bewertung der Öffnungsgrößen wäre ein wichtiges Thema, um künftig auf quantitativen Daten basierte waldbauliche Diskussionen führen zu können. Neben den nur bedingt verfügbaren Daten zu den Lichtansprüchen der Baumarten je nach Standort und Exposition fehlen heute einfache, automatisierte Programme zur Modellierung der Strahlungsverhältnisse für Marteloskopübungen. Die vorhandenen Modellansätze müssten validiert, weiterentwickelt und so umgesetzt werden, dass ihr Potenzial praxistauglich angewendet werden kann.

## Modul 1: Beschriftung der Bäume

### Empfohlene Methode

Wir empfehlen die händische Beschriftung aller Einzelbäume mit hellblauer Forstspezialfarbe der Marke Nelson, da sich diese in den Feldtests bewährt hat.

### Geprüfte Alternativen und Methodenbeschrieb

#### Beschriftung mit anderer Farbe

Im Rahmen der Einrichtung der Pilotflächen wurden verschiedene Beschriftungsmöglichkeiten ausgetestet. Die Beschriftung mit schwarzen Spezialstiften der Marke JAX, mit welchen die Fachstelle Waldbau in Lyss gute Erfahrungen gemacht haben, wurde 2013 zur Einrichtung der Fläche Rona I verwendet (vgl. Abbildung 1). Die schwarzen Stifte sind mit einem Filzaufsatz bestückt, mit welchem sich die Farbe auf die Bäume schreiben lässt. Für glattrindige Bäume (z.B. Buchen, junge Fichten) ist diese Methode relativ einfach anzuwenden. Für Baumarten mit tendenziell grober und rissiger Borke muss aber entweder die Rinde entfernt werden – was bei Nadelbäumen zu vermehrtem Harzfluss führen kann – oder der Zeit- und Materialaufwand zur sauberen, gut sichtbaren Beschriftung wird relativ hoch. Die Sichtbarkeit der schwarzen Farbe ist zudem je nach Lichtverhältnissen nicht optimal. Auch das Verwenden von witterungsresistenter Acrylfarbe aus dem Malerfachhandel hat sich bezüglich Zeitaufwand und Sichtbarkeit nicht bewährt. Die Erfahrungen mit der händischen Beschriftung der Bäume mit hellblauer Forstspezialfarbe der Marke Nelson, welche im Handbuch empfohlen wird, ergab diesbezüglich die besten Resultate. Diese Methode wurde in der Pilotfläche in Rona II ausprobiert und anschliessend auch in Renan angewendet.



Abbildung 1 : Beschriftung mit schwarzen Spezialstiften der Marke JAX. Auftragen und Sichtbarkeit sind nicht ideal.

#### Stempelkissen

Eine bezüglich Sichtbarkeit und Anwendung ähnliche Alternative zur händischen Beschriftung sind vorgefertigte Stempelnummern, mit welchen die Bäume bedruckt werden können. Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL wendet solche beispielsweise für die Markierung ihrer ertragskundlichen Flächen an. Die Methode wird von uns aber deshalb nicht empfohlen, da sich der Aufwand zur Anschaffung spezieller Stempelkissen und eines Transportkoffers für einzelne Marteloskope nicht lohnt, auch wenn damit die Beschriftungszeit pro Baum reduziert werden kann.

#### Nummerierungsplomben, Aluminium- oder Plastikplaketten

Alternativ kann die Beschriftung der Einzelbäume durch das Anbringen von Nummerierungsplomben, Aluminium- oder Plastikplaketten erfolgen, welche direkt am Baum angebracht werden. Diese Möglichkeit wurde aber aus folgenden Gründen von uns nicht weiter geprüft: hohe Anschaffungskosten, geringere Sichtbarkeit für Anzeichnungsübungen, naturfremde Materialien im Wald und ggf. Verletzung der Borke durch Befestigung.

## Modul 2a: Baumart

Zur Bestimmung der Baumart wird die terrestrische Erhebung im Feld vorgeschlagen. Alternativen zur terrestrischen Erhebung der Baumart jedes Einzelbaumes, beispielsweise mit Hilfe von luftbildgestützten Methoden, wurden nicht weiterverfolgt, da davon auszugehen ist, dass diese weder hinsichtlich Aufwand noch Genauigkeit ein entsprechendes Resultat liefern würden.

## Modul 2b: Brusthöhendurchmesser (BHD)

### Empfohlene Methode

Der Brusthöhendurchmesser soll im Feld mittels kreuzweiser Kluppierung erfolgen, für Bäume mit einem BHD über 60 cm kann ein Umfangmessband verwendet werden. Diese Methode wird standardmässig auch im Rahmen der Erhebungen des Landesforstinventars LFI oder zur Vermessung der ertragskundlichen Flächen der WSL verwendet und hat sich auch für Marteloskope im Gebirgswald als zweckmässig erwiesen.

### Geprüfte Alternativen und Methodenbeschreibung

#### Messung aller BHD mit Umfangmessband

Da Bäume selten einen kreisförmigen Stammquerschnitt aufweisen, sollten die Messung der BHD mit einem Umfangmessband theoretisch genauere Werte liefern. Für die Fläche Rona I wurde deshalb auch die Kompletterhebung mittels Umfangmessband geprüft und die Resultate mit denjenigen der Kluppierung verglichen. Im Juli 2013 (Kluppe) und November 2013 (Umfangmessband) wurden alle Bäume gemessen (n=459). Der t-test ergab, dass sich die Resultate signifikant voneinander unterscheiden. Die mittlere Differenz beträgt -0.44 cm (vgl. Abbildung 2).

Selbst wenn ein Teil der Differenz darauf zurückzuführen ist, dass die BHD nicht zur gleichen Zeit der Vegetationsperiode gemessen wurden, kann davon ausgegangen werden, dass zwischen den Messmethoden gewisse Unterschiede bestehen. Wir empfehlen die Messung mit der Kluppe, da unsere Erfahrungen gezeigt haben, dass gerade im steilen Gelände der Aufwand für die Messung mittels BHD-Messband deutlich höher ist. Ausserdem war das durchgehend horizontale Anlegen des Massbandes auf Brusthöhe bei stark grobastigen Bäumen teilweise nicht möglich, was zu Genauigkeitsverlusten führt und es verunmöglicht, die genaue Bandführung bei Folgeaufnahmen reproduzieren zu können.

#### Ableiten des BHD auf Basis luftbildgestützter Methoden

Da der BHD eine einfach zu messende Grösse ist und Kenntnisse über deren möglichst exakten Werte für Marteloskopübungen von grosser Bedeutung sind, wurde die Schätzung der Brusthöhendurchmesser auf Basis von luftbildgestützten Methoden (Herleitung des BHD aufgrund allometrischer Beziehungen zur Baumhöhe) nicht detailliert geprüft. Ziesak et al. (2017) zeigten aber, dass die für Rona I aus Oberflächenmodellen abgeleiteten BHD teils stark von den im Feld erhobenen Durchmessern abweichen.

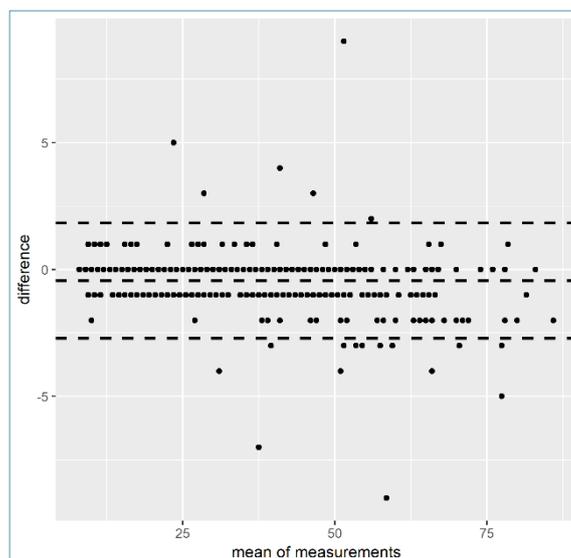


Abbildung 2: Bland-Altman-Plot zum Vergleich der beiden Messmethoden in Rona I. Die Differenzen zwischen klupperten und mit Umfangmessband gemessenen Daten sind dabei gegen den Mittelwert der Messungen aufgetragen. Mittelwert der Differenz: -0.44 cm mit einer Standardabweichung von -2.71 cm resp. +1.84 cm.

## Modul 2c: Baumpositionen

### Empfohlene Methode und Fazit aus geprüften Alternativen

Wir empfehlen die terrestrische Erhebung der Stammfußkoordinaten nach Verfahren, welches auch die WSL zur Einrichtung der ertragskundlichen Flächen verwendet, wobei theoretisch auch analoge konventionelle Aufnahmeverfahren mit anderen Messgeräten zum Einsatz kommen können. Die Herleitung der Baumpositionen auf Basis luftbildgestützter Verfahren eignet sich für Marteloskope nicht, da jeder Einzelbaum unabhängig der vertikalen Waldstruktur korrekt detektiert werden muss. Dies ist mit Methoden zur Einzelbaumdetektion auf Basis von normalisierten Oberflächenmodellen nicht möglich. Verfahren zur Extraktion mehrerer Vegetationshöhenstufen auf Basis von dreidimensionalen LIDAR-Punktwolken zur Abbildung aller Einzelbäume unterschiedlicher Höhenklassen sind heute noch zu wenig ausgereift, um bezüglich Korrektheit und Vollständigkeit gleich gute Resultate zu liefern.

### Geprüfte Alternativen und Methodenbeschrieb

#### Analoge terrestrische Aufnahmeverfahren (Situierung der Stammfußkoordinaten mit Azimut und Distanz)

Das im Handbuch beschriebene Verfahren zur Situierung der Stammfußkoordinaten mittels Messung von Azimut und Distanz durch Aufnahme der Polarkoordinaten von Zwischenpunkten aus kann analog auch mit alternativen Messgeräten erfolgen. Neben analogen Instrumenten (Kompass, Messband) bestehen heute auch teilweise automatisierte Verfahren. Die von Haglöff entwickelte Instrumentenlösung Postex® ist ein System, welches die Koordinaten und Baumpositionen nach demselben Prinzip unter Verwendung von GPS-Daten automatisch berechnet. Aufgrund der hohen Anschaffungskosten, welche sich für die Einrichtung einzelner Marteloskope nicht lohnt, wurde diese Methode im Rahmen des Projekts aber nicht geprüft.

Im Prinzip würde die Triangulation mit einem Theodolit genauere Ergebnisse ermöglichen. Da die Situierung der korrekten Baummitte ohne zusätzlichen Messaufwand ohnehin mit einem gewissen Schätzfehler behaftet bleibt, ist die mit dem Bussolenzug erreichbare Genauigkeit als ausreichend zu betrachten.

#### Vereinfachtes System zur Situierung der Stammfußkoordinaten mit einem Lasermessgerät

Das Prinzip der Situierung von Stammfußkoordinaten wurde von uns in Rona (Flächen I und II) auch mit einem vereinfachten System angewendet. Dabei wurden Horizontalabstände und Azimut mit Hilfe eines Lasermessgerätes (in unserem Fall mit einem Trupulse®360 der Firma Lasertechnik) erfasst. Gemessen wird dabei direkt von einem Baum zu allen weiteren sichtbaren Bäumen, dann wird der Messstandort verschoben. Da der gemessene Abstand zwischen zwei Bäumen dabei lediglich eine Teildistanz der gesamten Distanz zwischen den jeweiligen Baummittelpunkten darstellt, muss die effektive Entfernung im Nachhinein berechnet werden mit der Formel

$$D_{\text{eff}} = (\text{BHD}_{B_1}/2) + A + D + (\text{BHD}_{B_2}/2),$$

Wobei:  $(\text{BHD}_{B_{1,2}}/2)$  = Radius der Bäume 1 bzw. 2,  $A$  = Abstand vom Baumstamm bis Lasermessgerät (z.B. Kopfabstand) und  $D$  = Gemessene Horizontalabstände.

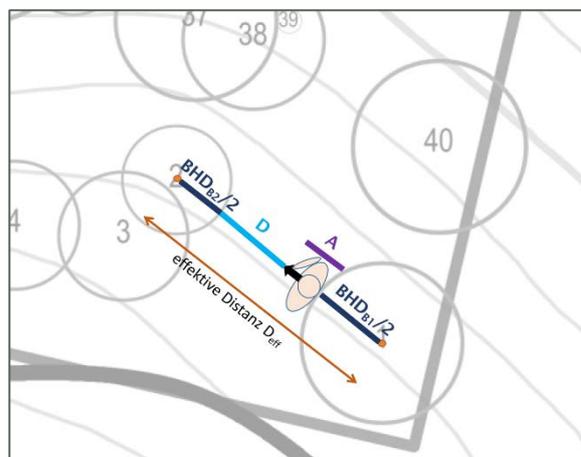


Abbildung 3: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Horizontalabstände zweier Stammfußmittelpunkte mit Hilfe eines Lasermessgerätes

Der Aufwand für entsprechende Aufnahmen ist deutlich geringer als mit der exakteren Situierung mittels Stativ, Bussole und Vertex von Zwischenpunkten aus. Aufgrund der Distanzmessung mit einem Laserstrahl eignen sich die Messungen aber nur für Bestände, wo wenig Störfaktoren (z.B. Unterwuchs, starke Vegetation, tiefhängende Äste) die direkte Sichtbarkeit bzw. Messung von einem Baum zum nächsten einschränken.

