



Berner
Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL
Abteilung Waldwissenschaften

Verbesserte waldbaulich-forsttechnische Planung bei Seilkraneinsätzen mittels Drohnentechnik



Schlussbericht

Autoren: Dr. M. Ziesak, P. Dietsch, M. Günter, J.J. Thormann, Dr. L. Dorren

Zollikofen, 31. Oktober 2017

Impressum:**Projektleitung:**

Dr. Martin Ziesak, Berner Fachhochschule, Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften (HAFL), Länggasse 85, 3052 Zollikofen

Weitere beteiligte Personen der HAFL:

Patrick Dietsch (Schlussbericht, Projektbegleitung seit Mai 2017)

Mark Günter (GIS- und FINT-Analysen, Befliegungen),

Dr. Luuk Dorren (FINT),

Jean-Jacques Thormann (waldbauliche Aspekte),

Daniela Rommel (Projektbegleitung bis April 2017),

Curdin Condrau (Student, Bachelorarbeit im Rahmen des Projektes).

Projektfinanzierung:

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Fonds zur Förderung der Wald- und Holzforschung (WHFF)

Projektbegleitung:

Projektbegleitung BAFU:

Werner Riegger, Abteilung Wald, WHFF

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen:

Dr. Arno Bücken, Dr. Michael Schluse, Björn Sondermann

Forstbetrieb Sigriswil:

Hans Stauffer, Björn Weber

Landwirtschaft und Wald (lawa) Kanton Luzern:

Erwin Meier, Bruno Duss

Titelbild:

Schematische Darstellung des Prozesses von der Befliegung mit der Drohne, bei welcher Einzelbilder erstellt werden, über die Erstellung eines Orthophotos bis hin zum Modell, welches zur Weiterverarbeitung generiert wird.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	4
Tabellenverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis.....	8
Zusammenfassung	9
1 Einleitung.....	10
1.1 Ausgangslage	10
1.2 Problemstellung	10
1.3 Praxisrelevanz	11
2 Stand der Forschung	12
2.1 Holzernteverfahren im Gebirge	12
2.2 Projektierungsprogramme und Optimierungsansatz zur Erarbeitung von Seillinienkonzepten	13
2.3 Fernerkundungsmethoden	16
2.3.1 Swisstopo LiDAR-Daten.....	16
2.3.2 Drohnengenerierte Fernerkundungsdaten.....	16
2.3.3 Photogrammetrie	17
2.3.4 Terrestrisches Laserscanning	17
2.4 Forstliche Anwendungen der Fernerkundungsdaten.....	18
3 Material und Methoden	21
3.1 Allgemeines Vorgehen und Literaturrecherche	21
3.2 Genauigkeitsanalyse.....	22
3.2.1 Marteloskopflächen.....	23
3.2.2 Ausgangsdaten	25
3.2.3 Kontrolldaten	27
3.2.4 Analyse generierter Baumparameter	27
3.3 Überprüfung Praxistauglichkeit	29
3.3.1 Flächenbeschreibungen.....	29
3.3.2 Ausgangsdaten	33
3.3.3 Vorgehen zur Überprüfung der Praxistauglichkeit.....	33
3.4 Überprüfung des Einflusses verschiedener Flughöhen und Genauigkeitsvergleich swisstopo- und Drohnendaten.....	35
4 Ergebnisse.....	37
4.1 Genauigkeitsanalyse.....	37

4.1.1 Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT und LiForest	37
4.1.2 Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT im Vergleich zum IT-gestützten terrestrischen Laserscanning	39
4.1.3 Korrelation der Genauigkeit der Stammfusskoordinaten mit den sozialen Klassen nach Kraft	42
4.1.4 Genauigkeit der durch FINT und LiForest abgeleiteten BHD	48
4.1.5 Vergleich von FINT und LiForest bezüglich der mittleren Abweichung der generierten Stammfusskoordinaten	49
4.1.6 Auswertung Drohnendaten durch RWTH Aachen.....	51
4.2 Ergebnisse Praxistauglichkeit.....	54
4.2.1 Buhütte	54
4.2.2 Huetgraben	60
4.2.3 Holzhackerwald	62
4.3 Überprüfung des Einflusses verschiedener Flughöhen und Genauigkeitsvergleich Swisstopo- und Drohnendaten.....	63
5 Diskussion	66
5.1 Genauigkeitsanalyse.....	66
5.1.1 Verwendete Methodik und Genauigkeit der verwendeten Daten	66
5.1.2 Genauigkeit untersuchter Parameter	67
5.1.3 Praxistauglichkeit der drohnenbasierten Daten	70
5.1.4 Flughöhenversuche	72
6 Folgerungen.....	73
7 Literaturverzeichnis.....	78
Dank	85
Anhang	86