Der Vergleich berechneten Koordinaten aus den Messmethoden „terrestrische Erhebung mittels Stativ, Bussole und Vertex von Zwischenstandpunkten aus“ sowie „vereinfachtes System mit Lasermessgerät“ in Rona II zeigt, dass die mittleren Abweichungen der beiden Messmethoden zwischen 2.92 m (X-Koordinate) bzw. 3.54 m (Y-Koordinate) betragen, wobei die Standardabweichung rund 8 m beträgt (vergleiche Tabelle 1 und Abbildung 4). Wie der gepaarte t-Test ergab, unterscheiden sich die beiden Messmethoden somit signifikant voneinander ( $2.2 \cdot 10^{-16}$  sowohl für X- wie auch Y-Koordinaten).

Ein visueller Abgleich der Koordinaten mit den auf dem Luftbild und Oberflächenmodell erkennbaren Baumpositionen zeigte, dass die im Handbuch vorgeschlagene Methode 3 zur terrestrischen Erhebung mittels Stativ,

Bussole und Vertex von Zwischenpunkten aus die Baumpositionen besser abbilden kann. Dies kann vermutlich auf folgende Messungenauigkeiten mit dem vereinfachten System mit dem Lasermessgerät zurückgeführt werden:

- Höhere Ungenauigkeit aufgrund des Abstands A, der je nach Position der messenden Person variiert (z.B. im steilen Gelände, bei astigem Baum mit tiefer Krone usw.)
- Höhere Ungenauigkeit durch sich stärker fortpflanzende Fehler, da nicht mit kontrollierten Zwischenpunkten gearbeitet wird
- Höhere Ungenauigkeit durch Gefahr, die gemessene horizontale Distanz zu unterschätzen, wenn Hindernisse (z.B. Äste) den Laserstrahl unterbrechen, bevor er den Stamm trifft.

Zudem hat sich gezeigt, dass die Erhebung mittels vereinfachtem System unabhängig von allfälligen Messungenauigkeiten deutlich fehleranfälliger ist. Während mit dem exakten Verfahren nach Methode WSL keine Korrekturen vorgenommen werden mussten, zeigten Versuche in Rona und Renan Fehler, welche nicht durch Messungenauigkeiten erklärt werden konnten und die erneute Messung einer Teilfläche erforderte. Da die Positionierung der Stammfusskoordinaten wichtige Grundlage für die Erstellung und Auswertung von Karten - und gegebenenfalls später für Modellierungen - ist, scheint der Aufwand für die exaktere Messmethode gerechtfertigt. Eine noch exaktere, geodätische Aufnahme ist nicht zielführend, wie Auswertungen von entsprechenden Versuchen an der WSL gezeigt haben (mündliche Auskunft A. Zingg).

Tabelle 1: Statistische Kennwerte zum Vergleich der ermittelten Baumpositionen für das im Handbuch vorgeschlagene Verfahren (Bussolenzug mit Stativ, Wissenkompass und Vertex) mit dem vereinfachten System mit Hilfe eines Lasermessgeräts.

	Anzahl	Mittlere Abweichung	Lower Limit	Upper Limit
X-Koordinaten	860	-2.92 m	-8.05 m	2.22 m
Y-Koordinaten	860	3.54 m	-1.32 m	8.39 m

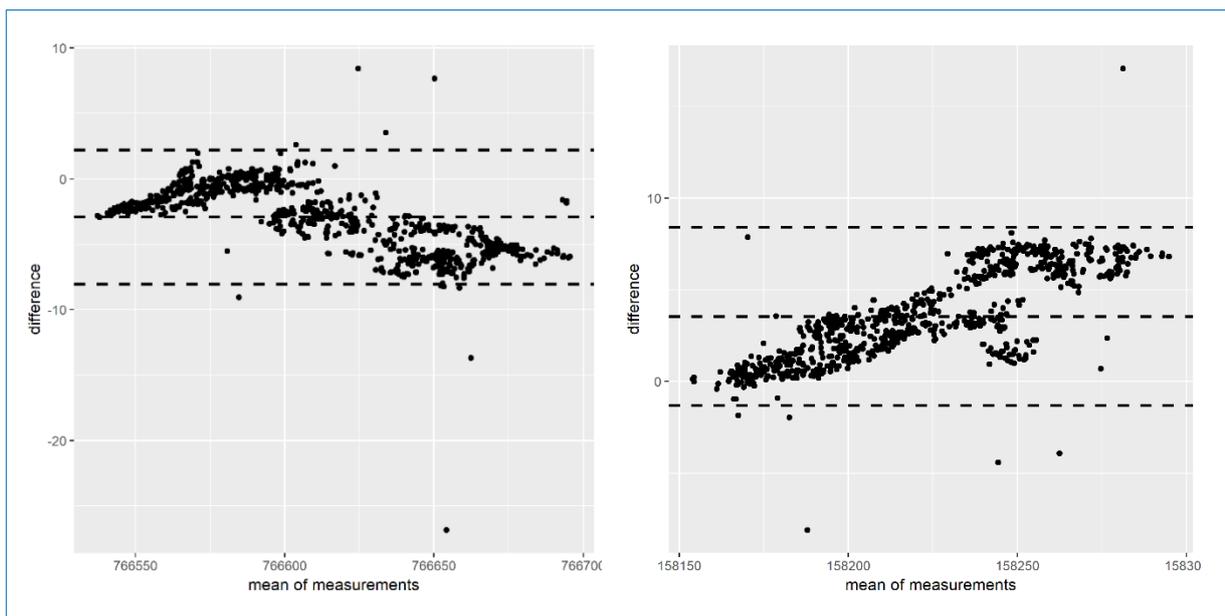


Abbildung 4: Bland-Altman-Plot zur Vergleich der Messmethoden „Verfahren WSL“ und „vereinfachtes Verfahren mit Lasermessgerät“ in Rona II. Die Differenzen der beiden Methoden sind dabei gegen den Mittelwert der Messungen aufgetragen.

### Erfassung der GPS Koordinaten aller Bäume

Auf der Fläche Rona I wurde 2013 getestet, inwiefern sich die Messung der Baumpositionen mittels GPS eignen würde. Für die damaligen Aufnahmen wurde ein Trimble GPS Gerät verwendet, welches das AWN Graubünden zur Verfügung stellte. Die Daten wurden im Feld erhoben und anschliessend mittels Differentialkorrektur aufbereitet. Bereits die visuelle Darstellung auf einer Karte zeigte, dass es deutliche Abweichungen zwischen den durch GPS gemessenen Werten und dem Luftbild bzw. Lidarbild gab (nicht abgebildet), weshalb keine weiterführenden Analysen gemacht wurden. Die Übersicht der Differentialkorrektur ergab relativ hohe Abweichungen von über 20% (1-2m), über 50% (2-5m) und über 20% (über 5 m Abweichung). Im Rahmen der Feldtests wurden deshalb keine weiteren Analysen zur Erfassung mittels GPS getestet.

### Erhebung der Baumpositionen aufgrund luftbildgestützter Verfahren

Nebst den konventionellen Verfahren zur terrestrischen Erhebung von Einzelbaumdaten haben zunehmend auch Verfahren der luftbildgestützten Analysen zur automatischen Einzelbaumerkennung und -datenableitung an Bedeutung gewonnen, beispielsweise die automatische Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten (Menk et al. 2017). Denn die Erhebung der Lage der Einzelbäume, deren Höhe sowie die Erfassung von Kronendaten stellen einen erheblichen Zeit- und Kostenfaktor dar bei herkömmlichen Versuchsaufnahmen, weshalb gerade bei grossräumigeren Untersuchungen ein routinierter Einsatz von Fernerkundungsdaten zielführend ist und zu neuen Möglichkeiten der Abbildung und Vermessung von Kronenraumstrukturen führt. Im Rahmen des Projekts wurden einige Tests zur Ableitung solcher Einzelbaumdaten auf Basis luftbildgestützter Verfahren durchgeführt. Eine Übersicht verwendeter Fernerkundungsdaten liefert die nachfolgende Box.

### Fernerkundungsdaten in der forstlichen Anwendung

Fernerkundungsdaten werden aus Verfahren zur Gewinnung von Information generiert, welche ohne direkten Zugang zum Untersuchungsobjekt auskommen (Konecny und Lehmann 1984). Heute werden dazu vor allem Satelliten, Sensoren und Drohnen eingesetzt. Die Bedeutung für die forstliche Anwendung von Fernerkundungsdaten zur Erfassung von Wald- und Einzelbaumattributen hat in den letzten Jahren deutlich zugenommen (Zhang et al. 2013) und erlaubt es, über flächenbezogene Ansätze Daten abzuleiten und mit Hilfe von Ansätzen zur Einzelbaumdetektion Informationen zu Bäumen zu gewinnen, beispielsweise mit Verfahren, welche auf Basis der Vegetationshöhenmodelle (VHM) mit Hilfe der lokalen Maxima die potenziellen Kronenspitzen extrahieren. Die dafür notwendigen VHM stellen normalisierte Oberflächenmodelle (nDOM) dar, welche aus der Differenz zwischen digitalen Oberflächenmodellen (DOM) und Geländemodellen (DGM) generiert werden.

#### LIDAR-Daten

Das digitale Geländemodell (DGM) auf Basis von Daten des flugzeuggetragenen Laserscannings (LIDAR), ist in der Schweiz flächendeckend mit einer Zellgrösse von 2m verfügbar und wird alle sechs Jahre aktualisiert (SwissALTI 3D, Swisstopo). Das digitale Oberflächenmodell (DOM) wurde ebenfalls auf Basis der LIDAR-Technologie erstellt, wird aber nicht nachgeführt und ist je nach Region in unterschiedlicher Zellgrösse verfügbar. Für gewisse Kantone liegen hochpräzise LIDAR-Rohdaten vor, beispielsweise im Kanton Bern und damit auch für das Marteloskop in Renan. In Rona hingegen existiert das entsprechende DOM in geringer Auflösung und ist damit weniger präzise. LIDAR-Daten ermöglichen nicht nur das Erstellen präziser Oberflächenmodelle, sondern bestehen aus dreidimensionalen Punktwolken, aus welchen weitere strukturelle Daten extrahiert werden können.

#### Drohnen-Daten

Drohnen sind mit Kameras ausgestattete, unbemannte Fluggeräte, welche als kostengünstige und flexible Instrumente zur Gewinnung von Fernerkundungsdaten eingesetzt werden können. An der HAFL stand für Analysen im Zusammenhang mit dem Projekt «Marteloscope im Gebirgswald» eine eBee Drohne zur Verfügung, welche mit einem hochpräzisen GPS und einer Fotokamera des Typs Sony WX RGB mit einer Auflösung von 18.2 Megapixeln ausgestattet ist. Sowohl die Fläche in Renan wie auch diejenigen in Rona wurden zu Testzwecken befliegen. Die Flugplanung erfolgte dabei mit der Software eMotion, die Aufnahmen erfolgten mit einer durchschnittlichen Flughöhe von 180 m. Das Erstellen des Oberflächenmodells erfolgt dabei stereophotogrammetrisch. Für die Datenaufnahme und -aufbereitung muss mit einem Aufwand von rund einem Arbeitstag gerechnet werden (ohne An- und Abreise), wobei aufgrund der Witterungsverhältnisse mit einem gewissen Risiko zur Wiederholung des Fluges gerechnet werden muss. Ziesak et al. (2017) untersuchten unter anderem für Rona, inwiefern sich die Qualität der Swisstopo-Daten und der mit Hilfe eines Drohnenflugs gewonnenen Daten vergleichen lassen und inwiefern die Flughöhe der Drohne einen Einfluss auf deren Qualität hat. Dabei zeigte sich, dass die Orthofotos auf Basis der Swisstopo-Daten die beste Qualität erreichten. Auch die Qualität der Oberflächenmodelle ist mindestens dann besser, wenn aufgrund ungünstiger Lichtverhältnisse (Schattenwurf) durch die Drohnenbilder Artefakte im Oberflächenmodell entstehen, da dort fehlende Höhenwerte entweder auf Null gesetzt oder durch Interpolation benachbarter Rasterzellen verzerrt werden.

#### Terrestrisches Laserscanning

Nebst Fernerkundungsdaten aus luftbildgestützten Verfahren existieren auch terrestrische Laserscanner (z.B. FARO®), mit welchen Laserscanner-Punktwolken generiert werden können. Mittels spezieller Algorithmen zur Detektion und Segmentierung können so verschiedene Forstinventurparameter automatisch bestimmt werden (Bienert et al. 2007). Im Rahmen der Analysen von Ziesak et al. (2017) konnte in Rona ein erster Test zur Baumdetektion auf Basis einer an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule RWTH Aachen entwickelten Methode mit einer mobilen Lokalisierungseinheit (Sondermann und Rossmann 2014, 2016) durchgeführt werden.

### Tests zur Erhebung der Baumpositionen aufgrund luftbildgestützter Verfahren

Mit Hilfe von Programmen zur Einzelbaumdetektion auf Basis lokaler Maxima in Vegetationshöhenmodellen können die Baumhöhen, sowie Koordinaten der Einzelbäume bestimmt und daraus weitere Daten abgeleitet werden. Wie verschiedene Untersuchungen zeigen, liefern die Resultate grossräumig plausible Ergebnisse, wobei die Detektionsraten in Laubwäldern aufgrund der komplexeren Kronenformen und Strukturen im Allgemeinen niedriger sind.

Für die Herleitung der Baumpositionen wurde die Einzelbaumdetektion mit Hilfe des Programmes FINT (Find Individual Trees, siehe Dorren 2014) auf den Marteloskopen in Rona sowie in Renan getestet.

In einer ersten Analyse wurden die Resultate der automatisierten Einzelbaumdetektion lediglich grafisch mit den terrestrisch erhobenen Koordinaten verglichen. Kritisch bei solchen Ansätzen ist das Finden einer adäquaten

räumlichen Auflösung, um eine optimale Detektion zu erreichen (Glätten vs. Bildrauschen, vergleiche Menk et al. 2017). Das Finden einer optimalen Rasterauflösung erfolgt in unseren Tests iterativ. Bereits der visuelle Abgleich der mit FINT detektierten und effektiv im Feld vermessenen Bäume macht deutlich, dass damit nur diejenigen Bäume detektiert und korrekt zugeordnet werden können, welche sich in der Oberschicht befinden, während darunterliegende, kleinere Bäume nicht erkannt werden können (Abbildung 5).

In seiner Bachelorarbeit nahm Condrau (2017, zitiert in Ziesak et al. 2017) vertiefte Genauigkeitsanalysen vor, in dem er unter

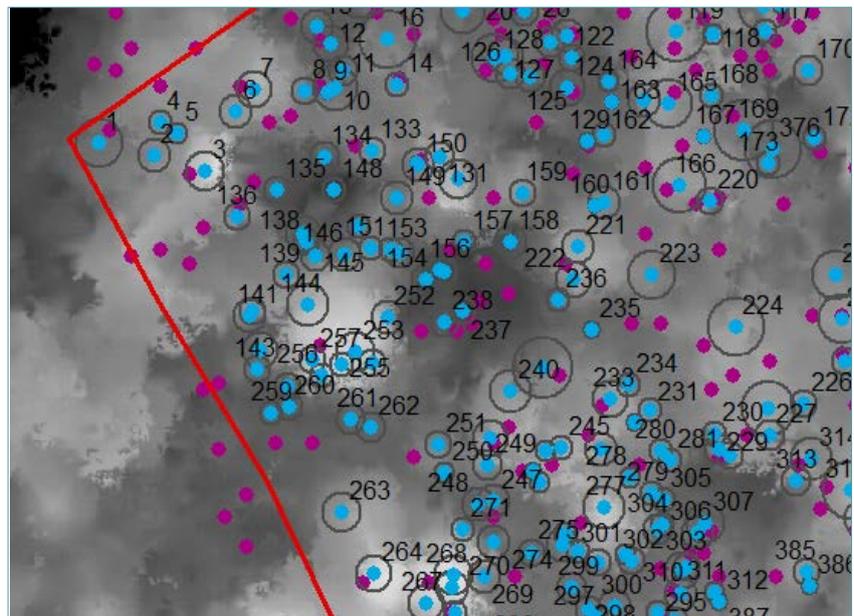


Abbildung 5: Beispielhafte Darstellung der tatsächlich vorhandenen Bäume (blaue Punkte) sowie der mit FINT detektierten Einzelbäume (rote Punkte) in Renan. Hinterlegt ist ein normalisiertes Höhenmodell. Je heller der Hintergrund, desto höher die Vegetation.

anderem für das Marteloskop Rona I die terrestrisch gemessenen Baumpositionen mit den aus Lidar- bzw. Drohnenbilder abgeleiteten Daten auf Basis der Programme FINT und LiForest verglich.

Dazu wurde in einem ersten Schritt die Vollständigkeit und Korrektheit der detektierten Einzelbäume mit den effektiv auf der Fläche stehenden Bäume bewertet. Diese war mit 65% (FINT) bzw. 75% (LiForest) Vollständigkeit und 43% (FINT) bzw. 47% (LiForest) Korrektheit nicht optimal. Die Detektionsraten lagen somit im Vergleich zu anderen Studien eher tief (Bayer et al. 2013, Persson et al. 2002), was unter anderem auf die vertikale Struktur der untersuchten Wälder zurückzuführen ist (vgl. Eysn et al. 2015). Bei einer Analyse der Daten nach den sozialen Klassen nach Kraft (1984) zeigte sich der Einfluss der sozialen Stellung auf die Detektionsraten. Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten war umso besser, je dominanter ein Baum ist. In Rona konnte dabei ein signifikanter Einfluss der Kraft'schen Klassen auf die Abweichung der Stammfusskoordinaten aufgezeigt werden. Mit abnehmender Dominanz der Bäume nimmt die Abweichung der Stammfusskoordinaten zu. So gehörten beispielsweise in Rona I rund 75% der nicht detektierten Bäume zur beherrschten oder unterdrückten Klasse (Condrau 2017).

Nachdem durch eine händische Zuweisung der mit FINT bzw. LiForest detektierten Referenzpositionen die korrekt detektierten Bäume selektiert waren, wurden die aus luftbildgestützten Verfahren abgeleiteten Daten zur Baumposition mit den terrestrisch eingemessenen Stammfusskoordinaten verglichen. Die mittleren Abweichungen bewegen sich für Rona I je nach Detektionsmethode zwischen 1.23 und 1.41 m, wobei zwischen den Programmen FINT und LiForest kein signifikanter Unterschied bestand (vgl. Tabelle 2 und Abbildung 6).

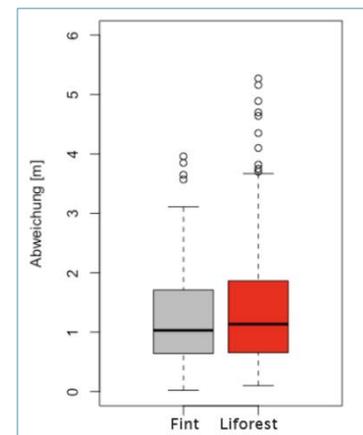


Abbildung 6: Abweichung der Stammfusskoordinaten von terrestrischen Aufnahmen in Rona (n=215).

Tabelle 2: Statistische Kennwerte zum Vergleich der ermittelten Baumpositionen mit FINT und LiForest und terrestrischen Stammfusskoordinaten (nach Condrau 2017)

	n	min	max	Mittelwert	Median	SD	Wilcoxon-Signed-Rank
Rona / FINT	241	0.02	3.96	1.24	1.03	0.81	P= 0.8747
Rona / LiForest	280	0.1	5.27	1.41	1.14	1.02	

Damit konnten die Baumpositionen mittels automatischer Detektion auf Basis von Oberflächenmodellen also für jene Bäume relativ präzise generiert werden, welche korrekt detektiert wurden. Für das Einrichten von Marteloscopen ist es aber nötig, jeden Einzelbaum zu erfassen, weshalb die Erhebungsmöglichkeit auf Basis luftbildgestützter Verfahren zur Detektion und Positionierung der Einzelbäume nicht empfohlen werden kann.

Beim Vergleich der terrestrisch ermittelten Stammfusskoordinaten mit den aus Oberflächenmodellen generierten Baumpositionen ist des Weiteren zu beachten, dass man eine Fehlerbetrachtung macht. Während terrestrisch ermittelte Baumpositionen Stammverteilungspläne liefern, beziehen sich die aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Positionen auf die Kronenspitzen. Aufgrund der Wuchsform der Bäume sind deshalb Abweichungen möglich (Eysn et al. 2015), die gerade im geneigten Gelände eine Diskrepanz in der Positionierung darstellen kann, welcher im Hang einen Messfehler ergibt. Darüber hinaus kann die Positionsgenauigkeit der terrestrisch eingemessenen Bäume eine gewisse Abweichung zur Realität aufweisen, welche sich aus Geräte- und Messungenauigkeit ergibt und nicht exakt quantifizierbar ist.

### Terrestrisches Laserscanning

Zusätzlich zu den Untersuchungen von Condrau (2017) auf Basis von luftbildgestützten Verfahren zur Baumdetektion kam eine an der RWTH Aachen entwickelte Methode zur Detektion von Objekten mit einer mobilen Lokalisierungseinheit zum Einsatz, welche LIDAR-Sensoren verwendet (Sondermann und Rossmann 2014, Sondermann und Rossmann, 2016). Die Baumpositionen werden dabei über die Stammdetektion bestimmt. Diese wurde auch auf der Fläche Rona II ausprobiert. Die Aufnahmen in Rona führten allerdings zu keinen brauchbaren Resultaten, da der Algorithmus zur Baumdetektion bei sehr dichten Waldstrukturen und im geneigten Gelände noch nicht funktioniert.

### Erhebung der Baumpositionen mittels Kombination der aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Baumpositionen mit terrestrisch gemessenen Daten

Wie die vorangehend beschriebenen Resultate zeigen, ist es nicht möglich, alle Einzelbäume auf einer Fläche mit Hilfe luftbildgestützter Verfahren korrekt zu detektieren. Die terrestrische Einmessung ist deshalb unabdingbar. Theoretisch wäre es allerdings möglich, beide Methoden miteinander zu kombinieren: Mit Hilfe der Einzelbaumdetektion auf Basis eines nDOMs könnten die höchsten Bäume der Fläche positioniert und anschliessend mit terrestrischen Messungen der nicht erkannten Bäume ergänzt werden.

Diese Möglichkeit wurde im Rahmen der Methodentests im Projekt «Marteloscope im Gebirgswald» allerdings nicht geprüft. Wir gehen davon aus, dass der Zeitaufwand zur Kombination dieser beiden Varianten höher ist als die alleinige Messung im Feld, weil einerseits die Datenaufbereitung und -analyse der luftbildgestützten Verfahren miteinberechnet werden muss und die Zeitersparnis im Feld als gering eingeschätzt wird, da trotzdem auf der gesamten Fläche Baumpositionen eingemessen und alle Zwischenpunkte aufgesucht werden müssen.

## Modul 3: Kronenprojektion

### Empfohlene Methode und Fazit aus geprüften Alternativen

Für Gebirgswaldmarteloskope empfehlen wir zurzeit die Darstellung der Kronenprojektionsfläche mit Hilfe von einfachen Kreisen in Abhängigkeit allometrischer Beziehungen zum Brusthöhendurchmesser. Dadurch können die effektiven Kronenflächen grob angenähert werden. Die Abbildung der Kronendurchmesser mit Hilfe von Formeln in Abhängigkeit verschiedener Parameter ist eine gängige Methode zur Darstellung der Kronenprojektionsfläche. Zur Beschreibung der Beziehung zwischen BHD und Kronenradius existieren verschiedene Studien (Krijcek et al. 1961, Curtin 1964). Neuere Modelle bilden die Beziehungen zwischen Brusthöhendurchmesser und Kronenprojektionsfläche auf Basis des BHD und weiterer baumartenspezifischer Parameter ab (Shimano 1997). Pretzsch und Kahn (1998) haben für SILVA eine Formel verwendet, welche nebst dem BHD und baumartenspezifischen Parametern auch die Baumhöhe miteinbezieht. Andere Ansätze beruhen auf der Schätzung der Kronenprojektionsfläche auf Basis der Stammdimensionen sowie der Baumpositionen (Grote 2003). Für die Marteloskope in Rona und Renan haben sich die von Pretzsch et al. (2015) bestimmten baumartenspezifischen Parameter zur Herleitung der Kronenradien in Abhängigkeit des Brusthöhendurchmessers als gute Annäherung erwiesen. Es ist zu beachten, dass im Gegensatz zum Baumhöhenwachstum die Kronenfläche und der BHD stark von der Konkurrenz abhängen und die Anwendung entsprechender allometrischer Beziehungen deshalb je nach Bestandesdichte eine mehr oder weniger gute Annäherung darstellen, welche gegebenenfalls angepasst werden sollten, wenn sich beispielsweise im Abgleich mit Luftbildern bzw. Oberflächenmodellen grosse Abweichungen zeigen. In einem solchen Fall empfehlen wir die terrestrische Erhebung mittels tangentialer Hochblickmethode für eine Auswahl von Probebäumen, auf Basis derer die Kronenradien aller Einzelbäume abgeleitet werden können.

Es existieren Methoden, welche eine wesentlich exaktere Abbildung der Kronenfläche erlauben würden, beispielsweise durch aufwendige terrestrische Messung oder der Extraktion der Kronenprojektionsflächen aus LIDAR-basierten Daten. Wir haben uns aber für die einfache Abbildung mittels allometrischer Beziehung entschieden, da der Aufwand zur Herleitung exakter einzelbaumspezifischer Kronenprojektionsflächen relativ hoch ist. Dieser steht damit nicht in einem vernünftigen Verhältnis zum Nutzen, welchen wir durch eine exaktere Darstellung der Kronenprojektionsfläche zurzeit für die Anwendung von Gebirgswaldmarteloskopen gemäss unserem Konzept erhalten würden, da dieses vor allem auf einfachen quantitativen Vergleichen sowie einer qualitativen grafischen Beurteilung beruht.

### Mögliche Alternativen

#### Terrestrische Erhebung der Kronenradien

Die horizontale Ausdehnung der Krone kann terrestrisch bestimmt werden, indem die Kronenausladung mittels tangentialer Hochblickmethode für mehrere Punkte (z.B. vier Messungen in N, O, S und W - Richtung) abgeschätzt („tangentiale Hochblickmethode“) oder durch das Abloten der längsten Äste aus verschiedenen Winkeln mit einem Kronenspiegel gemessen wird (siehe Abbildung 7). Die exakte Messung der Kronenausdehnung im Feld ist aber schwierig, aufwendig und fehleranfällig und vermag die komplexen Kronenstrukturen und unterschiedlichen morphologischen Charakteristiken auf Einzelbaumebene nur unzureichend abzubilden (Röhle 1986, Grote 2003).

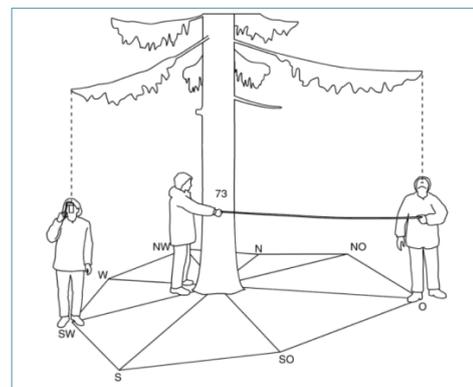


Abbildung 7: Terrestrische Erhebungsmethoden zur Ermittlung der Kronenradien (Pretzsch et al. 2015).