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mathematisches Optimierungsmodell nach Bont (Quelle: Condrau 2017)	15
Abbildung 2: Ablauf des FINT-Analyseprozesses (Quelle: Menk et al. 2017, verändert)	20
Abbildung 3: Übersicht zum methodischen Vorgehen (Condrau 2017, verändert)	21
Abbildung 4: Für die Genauigkeitsanalyse und Praxistauglichkeit verwendete Versuchsflächen (Quelle: Condrau 2017)	22
Abbildung 5: Versuchsfläche in Zollikofen (Quelle: Condrau 2017)	23
Abbildung 6: Versuchsfläche in Rona (Quelle: Condrau 2017)	24

Abbildung 7: Schematische Darstellung eines ungeglätteten nDOM (links) oder nach der Glättung (rechts) mit als Punkten dargestellten lokalen Maxima (Quelle: Menk et al. 2017)	25
Abbildung 8: Aufnahmemethode der Marteloskopfläche in Zollikofen (links) und Rona (rechts) (Quelle: Condrau 2017)	27
Abbildung 9: Versuchsfläche Buhütte	30
Abbildung 10: Versuchsfläche in Huetgraben (Quelle: Condrau 2017)	31
Abbildung 11: Versuchsfläche im Holzhackerwald (Quelle: Condrau 2017)	32
Abbildung 12: Boxplots Abweichung der Stammfuss-kordinaten von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald (n=151) (Condrau 2017)	37
Abbildung 13: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)	37
Abbildung 14: Boxplots Abweichung der Stammfuss-kordinaten von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen in Rona (n=215) (Condrau 2017)	38
Abbildung 15: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)	38
Abbildung 16: Gegenüberstellung der mit der Lokalisierungseinheit erfassten und kartierten Bäume (rot) mit den herkömmlich terrestrisch erfassten Bäumen (grün = Übereinstimmung, blau = nicht detektiert von der Lokalisierungseinheit) im Williwald (Quelle: RWTH Aachen 2017)	39
Abbildung 17: Boxplots der Abweichung der Stammfuss-kordinaten für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren im mit der Lokalisierungseinheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald (n=52) (Condrau 2017)	40
Abbildung 18: Positionsfehler des IT-gestützten TLS-Verfahrens (als Referenzdaten wurden die manuell erfassten terrestrischen Daten des Marteloskops verwendet) (Quelle: RWTH Aachen 2017)	40
Abbildung 19: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren im mit der Lokalisierungs-einheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald (Condrau 2017)	41
Abbildung 20: Verteilung der erfassten / nicht erfassten Bäume nach BHD für FINT (oben) und LiForest (unten) im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)	42
Abbildung 21 : Verteilung der erfassten bzw. nicht erfassten Bäume nach BHD für FINT (links) und LiForest (rechts) im Marteloskop Rona (Condrau 2017)	43
Abbildung 22: Von FINT (links) und LiForest (rechts) detektierte bzw. nicht detektierte Bäume im Williwald unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017)	43
Abbildung 23: Boxplots zur Abweichung der Stammfusskoordinaten unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen für FINT (n = 25 (0), 85 (1), 58 (2), 26 (3), 5 (4)) und LiForest (n= 26 (0), 83 (1), 48 (2), 20 (3), 6 (4)) im Marteloskop Williwald (Condrau 2017, verändert).	44
Abbildung 24: Durch FINT (links) und LiForest (rechts) detektierte bzw. nicht detektierte Bäume in Rona unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017)	45
Abbildung 25: Boxplots zur Abweichung der Stammfusskoordinaten unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen für FINT (n = 34 (0), 99 (1), 62 (2), 37 (3), 9 (4)) und LiForest (n= 34 (0), 100 (1), 72 (2), 55 (3), 19 (4)) im Marteloskop Rona (Condrau 2017, verändert)	46
Abbildung 26: Boxplots Abweichung der mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD von den terrestrischen Vergleichsdaten für das Marteloskop Williwald (n=151) (Condrau 2017)	48