#### Generierung einer Baumkronenmaske auf Basis des Oberflächenmodells

Eine weitere Möglichkeit, die Baumkronen abzubilden, ist das Erstellen einer Baumkronenmaske auf Basis von Vegetationshöhenmodellen. Rosselli (2017) hat dafür in Rona I eine Kronenmaske für alle Zellen definiert, deren Werte des Vegetationshöhenmodells grösser als 3 m waren. Um jede Zelle der Kronenmaske eindeutig einer Baumkrone zuzuordnen, wurde ein Algorithmus auf Basis von Voronoi-Diagrammen angewendet. Eine weitere Möglichkeit wäre etwa die Detektion der Kronen auf Basis von Watershed-Algorithmen, wie sie etwa Noldin (2015) mit Hilfe eines an der ETH entwickelten Matlab-Skripts anwendete. Mit der Kronendetektion auf Basis von Oberflächenmodellen ist es zwar möglich, die Gesamtkronenprojektionsfläche zu extrahieren, Bäume unterer Vegetationsschichten können dabei aber nicht korrekt abgebildet werden, weshalb sie für mehrschichtige Bestände nicht geeignet sind.

### Kronendetektion aus LIDAR-Daten

Angesichts der Bedeutung der Kronengrundfläche für die Beurteilung der Standraumökonomie und der Notwendigkeit einer möglichst exakten Erfassung bei der Analyse von Veränderungen der Kronenmerkmalsstrukturen wurden in letzter Zeit auch Ansätze zur Kronendetektion auf Basis von dreidimensionalen Punktwolkendaten weiterentwickelt, um die individuellen Kronenprojektionen und -volumen von Einzelbäumen abbilden zu können. Hackenberg et al. (2015) haben etwa ein Modell entwickelt, um die verastete Struktur der Bäume mit Hilfe von aus terrestrischen Laserscanningdaten gewonnenen Punktwolken besser beschreiben zu können (Abbildung 8).

Auch Fleck et al. (2011) oder Xu (2014) modellierten mit Hilfe automatischer Algorithmen die individuellen Kronenprojektionsflächen und -volumen anhand von 3D-Punktwolken. Noch immer ist es aber schwierig, diese exakt abzubilden, da sich Kronenform, -radius und -höhe innerhalb von Baumarten und im Bestand selbst stark voneinander unterscheiden und grosse Asymmetrien in der Kronenform selbst in homogenen Beständen bestehen.

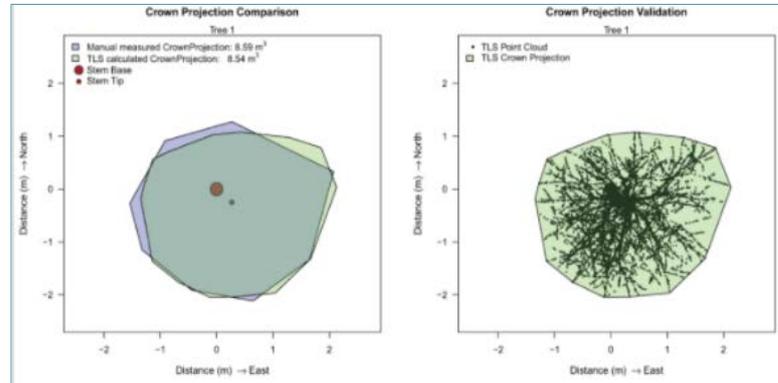


Abbildung 8: links : Vergleich der terrestrisch erhobenen Kronenfläche (violett) mit der aus terrestrischen Laserscanningdaten extrahierten Krone (grün). rechts: Validierung der Kronenprojektion auf Basis der hergeleiteten Kronenprojektion (Hackenberg et al. 2015).

Entsprechende Ansätze zur Abbildung der realen Kronen im dreidimensionalen Raum sind heute aber noch sehr aufwendig und können deshalb nicht praxistauglich angewendet werden. Mit der Weiterentwicklung bestehender Ansätze und deren Anbindung an automatisierte Modelle bergen diese aber sicher Potenzial, künftig nicht nur die Kronenprojektionsfläche besser abbilden, sondern auch für Auswertungen zum Bestandesgefüge (Kollektivstabilität, Konkurrenz, Baum-zu-Baum-Interaktionen) benutzt werden zu können.

## Modul 4: Baumhöhen

### Empfohlene Methode und Fazit

Wir empfehlen bei der Einrichtung von Marteloskopien die Messung der Baumhöhen mit einem Vertex für eine Auswahl an Probebäumen und die anschließende Berechnung der Höhe durch die Interpolation mittels allometrischer Beziehung zwischen Höhe und BHD für die restlichen Bäume. Aus luftbildgestützten Verfahren, beispielsweise auf Basis von LIDAR-Daten, wären die Höhen zwar ebenfalls ableitbar, allerdings ist dies mit vertretbarem Zeitaufwand heute nur auf Basis des Oberflächenmodells möglich, was aber lediglich die Bestimmung der Höhen für Bäume der Oberschicht erlaubt.

### Geprüfte Alternativen

#### Terrestrische Erhebung mittels Lasermessgerät

Anstelle der terrestrischen Messung mit einem Vertex können Baumhöhen auch mit einem Lasermessgerät oder alternativen Messgeräten zur trigonometrischen Herleitung der Baumhöhe vermessen werden.

Im Rahmen von Methodentests wurden die Höhen ausgewählter Bäume in Rona I und II sowohl mit dem Vertex wie auch mit einem Lasermessgerät vermessen und verglichen. Die Resultate zeigen, dass die mittlere Abweichung der beiden Messmethoden in Rona bei maximal -0.46 m liegt (Abbildung 10).

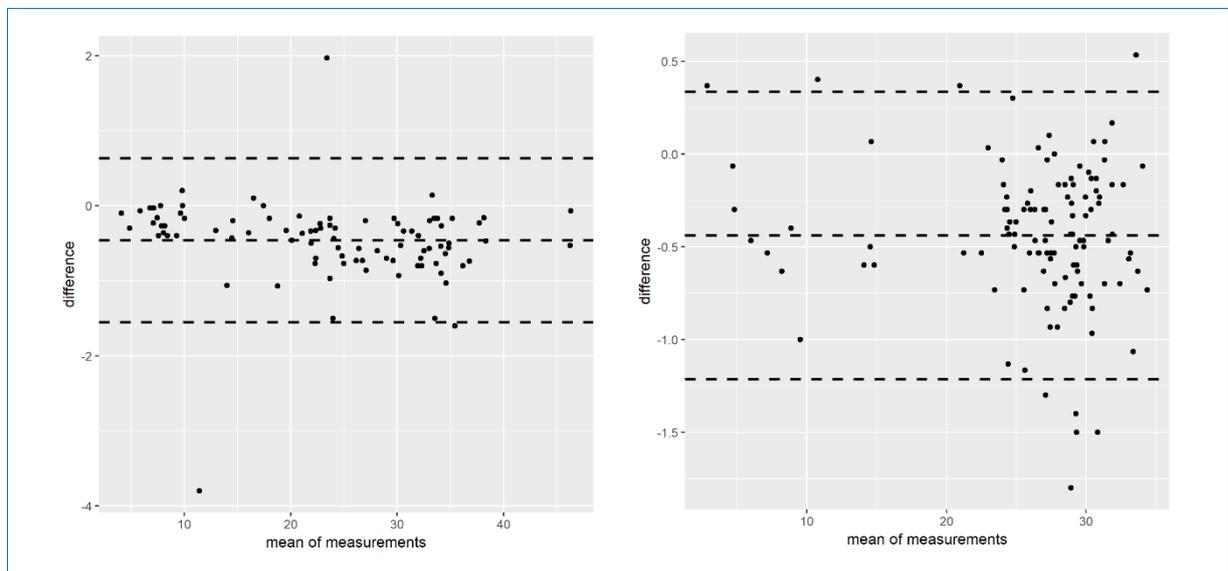


Abbildung 10: Bland-Altman zum Vergleich der Höhenmessung mittels Vertex und Lasermessgerät. Links: Vergleich für Rona I (n=91). Die mittlere Abweichung beträgt -0.46 m bei einer Standardabweichung von -1.55 m bis 0.63 m). Rechts: Vergleich für Rona II (n=117). Die mittlere Abweichung beträgt -0.44 m bei einer Standardabweichung von -1.2 m bis 0.33 m).

Aufgrund der Messungenauigkeiten, welche sich bei terrestrischen Messungen der Baumhöhen unabhängig von der gewählten Methode ergeben (vgl. nachfolgenden Abschnitt), kann somit auch die Messung der Baumhöhe mit einem Lasermessgerät empfohlen werden. Der Vorteil besteht darin, dass die Messungen weniger zeitaufwendig sind.

### Extraktion der Baumhöhen aus Oberflächenmodellen

Mit Hilfe aus digitalen Oberflächenmodellen generierter Vegetationshöhenmodelle auf Basis von LIDAR- oder Drohnendaten ist es möglich, die jeweilig dazugehörigen Höhen detektierter Einzelbäume an einem Punkt auszulesen. Wie verschiedene Studien zeigen, können dadurch die Baumhöhen der stärksten Bäume relativ genau bestimmt werden, gerade für Nadelbäume mit einem meist klar definierten lokalen Maximum der Baumspitze. Ginzler und Hobi (2016) zeigten etwa, dass die aus einem Vegetationshöhenmodell extrahierten Baumhöhen gut mit den terrestrisch gemessenen Baumhöhen korrelieren, wobei die Werte für Nadelbäume bessere Zusammenhänge ergaben. Verschiedene Studien (z.B. Heurich 2006, Martens 2012) konnten in ihren Untersuchungen durchschnittliche Messhöhendifferenzen zwischen terrestrisch eingemessenen und aus Kronenhöhenmodellen generierten Baumhöhen von unter einem Meter feststellen, wobei hinsichtlich Spanne und Standardabweichung relativ grosse Unsicherheiten bestehen. Im Allgemeinen sind die mit Laserscanningdaten erfassten Höhen kleiner als terrestrisch gemessene. Diese Diskrepanz ist laut Hyyppa et al. (2001) und Rössler (2000) auf terrestrische Messungenauigkeiten zurückzuführen, welche zu einer tendenziellen Überschätzung der Baumhöhen führen. Weitere Ungenauigkeiten können durch die Tatsache entstehen, dass die Baumhöhe als lotrecht gemessene Entfernung zwischen Stammfuss und oberstem Kronenpunkt definiert ist und schräg stehende Bäume damit zu Messfehlern führen (Abbildung 11)

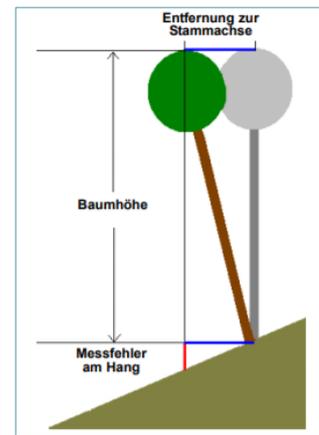


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Messfehlers am Hang durch die Diskrepanz von Stammfussposition und Kronenspitze

Wie aufgezeigt wurde, können durch die Anwendung luftbildgestützter Verfahren und Algorithmen zur Detektion nicht alle Einzelbäume identifiziert werden, weil entweder untere Baumschichten durch das Oberflächenmodell gar nicht abgebildet oder die Detektion von dreidimensionalen LIDAR-Punktewolken nicht praxistauglich angewendet werden kann. Für Marteloskope sollen aber Kenntnisse zur Baumhöhe aller Grössenklassen verfügbar sein, weshalb die terrestrische Messung von Probestämmen und deren Interpolation aufgrund des BHDs für alle Bäume vorzuziehen ist. Der nachfolgende, beispielhafte Vergleich der in Rona I terrestrisch mit einem Vertex gemessenen Baumhöhen mit den aus Drohnendaten mit einer Auflösung von 10 cm generierten normalisierten Oberflächenmodell macht deutlich, dass die Baumhöhen nur für die Bäume der Oberschicht aus luftbildgestützten Verfahren gut mit den terrestrisch gemessenen Höhen korrelieren und zudem die Auflösung der verwendeten Oberflächenmodelle eine wichtige Rolle spielt, da ohne eine allfällige Glättung kleinste Lücken abgebildet werden, welche zu Artefakten führen (vgl. Abbildung 13).

### Beispiel Positionenkarte und Vergleich der Baumhöhen auf dem Marteloskop Rona I

Um automatisierte Vergleiche der Luftbilder mit den terrestrisch eingemessenen Daten zu erlauben, wurden die terrestrisch eingemessenen Baumpositionen in GIS manuell verschoben, um eine möglichst gute Übereinstimmung mit den durch das Vegetationshöhenmodell abgebildeten Baumpositionen und lokaler Maxima zu erhalten.

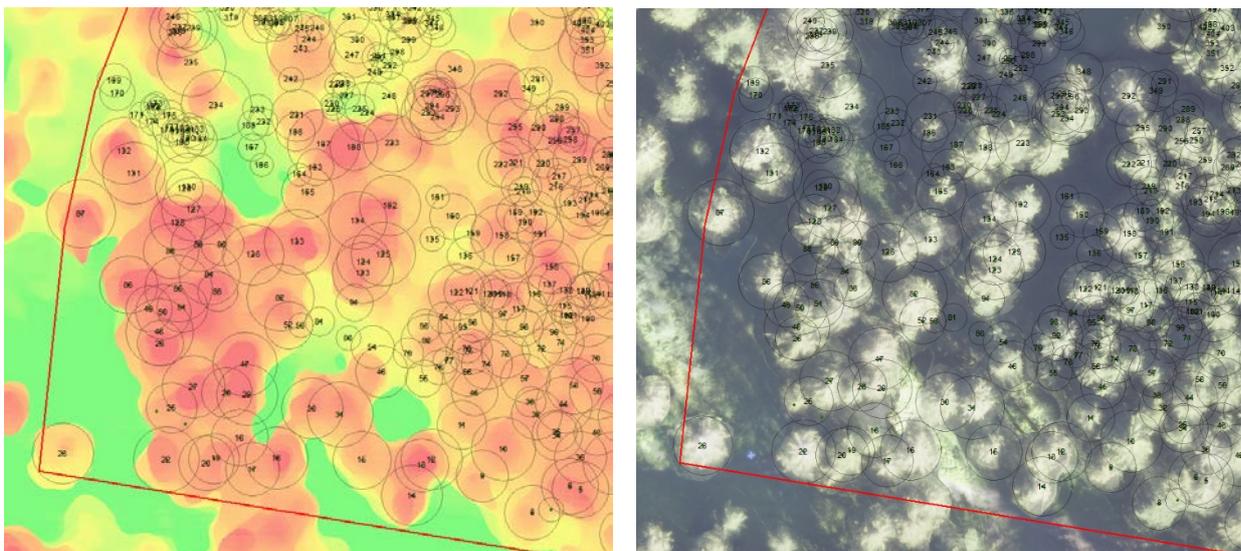


Abbildung 12: Ausschnitt der Baumpositionenkarte des Marteloskops Rona I mit hinterlegtem Vegetationshöhenmodell (links; rote Werte stellen dabei hohe Höhen dar, grüne Werte tiefe Höhen bzw. Boden resp. rechts mit hinterlegtem Orthofoto.

Die Baumhöhen wurden mit einem Vertex im Feld für eine Auswahl an Probestämmen gemessen und anschliessend auf Basis der Beziehung zwischen Höhe und BHD für alle weiteren Einzelbäume gefittet. Das normalisierte Oberflächenmodell wurde aus den Luftbildern der mit der eBee SenseFly Drohne generiert. Die Extraktion der Baumhöhen am jeweiligen Stammfusskoordinatenpunkt erfolgte in ArcGIS automatisch mit der Funktion «extract mutli values to points».

Die Vergleiche zwischen terrestrischen und aus den Drohnen Daten abgeleiteten Baumhöhen wurden sowohl für ein geglättetes wie auch das rohe Vegetationshöhenmodell vorgenommen. Nebst dem Vergleich der Höhen aller Bäume auf der Fläche (n=461) wurden die Abweichungen zusätzlich auch nur für die Bäume der Oberschicht vorgenommen (n=100) (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Vergleich der Baumhöhen aus terrestrischer Messung und von Drohnen Daten abgeleiteten Höhen.

	Anzahl Bäume	Mittlere Baumhöhe	Mittlere Abweichung	Lower Limit	Upper Limit
Terrestrisch (Vertex)	461	22.93 m			
	100	35.36 m			
ungeglättetes nDSM, eBee	461	23.77 m	- 0.84 m	-16.82 m	15.14 m
	100	29.5 m	- 5.86 m	- 7.71 m	19.42 m
geglättetes nDSM, eBee	461	25.51 m	2.58 m	-17.86 m	12.71 m
	100	31.77 m	3.60 m	-5.37 m	12.57 m

Die Resultate verdeutlichen zwei Probleme, die sich aus dem Ableiten der Baumhöhen aus Vegetationshöhenmodellen ergeben und damit für die Herleitung der Höhen aller Bäume auf einem Marteloskop weniger gut geeignet sind als die terrestrische Messung mit einem Vertex:

- 1) Durch das rohe, ungeglättete Vegetationshöhenmodell entstehen durch die Drohnenbilder Artefakte in der Abbildung der Vegetationshöhen. Kleinste Lücken werden dargestellt, obwohl sich dort gemäss Kronenprojektion ein Baum befindet. Dies kann einerseits auf falsche Werte aufgrund des Schattenwurfs, andererseits auf eine (zu) hohe Auflösung der Rastergrösse zurückzuführen sein. Wird nun automatisch an jenem Punkt die Höhe ausgelesen, ergeben sich grosse Abweichungen, da mittels luftbildgestütztem Verfahren nicht die Baumhöhe, sondern die Lücke abgebildet wird (vgl. Abbildung 13). Dieser Tatsache kann durch die Glättung von Oberflächenmodellen Rechnung getragen werden.
- 2) Mit dem Oberflächenmodell können nur die Oberhöhen des Kronenmodells abgebildet werden. In unteren Baumschichten liegende Bäume können nicht detektiert bzw. deren Höhen ausgelesen werden, womit Bäume der unteren Schichten mit dem vorliegenden Ansatz systematisch überschätzt werden (siehe Abbildung 14).

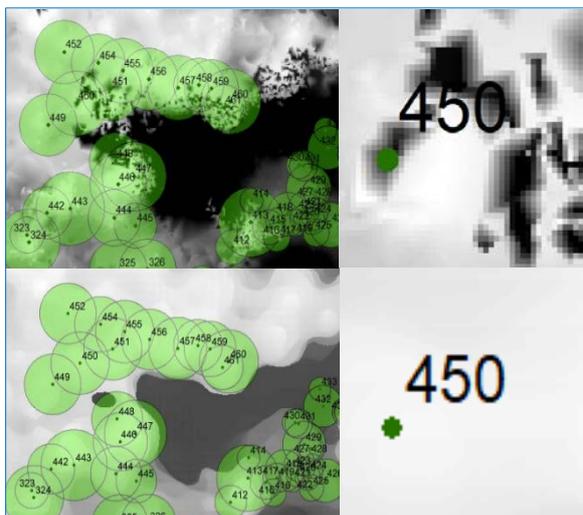


Abbildung 13: Beispielhafte Darstellung eines zu hoch aufgelösten Rasters, welcher am Koordinatenfusspunkt des Baumes Nr. 450 einen niedrigen Baumhöhenwert extrahiert, da an jenem Punkt eine kleinräumige Lücke abgebildet wird (oben). Durch Glätten des Oberflächenmodells können solche Artefakte gelöst werden (unten).

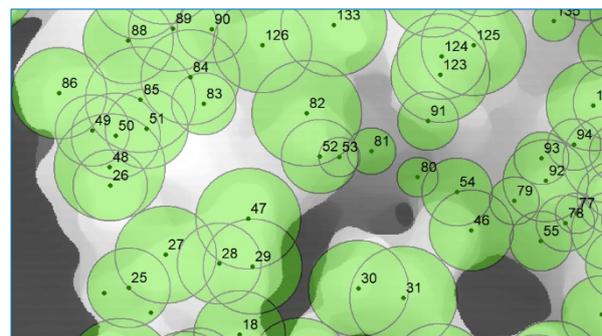


Abbildung 14: Das Vegetationshöhenmodell bildet lediglich die Oberhöhen ab, Bäume unterer Schichten können nicht detektiert werden. Baum Nr. 53 in der Bildmitte liegt beispielsweise unterhalb Baum Nr. 52. Ihm wird aufgrund seiner Position mittels luftbildgestützter Verfahren ein zu hoher Wert zugeteilt: Seine effektive Baumhöhe liegt bei rund 8 m, auf Basis des VHM würde ein Wert von 23.3 m erreicht.

## Modul 5: Beschreibung Standort und Boden

Die Beschreibung von Standort und Boden dient lediglich zum Erkenntnisgewinn bezüglich lokaler Gegebenheiten und limitierenden Faktoren. Auf eine Methodenbeschreibung bzw. Prüfung von alternativen Erhebungsmöglichkeiten wurde deshalb verzichtet.

## Modul 6: Naturgefahr und Herleitung des Handlungsbedarfs nach NaiS

Für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit eines Waldes aufgrund der Naturgefahr empfehlen wir gemäss Konzept und Handbuch die Kartierung und grafische Darstellung von hohen Stöcken und liegendem Holz sowie des Deckungsgrades. Die Auswertung der entsprechenden Eigenschaften nach einem Eingriff soll rein visuell erfolgen. Veränderungen des Deckungsgrades sowie der Lückengrösse könnten alternativ auch räumlich dargestellt, modelliert und ausgewertet werden. Da deren Umsetzung zwar mit verschiedenen Computerprogrammen (z.B. GIS, Matlab usw.) möglich wäre, eine Umsetzung mit der Marteloskop-Software aber nicht möglich ist, wurden entsprechende Methodentests nicht weiterverfolgt. Mögliche Ansätze zur räumlich basierten Lokalisierung und Auswertung kritischer Lückengrössen auf Basis von Eigenschaften des Gelände- und Vegetationshöhenmodells wurden etwa von Breschan und Gabriel (2016) für Lawinen oder von Rosselli (2017) bezüglich der Anforderungen für Lawinen, Steinschlag sowie Rutschung/Erosion entwickelt.

## Modul 7a: Verjüngungsgünstige bzw. -feindliche Kleinstandorte

### Empfohlene Methode

Für die Darstellung verjüngungsgünstiger bzw. -feindlicher Kleinstandorte empfehlen wir im Handbuch eine pragmatische Kartierung aller relevanten Keimbettstrukturen und Kleinstandorte, abhängig von den auf dem jeweiligen Standort vorherrschenden limitierenden Faktoren. Damit wird es mit vertretbarem Erhebungsaufwand möglich, diese grafisch darzustellen und auszuwerten.

### Geprüfte Alternativen

#### Detaillierte Kartierung vorhandener Keimbettstrukturen

Alternativ kann bei Bedarf eine detailliertere Kartierung – beispielsweise mit einer exakten Aufnahme aller Strukturen inklusive der zugehörigen Eigenschaften (z.B. Aufnahme des Totholzes mit genauer Einmessung der Position, Bestimmung des Zersetzungsgrads, der Baumart usw.) – vorgenommen werden. Auf einen detaillierteren Systemvorschlag zu dessen Erhebung wird hier verzichtet, da wir die Verhältnismässigkeit zwischen Genauigkeit der Daten und Aussagemöglichkeiten auf Basis der grafischen Auswertemöglichkeiten als nicht gegeben erachten.

#### Aufnahme des Deckungsgrads der Bodenvegetation auf der gesamten Marteloskopfläche

Geprüft wurde, inwiefern sich die Darstellung des Deckungsgrads der Bodenvegetation über die gesamte Marteloskopfläche eignen würde. Die Idee wäre, den Bedeckungsgrad der Vegetation mit Hilfe eines Plans manuell im Feld zu kartieren, wobei gemäss Vorschlag von Rosselli (2017) diese in vier Klassen eingeteilt würde:

Klasse	DG Bodenvegetation
1	0-10%
2	10-50%
3	50-90%
4	90-100%

Eine entsprechende Darstellung liefert allerdings lediglich Aussagen zur aktuellen Ausprägung der Bodenvegetation, welche sich aber beispielsweise bei anderen Lichtbedingungen ändern kann. Ein aktuell tiefer Grad an Bodenvegetation muss nicht zwingend bedeuten, dass Vegetationskonkurrenz auf Flächen mit aktuell niedrigem Deckungsgrad keine Rolle spielt. Die Aussagen, die sich mit einer solchen Darstellung ableiten lassen, sind somit beschränkt und können auch aufgrund der Kenntnis zu den allgemein auf der jeweiligen Fläche vorhandenen Standortbedingungen diskutiert werden. Abbildung 15 verdeutlicht diese Tatsache für die Marteloskopfläche Rona I (Standort 60: Hochstauden-Fichtenwald).

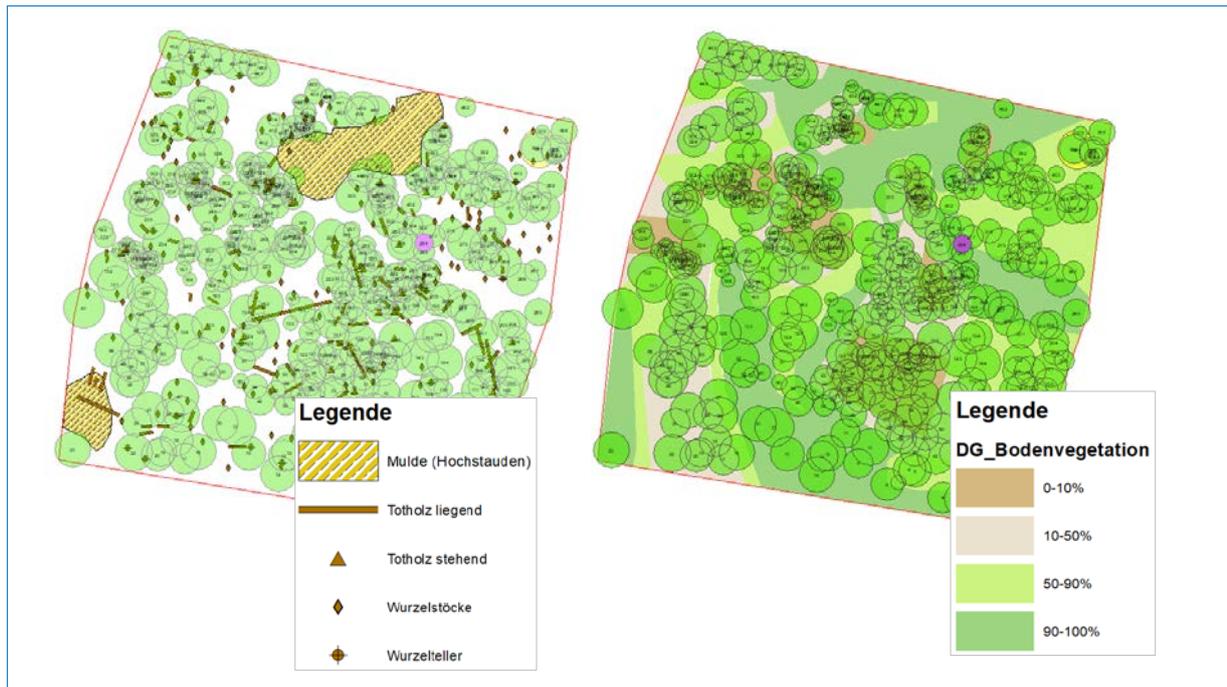


Abbildung 15: Links: Vorgeschlagene Kartierung verjüngungsgünstiger Keimbettstrukturen sowie Mulden in Rona I (Hochstauden-Fichtenwald). Rechts: Darstellung des Deckungsgrads der Bodenvegetation über die gesamte Fläche. Der Deckungsgrad der Bodenvegetation ist generell dort hoch, wo viel Licht auf den Boden kommt. Die Beurteilung verjüngungsgünstiger bzw. -feindlicher Kleinstandorte ist mit dem Deckungsgrad der Bodenvegetation aber nicht möglich, da dieser generell auf einem Hochstauden-Fichtenwald bei entsprechenden Lichtbedingungen hoch ist.