Abbildung 27: Boxplots Abweichung der mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD von den terrestrischen Vergleichsdaten für das Marteloskop Rona (n=215) (Condrau 2017)	48
Abbildung 28: Boxplots zum Vergleich der Abweichung der Stammfusskoordinaten von FINT für die Marteloskope Williwald und Rona (Condrau 2017)	49
Abbildung 29 : Boxplots zum Vergleich der Abweichung der Stammfusskoordinaten von LiForest für die Marteloskope Williwald und Rona (Condrau 2017)	50
Abbildung 30: Punktwolke Marteloskopfläche Rona als LAS-Datei (Bücken 2017)	51
Abbildung 31: Im GIS digitalisierte Darstellung der Drohnendaten auf rotem Hintergrund (links) und anhand der Drohnendaten berechnetes DGM (rechts) (Quelle: Bücken 2017).....	52
Abbildung 32: Aus den Drohnendaten errechnete Modelle: DOM (links), DGM (Mitte), nDOM (rechts) (Quelle: Bücken 2017).....	52
Abbildung 33: Für die Einzelbaumerkennung ausgewählter Bereich (links Übersicht, rechts detailliert) nach erfolgter Einzelbaumerkennung mit Algorithmus der RWTH Aachen (Quelle: Bücken 2017)	53
Abbildung 34: Übersichtsplan der mit Seilaplan geplanten Seillinien der Buhütte mit drohnengeneriertem Orthofoto (Linie 1 und 2: Grün = realisierte Stützen- und Ankerbäume; Linie 3: Gelb = realisierte Stützen- und Ankerbäume)	54
Abbildung 35: Mit Seilaplan erstellte Seiltrasse 1 mit unter Berücksichtigung des Orthophotos ausgewählten Stützen auf hinterlegtem DGM	55
Abbildung 36: Mögliche Fehlerquellen der Sonneneinstrahlungs-modellierung mit GIS im Vergleich von Fischaugenfotos im Gelände mit HEMIVIEW (Herzog, 2016)	56
Abbildung 37: Orthophoto 2016 (links) und Orthophoto 2017 (rechts) der Fläche Buhütte	57
Abbildung 38: Vergleich nDOM 2016 (links) und nDOM 2017 (rechts) der Fläche Buhütte zur Verdeutlichung des Unterschiedes vor und nach erfolgtem Eingriff (grün = geringe Bestandeshöhe, rot = hohe Bestandeshöhe)	57
Abbildung 39: Aus dem Differenzbild von nDOM 2016 und 2017 erstellte entnommene Bäume (links, rot = Entnahme, wobei Entnahme = Differenz > 7m zwischen nDOM 2016 und nDOM 2017) und Anzahl entnommener Bäume (rechts, mit FINT ermittelt)	58
Abbildung 40: 3D-Darstellung der entnommenen Bäume der Fläche Buhütte aus verschiedenen Perspektiven (grün = niedrige Baumhöhe, rot = hohe Baumhöhe).....	59
Abbildung 41: Skizze der Detailplanung in der Bewirtschaftungseinheit Huetgraben (Condrau 2017)	60
Abbildung 42: Skizze der Detailplanung in der Bewirtschaftungseinheit Holzhackerwald (Condrau 2017)	62
Abbildung 44: Bildausschnitt aus dem Marteloskop Williwald mit laub- und nadelholzreichen Partien, Bestandeslücken und verschiedenen Bestandesaltern zum Vergleich der Orthophotos swisstopo und verschiedene Befliegungshöhen (oben links = Orthophoto swisstopo 2012, oben rechts = 100m, unten links = 140m, unten rechts = 180m; Massstab 1:250)	64
Abbildung 43: Sichtbarkeit des Maschinenstandorts (weisses Kreuz) auf verschiedenen Flughöhen (Links = 100m, Mitte = 140m, Rechts = 180m; orange = terrestrische Referenzbäume; gelb / grün / blau = mit FINT detektierte Bäume) in einem Ausschnitt der Marteloskopfläche Williwald (Massstab 1:500)	64
Abbildung 45: Vergleich der Auflösung des DOM von swisstopo (links) und Drohne (rechts) aufgezeigt an einem Ausschnitt der Marteloskopfläche Rona.....	65