## Modul 7b: Vorhandene Verjüngung

Die von uns vorgeschlagene Methode erlaubt eine einfache Erhebung von An- und Aufwuchs mit vertretbarem Zeitaufwand, da die Zählung lediglich in Klassen erfolgt und beschreibende Informationen relativ grob erhoben werden. Falls gewünscht, ist es aber durchaus möglich, die einzelnen Pflanzen exakt auszuzählen und genauere Informationen zu Wildschäden, Höhenwachstum oder weiteren Faktoren zu erheben.

## Modul 7c: Licht- bzw. Wärmeverfügbarkeit / Öffnungsgrösse

### Empfohlene Methode und Fazit

Aufgrund der Beobachtung der vorhandenen Verjüngungsansätze (Modul 7b) kann für den jeweiligen Standort abgeleitet werden, welche ungefähre Öffnungsgrösse genügt, damit sich der Anwuchs etablieren und aufkommen kann. Die spezifische Sonnenscheindauer bzw. Öffnungsgrösse für die Verjüngung ist massgebend vom jeweiligen Standort, der Exposition sowie den spezifischen Baumartenansprüchen abhängig. Allerdings sind diese Lichtansprüche nur unzureichend untersucht und beschränken sich auf allgemeine Richtwerte, welche in NaiS (Frehner et al. 2005) beschrieben sind; so wird beispielsweise für die Ansamung der Fichte eine Mindestsonnenscheindauer von 2 h im Juni angegeben. Durch die Beobachtung auf dem Marteloskop wird es möglich, für den Standort abzuleiten, wie gross die Öffnungsgrösse ungefähr sein muss, damit Verjüngung aufkommt. Da diese eine relativ kleine Fläche mit einigermaßen homogenen Bedingungen hinsichtlich Höhe, Exposition und Standort umfassen, kann davon ausgegangen werden, dass die Strahlungsbedingungen für das ganze Marteloskop gelten. Dieser rein qualitative Ansatz auf Basis einer visuellen Beurteilung der Kronenprojektion und der vorhandenen Verjüngung stellt somit einen simplen Ansatz zur Beurteilung der notwendigen Licht- bzw. Wärmeeinstrahlung dar. Deren Modellierung auf Basis von Oberflächenmodellen und LIDAR-Daten zur Abbildung der auf dem Waldboden eintreffenden Strahlung und bessere Kenntnisse zu den Ansprüchen der Baumarten je nach Standort, Höhenstufe und Exposition würden aber die Grundlage für eine objektive und fundierte Analyse zur notwendigen Öffnungsgrösse liefern. Eine erste Prüfung vorhandener Möglichkeiten zeigt, dass für die Anwendung solcher Modelle aber Grundlagen fehlen bzw. eine Weiterentwicklung bestehender Modelle nötig wäre, um diese künftig praxistauglich für Marteloskopübungen anwenden zu können.

## Mögliche Alternativen

### Modellierung der Licht- bzw. Wärmeverfügbarkeit

Idealerweise sollte die Licht- bzw. Wärmeverfügbarkeit auf dem Waldboden vor bzw. nach einem Eingriff modelliert werden können, um Aussagen zur notwendigen Öffnungsgrösse für die Verjüngung machen zu können. Die Bestimmung der Lichtverhältnisse auf dem Waldboden ist seit längerem im Interesse der Forschung. So wurden in den 90er Jahren erste räumlich basierte Besonnungsmodelle entwickelt, um die Bestrahlung auf Basis von Neigung und Exposition, Sonnenwinkel und topografischer Beschattung zu berechnen (Hetrick et al. 1993, Dubayah und Rich 1995). Mit dem ArcGIS Tool Solar Analyst kann auf Basis der Methoden des hemisphärischen Viewshed-Algorithmus anhand eines digitalen Oberflächenmodells die globale Strahlung als Totalmenge von direkter und diffuser Strahlung berechnet werden. Die eintreffende Sonnenstrahlung kann für spezifische Punkte bzw. ganze Flächen ausgegeben werden, wobei die Ausgabe der Sonnenscheinenergie ( $\text{WH}/\text{m}^2$ ) oder Sonnenscheindauer (h) erfolgt. Um zu prüfen, ob die Idee der Simulation der Sonneneinstrahlung vor bzw. nach einem Eingriff (vgl. Abbildung 16) so auch für kleine Flächen auf Gebirgswaldmarteloscopen umsetzbar ist, wurden Vergleiche von tatsächlich gemessener Sonnenscheindauer mittels Fischaugenfotos und mit GIS modellierter Sonnenscheindauer vorgenommen.

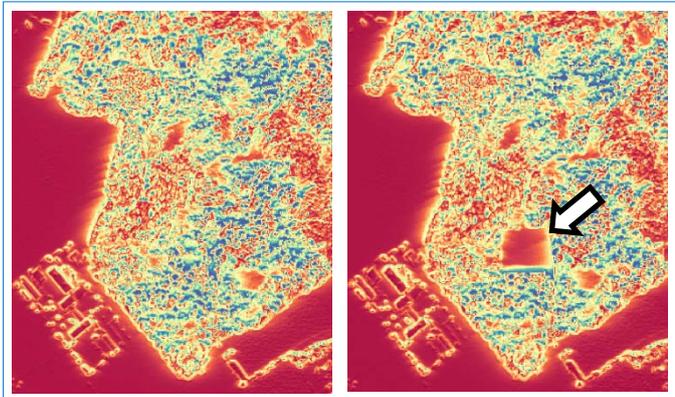


Abbildung 16: Idee zur Simulation der Sonneneinstrahlung: Berechnung mit Hilfe des ArcGIS Tools „Area Solar Radiation“ für einen schematischen Eingriff. Links: Sonneneinstrahlung vor dem Eingriff. Rechts: Sonneneinstrahlung in der neu entstandenen Lücke (Pfeil) nach dem Eingriff. Rote Rasterzellen stellen dabei hohe Sonneneinstrahlungen dar, blaue Zellen tiefe Energien.

In einer ersten Analyse verglich Herzog (2016) in einer Semesterarbeit die mit der Software HemiView aus terrestrisch aufgenommenen Fischaugenfotos berechnete Sonneneinstrahlung mit in GIS modellierten Werten für eine Untersuchungsfläche im Kanton Luzern, für welche sowohl ein hochaufgelöstes Oberflächenmodell auf Basis von LIDAR-Daten, sowie ein mittels Drohnenflug generiertes DOM vorlagen. Die effektiv gemessene und die modellierte Sonneneinstrahlung unterschieden sich allerdings stark voneinander – nicht nur zwischen gemessenen und modellierten Werten, sondern auch je nach Auflösung des verwendeten Oberflächenmodells.

Da die Sonneneinstrahlung mit dem Solar Analyst in GIS rein auf Basis des Oberflächenmodells modelliert wird, liegen die untersuchten Punkte auf der Oberfläche des Vegetationshöhenmodells. Wenn jenes zu wenig gut aufgelöst ist, um kleinste Lücken im Bestand abzubilden, wird die Sonneneinstrahlung auf dem Kronendach berechnet (Abbildung 17). Dass dort keine Korrelation besteht, wo der Vergleich fälschlicherweise zwischen terrestrisch aufgenommener Sonneneinstrahlung auf dem Waldboden und der in GIS modellierten Einstrahlung - welche aufgrund der unzureichenden Auflösung auf dem Kronendach zu liegen kommt - vorgenommen wird, ist naheliegend. Eine Untersuchung lediglich jener Punkte, welche den Standort der Sonneneinstrahlung auf dem Waldboden und nicht fälschlicherweise auf dem Kronendach des Oberflächenmodells abbilden, wurde nicht vorgenommen. Deshalb wurden weitere Analysen auf den Marteloscopen in Rona vorgenommen werden.

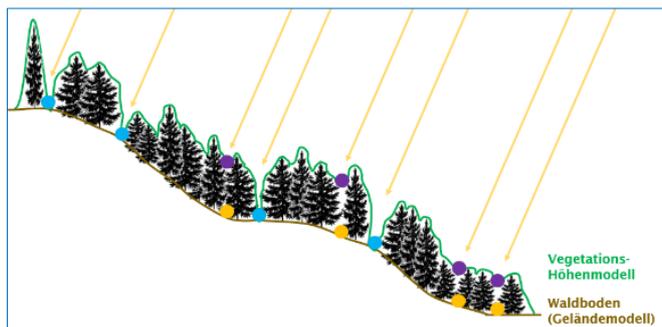


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Solar Analyst für bestimmte Punkte. Wo das Vegetationshöhenmodell zu wenig gut aufgelöst ist um Lücken abzubilden, wird die Sonneneinstrahlung auf dem Kronendach berechnet (violette Punkte) anstatt auf dem Waldboden (orange Punkte). Das Tool ist somit nur dort anwendbar, wo das VHM Lücken tatsächlich abbilden kann (blaue Punkte).

Im Herbst 2016 wurden auf den Marteloskopon Rona I und Rona II jeweils verteilt über die gesamte Fläche je 36 Fischaugenfotos aufgenommen, wobei jeweils die Hälfte Verjüngung aufwies und die andere Hälfte nicht (Stellen ohne Verjüngung aufgrund vermutetem Lichtmangel). Die Standorte der Aufnahmen wurden mittels Azimut und Horizontalabstand eingemessen und digitalisiert (vergleiche Abbildung 18). Mit der Software HemiView wurden die Strahlungswerte (in  $WH/m^2$ ) und Sonnenscheindauer an jedem Punkt berechnet und mit der in GIS modellierten „Point Solar Radiation“ verglichen.

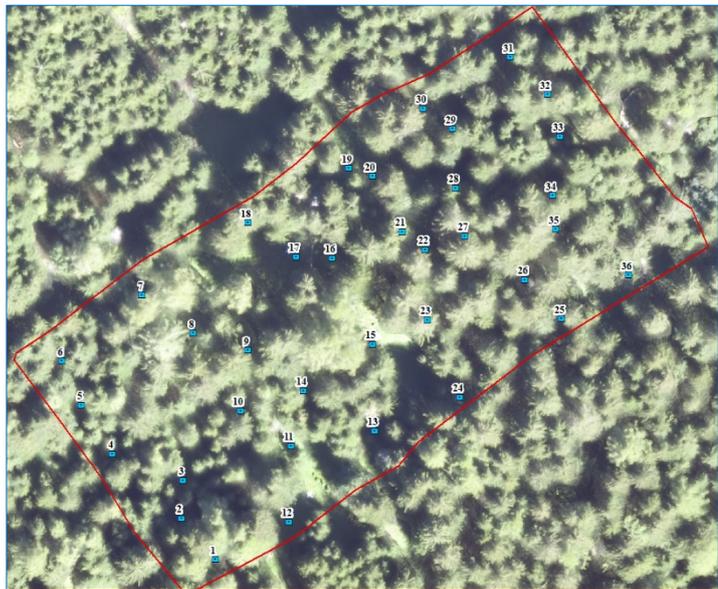


Abbildung 18: Darstellung der 36 Fotostandorte auf dem Marteloskop Rona II. Die Fotostandorte wurden über die gesamte Fläche verteilt.

Die Datenaufbereitung in GIS machte klar, dass aufgrund der Qualität Oberflächenmodelle die Modellierung mit dem Solar Analyst nur beschränkt möglich ist, da diese in unterschiedlicher Qualität und Auflösung vorliegen. Das aus Drohnenaufnahmen generierte VHM ist mit einer Rasterauflösung von 10 cm aufbereitet, kann aber aufgrund von Schattenwurf Artefakte enthalten, welche zu fehlerhaften bzw. interpolierten, kleinen Lücken führt. Das auf Basis der Swisstopo LIDAR-Daten erstellte VHM ist mit einer Rasterauflösung von 2 m verfügbar und deshalb weniger gut aufgelöst. Dies führt dazu, dass gewisse Fotostandorte auf unterschiedlichen Höhen zu liegen kommen, was die Auswertung massgeblich beeinflusst (vergleiche Abbildung 19).