Abbildung 46: Fichte mit wuchsbedingter grosser Abweichung zwischen den Stammfuss-kordinaten und der Kronenspitze.....	68
--	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf Seiltrassenabstand (Quelle: Nemestóthy und Sperrer 2011, 9, eigene Darstellung)	12
Tabelle 2: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald und verwendeter statistischer Test (Condrau 2017, eigene Darstellung)	38
Tabelle 3: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald und verwendeter statistischer Test (Condrau 2017, eigene Darstellung)	39
Tabelle 4: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im mit der Lokalisierungseinheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren sowie Testergebnis (Condrau 2017)	41
Tabelle 5: Statistische Kennwerte und verwendete Tests zur Abweichung der Stammfusskoordinaten in Metern für FINT und LiForest in der Marteloskopfläche Williwald unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017, verändert).....	44
Tabelle 6: Ergebnisse Dunn-Test für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017, verändert)	45
Tabelle 7: Statistische Kennwerte und verwendete Tests zur Abweichung der Stammfusskoordinaten in Metern für FINT und LiForest in der Marteloskopfläche Rona unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017, verändert).....	46
Tabelle 8: Ergebnisse Dunn-Test für FINT und LiForest im Marteloskop Rona (Condrau 2017, verändert)	47
Tabelle 9: Statistische Kennwerte zur Abweichung des BHD von den terrestrischen Referenzdaten für die Versuchsfläche Williwald [cm] (Condrau 2017, verändert).....	48
Tabelle 10: Statistische Kennwerte zur Abweichung des BHD von den terrestrischen Referenzdaten für die Versuchsfläche Rona (Alle Angaben in [cm]) (Condrau 2017, verändert)	49
Tabelle 11: Statistische Kennwerte in Metern und Testresultat für den Vergleich der Stammfusskoordinaten der Marteloskope Williwald und Rona für FINT (Condrau 2017, verändert) ..	49
Tabelle 12 : Statistische Kennwerte in Metern und Testresultat für den Vergleich der Stammfusskoordinaten der Marteloskope Williwald und Rona für LiForest (Condrau 2017, verändert)	50
Tabelle 13: Statistische Kennwerte zur Untersuchung der Genauigkeit von FINT und LiForest sortiert nach sozialen Klassen und zusammengestellt nach Programm (Condrau 2017, verändert)	51
Tabelle 14: Seilaplan-Daten und terrestrisch erhobene Daten der geplanten Seillinien 1 und 2 der Fläche Buhütte.....	55
Tabelle 15: Flughöhen, Rastergrößen DOM und Anzahl erfasster Bäume bei den Flughöhenversuchen im Williwald.....	65

Abkürzungsverzeichnis

ALS	Airborne Laser Scanning
ANOVA	analysis of variance
BHD	Brusthöhendurchmesser
DGM	Digitales Geländemodell (engl. DTM digital Terrain model)
DHM	Digitales Höhenmodell (oft als Überbegriff für DGM und DOM verwendet)
DOM	Digitales Oberflächenmodell (engl. DSM digital Surface model)
FINT	Find Individual Trees
GNSS	globales Navigationssatellitensystem
HD	Horizontaldistanz
LiDAR	Light detection and ranging
NaiS	Nachhaltigkeit im Schutzwald
nDOM	Normalisiertes Oberflächenmodell (entspricht im Wald dem normalisierten Kronenmodell (nKM), engl. nDSM normalized digital Surface model)
NDVI	normalisierter differenzierter Vegetationsindex
Normal-QQ-Plot	Normal-Quantil-Quantil-Plot
RMSE	Root Mean Square Error
RTK	Echtzeitkinematik (Real Time Kinematic)
TLS	Terrestrisches Laserscanning
UAV	Unmanned Aerial Vehicles