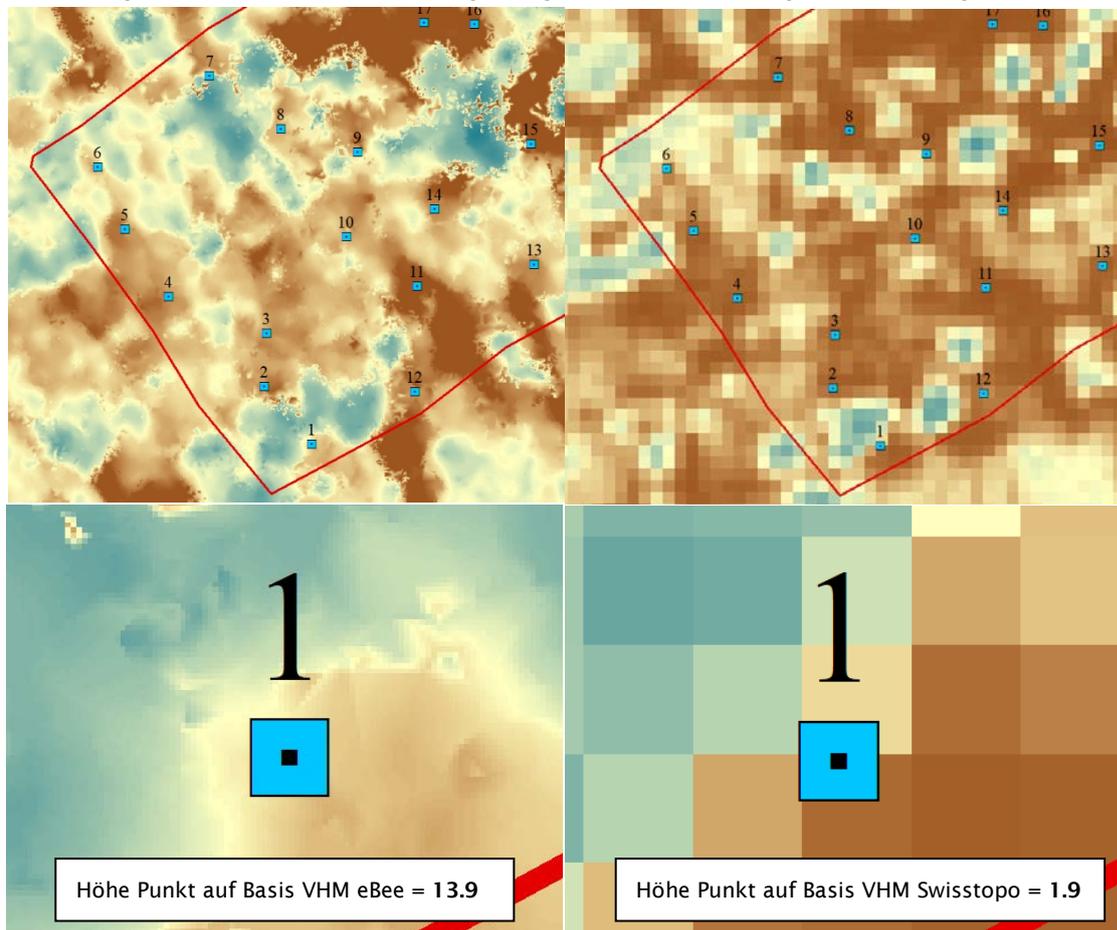


Abbildung 19: Fotostandorte mit hinterlegtem Vegetationshöhenmodell auf Basis der Drohnendaten (links) sowie der Swisstopo-LIDAR-Daten (rechts) auf der Fläche Rona II.

Deshalb wurden zur Analyse der Sonneneinstrahlung in ArcGIS nur jene Fotopunkte miteinbezogen, welche gemäss des normalisierten Oberflächenmodells annähernd auf dem Waldboden zu liegen kommen und deshalb einen Vergleich zwischen terrestrisch erhobener und modellierter Strahlung zulassen. Als Grenzwert wurden dazu all jene Fotostandorte ausgewählt, welche im entsprechenden VHM auf einer Vegetationshöhe von maximal 6 m zu liegen kommen und damit Lücken zumindest annähernd abbilden konnten. Damit waren auf Basis des Swisstopo-Oberflächenmodells noch 23 Fotopunkte auswertbar, auf Basis der Drohnen Daten hingegen lediglich 8.

Der Vergleich der gemessenen mit den modellierten Sonnenstunden – sowohl auf Basis des Oberflächenmodells der Drohnen wie auch der Swisstopo-LIDAR-Daten - für Rona II lassen keinen Zusammenhang zwischen tatsächlich gemessener und modellierter Werte erkennen (Abbildung 20). Auch Vergleiche zur Sonneneinstrahlung in Wh/m<sup>2</sup> oder mit anderen Parametern innerhalb des Solar Analyst Tools führten nicht zu den erwarteten Korrelationen (nicht dargestellt).

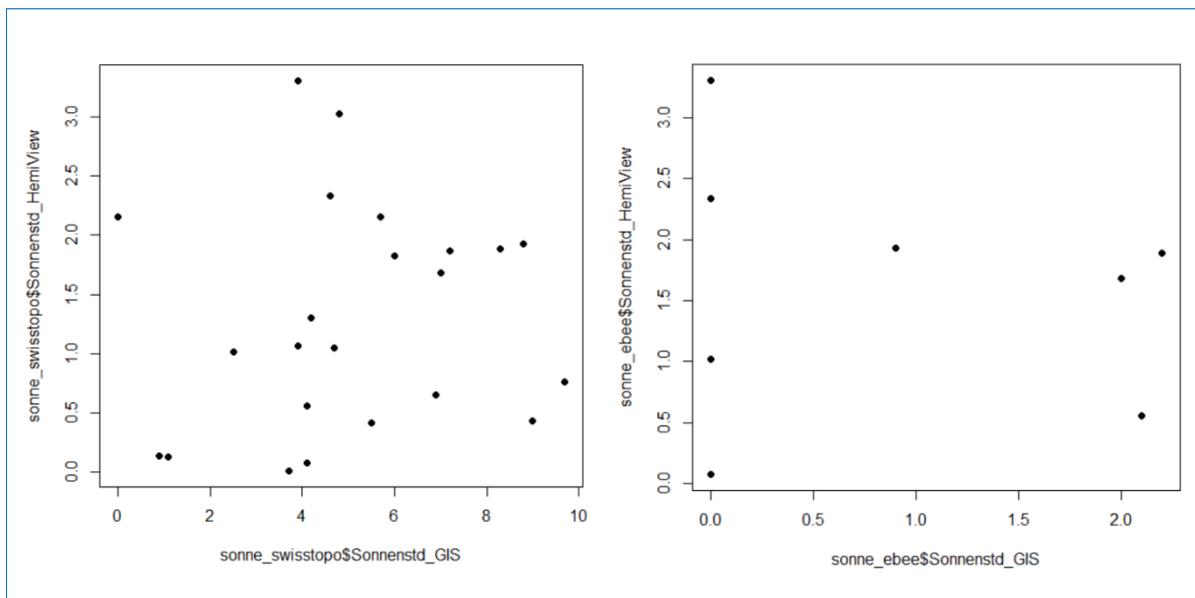


Abbildung 20: Vergleich im Feld gemessener und in GIS modellierter Werte der Sonnenstunden. Links: modelliert auf Basis der Swisstopo-LIDAR-Daten. Rechts: modelliert auf Basis der Drohnen-Daten.

Auch Rosselli (2017) verglich auf fünfzig weiteren Punkten in Rona I die in GIS modellierten Werte mit Daten von Fischaugenfotos, welche im Rahmen einer Semesterarbeit 2013 aufgenommen wurden (Scherrer 2013). Rosselli hatte zusätzlich das Oberflächenmodell so aufbereitet, dass die Kronenmaske auf den jeweiligen Fotostandorten auf Höhe des Waldbodens zu liegen kommen und somit die Lücken besser abbilden. Trotzdem zeigten die statistischen Analysen seiner Vergleiche ebenfalls keine Korrelation zwischen modellierter und gemessener Sonneneinstrahlung.

Die Resultate der Test zeigen, dass diese relativ einfache Modellierung mit Hilfe des Solar Radiation Tools in GIS so nicht geeignet ist, um die Sonneneinstrahlung zumindest für kleine Öffnungen abzubilden. Es bleibt unklar, zu welchen Teilen die Auflösung der verwendeten Oberflächenmodelle, die Messungenauigkeit in der Positionierung der untersuchten Punkte sowie die Verwendung der so genannten „default values“ (Einstellungen verschiedener Parameter im GIS Tool für die Atmosphärenstrahlung) die Resultate beeinflussen. Unabhängig davon berücksichtigt die Modellierung mit dem Solar Analyst in ArcGIS nur die orografische Schattierung und kann somit die Lichtdurchlässigkeit der Baumkronen nicht abbilden.

Es existieren neuere Ansätze, welche die Durchlässigkeit des Kronendachs auflösen und damit die Lichtverfügbarkeit für die Verjüngung besser annähern sollen (Parker et al. 2001, Todd et al. 2003, Lee et al. 2009). Dabei werden allerdings Informationen zur dreidimensionalen Struktur des Waldes benötigt, welche nicht aus Oberflächenmodellen, sondern aus dreidimensionalen Punktedatenwolken generiert werden müssen. Damit wird es beispielsweise möglich, das GIS-basierte Sonnenmodell auf Basis der Topografie mit einem LIDAR-basierten Index zu verknüpfen, damit auch die vegetative Beschattung abgebildet und damit die Lichtverfügbarkeit unterhalb des Kronendachs berechnet werden kann. Bode et al. (2014) entwickelten dazu ein so genanntes Subcanopy Solar Radiation Model, welches die Lichtbedingungen unterhalb des Kronendachs abbilden kann, indem auf Basis der LIDAR-basierten Punktedaten die Wahrscheinlichkeit modelliert wird, dass ein Lichtstrahl auf den Waldboden trifft (Light Penetration Index). Mit einem anderen Ansatz gelang es Moeser et al. (2014), auf Basis von LIDAR-Daten

synthetische Hemisphärenphotos zu generieren, mit welchen unter anderem der Strahlungstransfer durch das Kronendach automatisiert modelliert werden kann.

Diese Ansätze zur Modellierung der effektiv auf den Waldboden eintreffenden Strahlung bergen ein vielversprechendes Potenzial, um künftig fundierte Aussagen bei der Simulation von Eingriffen in Gebirgswaldmarteloscopen machen zu können. Diese sind heute aber noch sehr kosten- und zeitintensiv und bedürfen weiterer Forschungs- bzw. Weiterentwicklungsarbeit, damit diese künftig in einem praxistauglich anwendbaren und automatisierten Tool verwendet werden können.

## Modul 8a: Einzelbaumstabilität

Da sich in der Praxis kein einheitliches System zur Aufnahme und Bewertung der Einzelbaumstabilität durchgesetzt hat und der Einfluss einzelner Stabilitätsmerkmale auf die Gesamtstabilität eines Einzelbaumes bzw. seine Interaktion im Bestandesgefüge nur unzureichend untersucht sind, schlagen wir die qualitative Beurteilung der Stabilität gemäss eigenem Konzept (vgl. Dokument **Konzept Marteloskope im Gebirgswald**) vor. Alternative Erhebungsmethoden werden deshalb nicht erläutert. Stattdessen soll im nachfolgenden Abschnitt aufgezeigt werden, dass die gutachterliche Schätzung der Einzelbaumstabilität trotz des pragmatischen Ansatzes ohne genauem Messsystem eine plausible Annäherung darstellt.

### Vergleich der gutachterlichen Schätzung der Einzelstabilität

#### Vergleich der berechneten und geschätzten h/d-Werte

Auf den Marteloskopen in Rona und Renan wurde der Schlankheitsgrad der Einzelbäume einerseits gutachterlich geschätzt, andererseits für eine Auswahl von Probebäumen auf Basis der gemessenen Baumhöhen und BHD berechnet. Ein Vergleich der geschätzten mit den berechneten Werten in Rona zeigt, dass Schätzung und gemessene Werte zu einem hohen Grad übereinstimmen (99% Übereinstimmung in Rona I bzw. 96% Übereinstimmung in Rona II, vergleiche Abbildungen 21)

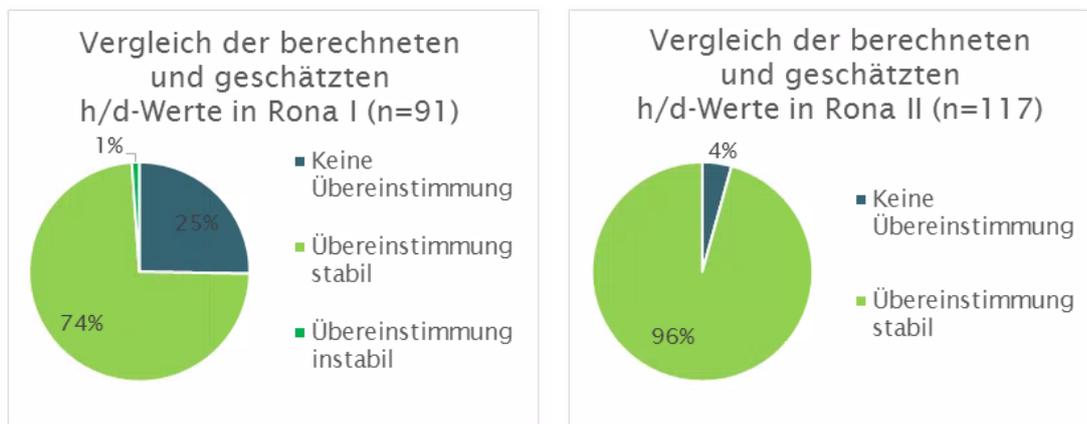


Abbildung 21: Vergleich der berechneten und geschätzten h/d-Werte auf den Marteloskopen Rona I und Rona II

Die nähere Betrachtung derjenigen Bäume, welche keine Übereinstimmung aufwiesen, zeigte, dass auch ein Grossteil jener Bäume, welche nicht korrekt eingeschätzt wurden, noch einen h/d-Wert < 90 aufwiesen und sich zudem viele dieser Bäume in tiefen Durchmesserklassen (< 30 cm BHD) befanden.