Zusammenfassung

Um die Tauglichkeit von drohnengenerierten Daten für die Planung von Seilkraneinsätzen zu prüfen, sind zwei Aspekte wichtig. Einerseits ist die Genauigkeit von Einzelbaumattributen (Baumhöhe, Stammfusskoordinaten, Brusthöhendurchmesser (BHD)), andererseits die Tauglichkeit der Daten zur Festlegung der Seillinie aus waldbaulicher und technischer Sicht zu prüfen. Beide Gesichtspunkte wurden analysiert, jedoch separiert betrachtet. Die Genauigkeit wurde auf den Marteloskopfen Williwald und Rona analysiert, Praxistests in den Kantonen Bern und Luzern durchgeführt.

Die Einzelbaumerkennungsprogramme FINT und LiForest wurden bei der Genauigkeitsanalyse anhand von 5 Hypothesen verglichen. Zusätzlich wurde ein IT-gestütztes terrestrisches Laserscanning-Verfahren untersucht. Für sämtliche Analysen wurden als Referenzwerte terrestrische Messungen verwendet. Weil für die Seilkranbringung geeignete Stützen- und Ankerbäume vor allem in der Oberschicht zu finden sind, wurde eine Unterteilung in Kraft'sche Baumklassen vorgenommen. Zusätzlich wurde der Einfluss der Hangneigung auf die Genauigkeit untersucht.

FINT und LiForest unterschieden sich bezüglich der Genauigkeit nicht signifikant. Die mittlere Abweichung der Stammfusskoordinaten lag bei 1.4m, wobei dominante Bäume signifikant weniger abwichen. Die Vollständigkeit der erfassten Bäume lag zwischen 61 und 76%, wobei der Grossteil der nicht erkannten Bäume den Klassen beherrscht und unterdrückt angehörte. Die Korrektheit von FINT und LiForest lag im Williwald zwischen 63 und 68% und war in Rona deutlich geringer. Der RMSE lag zwischen 8.7 und 12.1 cm. Der erwartete Zusammenhang zwischen Hangneigung und Abweichung der Stammfusskoordinaten konnte nicht bestätigt werden.

Die Feldversuche wurden für 3 Flächen in den Kantonen Luzern und Bern durchgeführt. Zur Einzelbaumerkennung wurde FINT verwendet. Die Projektierung erfolgte mit SeilkranPROjekt und seilaplan. Bei den Versuchen zeigte sich, dass die Markierung der Maschinenstandorte die Trassierung erleichtert. Deswegen wurde die Sichtbarkeit der Markierung bei verschiedenen Flughöhen überprüft. Sämtliche Stützen- und Ankerbäume waren auffindbar, wobei das Orthophoto zur Bestimmung der Bäume hilfreich war. Lediglich mit den Gon-Angaben und den Distanzen bis zu den Stützen- und Ankerbäumen wären die Bäume nicht auffindbar gewesen. Bis auf einen Fall war die technische Realisierbarkeit aufgrund der Dimensionierung gewährleistet. Bei einem weiteren Baum war die Verankerung nicht ausreichend. Dies zeigt die Grenzen des getesteten Verfahrens. Wichtige Parameter wie Verankerung und Stabilität können anhand von Drohnenbildern nicht beurteilt werden. Auch aus waldbaulicher Sicht ist die Feldbegehung nicht ersetzbar, denn zur Beurteilung der Lichtverhältnisse und zum Erkennen von Verjüngung ist eine Geländebegehung notwendig. Zur groben Orientierung und um einen ersten Eindruck zur Fläche zu erhalten sind Drohnenbilder aber äusserst hilfreich.