Entsprechende Auswertungen für das Marteloskop in Renan zeigten eine Übereinstimmung in rund 91% (vgl. Abbildung 22). Die höhere Diskrepanz zwischen geschätzten und gemessenen Werten kann auf den hohen Laubholzanteil zurückzuführen sein, der die gutachterliche Einschätzung erschwert. Von den 15 Bäumen, welche keine Übereinstimmung aufwiesen, verfügte ein Drittel aber immer noch über einen Schlankheitsgrad von > 90; vier weitere Bäume wurden gut eingeschätzt, obwohl die gemessenen Werte ein schlechtes h/d-Verhältnis aufwiesen. Hierbei handelte es sich aber um Bäume mit einem BHD kleiner als 30 cm, womit die fehlende Übereinstimmung wiederum relativiert werden kann. Schlussendlich sind es also 6 von 168 Bäumen mit einer nicht erklärbaren Falscheinschätzung.

Insgesamt zeigen die Resultate, dass mit einer gutachterlichen Einschätzung des Schlankheitsgrads eine gute Annäherung an die tatsächlich gemessenen Werte erreicht wird und somit die vorgeschlagene gutachterliche Beurteilung – ggf. in Kombination mit berechneten Werten der Probebäume – als pragmatische Erhebungsmethode gerechtfertigt ist.

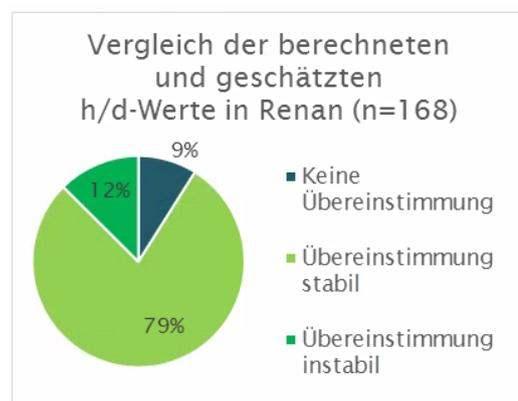


Abbildung 22: Vergleich der berechneten und geschätzten h/d-Werte in Renan.

## Modul 8 b: Kollektivstabilität

### Empfohlene Methode und Fazit

Für die Beurteilung der Kollektivstabilität empfehlen wir die gutachterliche Aufnahme der Zugehörigkeit von Bäumen zu Kollektiven bzw. Rotten sowie das Einzeichnen innerer Waldränder, durch welche es möglich wird, diese Strukturen grafisch darzustellen. Eine automatisierte Abbildung der Bäume hinsichtlich ihrer vertikalen und horizontalen Struktur und die Modellierung hinsichtlich Kollektivstabilität vor bzw. nach einem Eingriff wäre zwar wünschenswert, bedarf allerdings weiterer Forschungsarbeit, da entsprechende Grundlagen noch weitgehend fehlen.

### Mögliche Alternativen

Rosselli (2017) entwickelte für das Marteloskop Rona I einen möglichen Ansatz zur Modellierung von Baumkollektiven auf Basis von terrestrisch erhobenen und aus LIDAR-Verfahren gewonnenen Daten der Kronen. Dabei modellierte er die Intersektion potentieller Kronenbasalflächen, welche die Bäume bilden würden, wenn sie freistehend und störungsfrei gewachsen wären. Auf Basis der Intersektionsfläche dieser potentiellen Kronenbasalflächen und in Abhängigkeit der Baumhöhe leitete er gerichtete Abhängigkeitsverhältnisse ab, welche aufzeigen, ob und zu welchem Kollektiv ein bestimmter Baum gehört. Zusätzlich wurde die horizontale Waldstruktur miteinbezogen, indem zwischen Bäumen, welche sich am Rand von Kollektiven befinden und solchen, die im Kern von Kollektiven wachsen, unterschieden wurde. Mit diesem Ansatz kann bei einem simulierten Eingriff modelliert werden, ob durch das Brechen von den von ihm definierten Baum-zu-Baum-Abhängigkeitsverhältnissen Störungen entstehen und damit Kollektive destabilisiert werden und wie sich die Kronenlänge neu freigelegter Lückenränder gestaltet. Die Bewertung erfolgt dabei aus dem Verhältnis zwischen kritischen und positiven Bestandesstrukturen vor bzw. nach einem Eingriff. Inwiefern sich die vorgeschlagene Methodik auch auf andere Waldbestände übertragen lässt und wie gut diese die Realität abbilden kann, müsste in weiteren Arbeiten untersucht werden. Die Aufarbeitung entsprechender Grundlagen und die Weiterentwicklung und Validierung entsprechender Modelle wären aber sicher ein wichtiger Schritt, um die Interaktionen auf Ebene des Bestandesgefüges im Gebirgswald besser verstehen und damit modellieren zu können.

## Literatur

- Bayer S. Miri M., Bucher T., 2013: Automatisierte Einzelbaumerfassung auf Basis von hochaufgelösten TrueOrtho-Mosaiken und photogrammetrisch abgeleiteten Oberflächenmodellen. In: Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, Freiburg, 26-35.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mohan F., Nugent C., 2007: Tree Detection and Diameter Estimations by Analysis of Forest Terrestrial Laserscanner Point Clouds. ISPRS Workshop on Laser Scanning (XXXVI, 3), 50-55.
- Bode C., Limm M., Power M. and Finlay J., 2014: Subcanopy Solar Radiation model : Predicting solar radiation across a heavily vegetated landscape using LiDAR and GIS solar radiation models. Remote Sensing of Environment, Vol 154, p. 387-397.
- Breschan J. und Gabriel A., 2016: Einsatz von Vegetationshöhenmodellen zur Lokalisierung kritischer Lücken für Waldlawinen. Präsentation im Rahmen des Monagskolloquium vom 18. Januar 2016, Eidg. Technische Hochschule ETH, Zürich.
- Condrau C., 2017: Drohnen im Forst – Einsatz von Drohnen zur Planung der Holzernte im Seilkrangelände. Bachelorarbeit, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Zollikofen, 161 S.
- Curtin D.J., 1964: Development of Advanced Interconnectors for Solar Cells. Comsat Technical Review, Vol. 4, No. 1, p. 53-68.
- Dorren 2014 Dorren L., 2014: FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ, 03.09.2014, abgerufen am 11.12.2017, [http://www.ecorisq.org/docs/FINT\\_manual\\_EN.pdf](http://www.ecorisq.org/docs/FINT_manual_EN.pdf)
- Dubayah R. and Rich P.M., 1995: Topographic solar radiation models for GIS, International Journal of Geographical Information Systems:4, 405-419, DOI: 10.1080/02693799508902046.
- Eysn L., Hollaus M., Lindberg E., Berger F., Monnet J.-M., Dalponte M., Kobal M., Pellegrini M., Lingua M., Mongus D., Pfeifer N., 2015: A Benchmark of Lidar-Based Single Tree Detection Methods Using Heterogeneous Forest Data from the Alpine Space. Forests, 6, 1721-1747.
- Fleck S., Mölder I., Jacob M., Gebauer T., Jungkunst H.F., Leuschner C., 2011: Comparison of conventional eight-point crown projections with LIDAR-based virtual crown projections in a temperate old-growth forest. Annals of Forest Science (2011) 68: 1173-1185.
- Frehner M., Wasser B., Schwitler R., 2005: Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 564 S.
- Ginzler C. und Hobi, M., 2016: Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen: May/June 2016, Vol. 167, No. 3, pp. 128-135.
- Grote R., 2003: Estimation of crown radii and crown projection area from stem size and tree position. Annals of Forest Science, Springer Verlag (Germany), 2003, 60(5), p.393-402.
- Hackenberg J., Morhart C., Sheppard J., Spiecker H. and Disney M., 2014: Highly accurate tree models derived from terrestrial laser scan data: a method description. Forests 2014, 5(5), 1069-1105.
- Heurich M., 2006: Evaluierung und Entwicklung von Methoden zur automatisierten Erfassung von Waldstrukturen aus Daten flugzeuggetragener Fernerkundungssensoren. Technische Universität München. Department für Ökosystem- und Landschaftsmanagement. Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung. PhD thesis, 381 S.
- Hetrick W.A., P.M. Rich and S.B. Weiss, 1993: Modeling insolation on complex surfaces. Thirteenth Annual ESRI User Conference, Volume 2. pp 447-458

- Herzog D., 2016: Vergleich von Sonneneinstrahlungsmodellierungen mit GIS und Fischaugenfotos. Semesterarbeit an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Forstwirtschaft (HAFL), Zollikofen, 15 S.
- Hyypä J., Kelle O., Lehtikainen M., Inkinen M., 2001: A segmentation-based method to retrieve stem volume estimates from 3-D tree height models produced by laser scanners. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 39, 969-975.
- Konecny G. und Lehmann G., 1984: Photogrammetrie (4. überarb. Auflage), de Gruyter, Berlin, 392 S.
- Krijcek J., Brinkman K.A. and Gingrich S.F., 1961: Crown competition factor, a measure of density. *Forest Sci.* 7: 35-42.
- Kraft G., 1984: Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover, 154 S.
- Lee S.J., Chan Y.C., Komatitsch D., Huang B.S. and Tromp J., 2009: Effects of realistic surface topography on seismic ground motion in the Yangminshan region of Taiwan based upon the spectral-element method and LiDAR DTM. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(2A): 681-693.
- Martens S., 2012: Erste Erfahrungen bei der Herleitung ertragskundlicher Parameter für Einzelbäume aus LiDAR-Daten. In: Nagel J (Hrsg.). Beiträge zur Jahrestagung des Deutschen Verbands Forstlicher Versuchsanstalten. Göttingen, 171-179.
- Menk J., Dorren L., Heinzel J., Marty M., Huber M., 2017: Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 168 (3), 151-159.
- Moeser D., Roubinek J., Schleppe P., Morsdorf F., and Jonas T., 2014: Canopy closure, LAI and radiation transfer from airborne LiDAR synthetic images, *Agr. Forest Meteorol.*, 197, 158-168, doi:10.1016/j.agrformet.2014.06.008, 2014.
- Noldin M., 2015: Schätzen von Indikatoren hinsichtlich der Bestandesstruktur von Gebirgsnadelwäldern auf der Basis von LiDAR-Daten, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Masterarbeit, 79 S.
- Parker G., Lefsky M., Harding D., 2001: Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. *Remote Sensing of Environment*, Vol 76/3, 298-309.
- Persson Å., Holmgren J., Söderman U., 2002: Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68 (9), 925-932.
- Pretzsch H. und Kahn, M., 1998: Forschungsvorhaben „Konzeption und Konstruktion von Wuchs- und Prognosemodellen für Mischbestände in Bayern“. Abschlussbericht Projekt W28, Teil 2. Technische Universität München, Freising. 271 S.
- Pretzsch H., Biber P., Uhl E., Dahlhausen J., Rötzer T., Caldentey J., Koike T., van Con T., Chavanne A., Seifert T. et al., 2015: Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. *Urban For. Urban Green*. 2015, 14, 466-479.
- Röhle, V.H., 1986: Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablotung von Kronenradien mit dem DAchlot und durch senkrecht Anvisieren des Kronenrandes (Hochblick-Messung). Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München. *Forstarchiv*, 57. Jahrgang 1986.
- Rössler J., 2000: Höhenmessverfahren auf Dauerversuchsflächen. *Methods of tree height assessment on permanent observation plots*. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.
- Rosselli S., 2017: Entwicklung einer Wirkungsanalyse für die Beurteilung der Baumanzeichnung in subalpinen Schutzwäldern auf Grundlage einer räumlich expliziten Waldbeschreibung. Masterarbeit, Eidgenössisch Technische Hochschule Zürich ETHZ. Zürich, 100 S.

Scherrer K., 2013: Untersuchungen zu den Einflüssen des Lichtes auf das Höhenwachstums der Fichte (*Picea abies*). Semesterarbeit an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen, 41 S.

Shimano K., 1997: Analysis of the relationship between DBH and crown projection area using a new model. *J. For. Res.* 2: 237-242.

Sondermann B., Rossmann J., 2016: Semantic Environment Perception and Modeling for Automated SLAM. In: *International Journal of Simulation Systems, Science & Technology (IJSST)* 17, 5.1-5.8.

Sondermann B., Rossmann J., 2014: Semantic Environment Perception Localization and Mapping. *Artificial Intelligence Modelling and Simulation (AIMS)*, 3rd International Conference, 285-290.

Todd K., F. Csillag P. and Atkinson, 2003: Threedimensional mapping of light transmittance and foliage distribution using LIDAR. *Canadian J. of Remote Sensing*, 29(5), pp. 544-555.

Xu W.H., Feng Z.K., Su Z.F., Xu H., Jiao Y.Q. and Deng O., 2014: An automatic extraction algorithm for individual tree crown projection area and volume based on 3D point cloud data. *Guang Pu Xue Yu Guang Pu Fen Yi*, 2014 Feb; 34(2):465-471.

Zhang J., Sohn G., Brédif M., 2013: Single Tree Detection from Airborne Laser Scanning Data using a marked point process based method. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II / 3 (W1), 41 - 46.

Ziesak M., Dietsch P., Günter M., Thormann J.J., Dorren L., 2017: Verbesserte waldbaulich-forsttechnische Planung bei Seilkraneinsätzen mittels Drohnentechnik. Schlussbericht. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL, Zollikofen. 85 S.