Durch die Reduktion der Flughöhe konnte die Detektionsrate von FINT nicht signifikant verbessert werden. Die Sichtbarkeit der Maschinenstandorte war bis 140m Flughöhe gewährleistet, bei 180m war die Markierung kaum noch sichtbar. Ob dies auf die Lichtverhältnisse oder die Befliegungshöhe zurückzuführen ist, kann anhand der Untersuchungen nicht abschliessend beurteilt werden.

Somit kann gesagt werden, dass die Genauigkeit der abgeleiteten Baumparameter Stammfusskoordinaten und BHD für die Detailplanung und die technische Realisierung der Seillinien ausreicht. In der waldbaulich-forsttechnischen Planung lassen sich somit durch das untersuchte Verfahren Zeit- und Kostenvorteile realisieren. Die Geländebegehung kann dadurch jedoch nicht ersetzt, sondern lediglich mit zeitnah verfügbaren Informationen aus der Luft ergänzt werden.

Schlagwörter: Single tree extraction, drone, FINT, LiForest, cable yarding.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Bewirtschaftung von Gebirgswäldern ist eine anspruchsvolle und wichtige Aufgabe. Sie ist für die Abschöpfung des nachhaltigen Nutzungspotenziales zur Erreichung wald- und klimapolitischer Ziele bedeutsamer denn je, da in steilen Lagen teils noch hohe Holzvorräte vorhanden sind. Die Rahmenbedingungen der Bewirtschaftung sind jedoch schwierig. In der Planung sind die Aspekte der Schutzwaldbewirtschaftung ebenso wie jene der anschliessenden Holzernte und -bringung zu berücksichtigen.

Die waldbauliche Planung und forsttechnische Realisierung im Seilkrangelände sind auf realistische Planungsdaten und Geländearbeit angewiesen. Drohnen bieten die Möglichkeit, die dynamischen Prozesse der Waldentwicklung auf einer Eingriffsfläche vor der Geländebegehung zu erfassen. Dabei handelt es sich um eine kostengünstige und präzise Methode zur Erhebung von Gelände- und Bestandesdaten mit der die Planung für die Holzernte exakt vorbereitet werden kann und ein Zeit- und Qualitätsgewinn bei der waldbaulich- forsttechnischen Planung möglich scheint. Neben der Analyse dieser Datenbeschaffungsmöglichkeit wurde im Projekt auch die Nutzung von genauen, jedoch nicht immer zeitnah zum Eingriffszeitpunkt verfügbaren LiDAR-Daten (swisstopo) betrachtet.

1.2 Problemstellung

Das übergeordnete Ziel ist, die waldbaulich-forsttechnische Planung für Seilkraneinsätze mittels Drohnentechnik und LiDAR-Daten zu verbessern. Dazu soll eine Methode zur digitalen Festlegung von Seillinien mit aktuellen Drohnen- und LiDAR-Daten erarbeitet werden, um den Revierförster bei der Entscheidungsfindung zur Gestaltung des Eingriffs und der Linienführung zu unterstützen. Ein qualitativer Vergleich der digital unterstützten mit der konventionellen Trassierungsmethode soll zeigen, ob sich durch die verfügbaren Drohnen- und LiDAR-Daten Verbesserungen im Prozess der Trassierung ergeben. Zur Zielerreichung wurden folgende Forschungsfragen untersucht:

- 1 Wie präzise können mit drohnenbasierten Vegetationsoberflächenmodellen und LiDAR-basierten Geländeoberflächenmodellen Informationen zu den Stammfusskoordinaten und dem Brusthöhendurchmesser (BHD) gewonnen werden?
- 2 Reicht die Genauigkeit der Drohnen- und LiDAR-Daten aus, um diese anstelle der LiDAR-Daten von swisstopo für die Planung der Seillinien verwenden zu können?
- 3 Verbessert die Reduktion der Flughöhe die Qualität der drohnengenerierten Bilder und ermöglicht das Erkennen von Strukturelementen und damit eine verbesserte waldbaulich-forsttechnische Planung?
- 4 Kann die Methode mit Drohnen- und LiDAR-Daten die Anzeichnung im Gelände unterstützen und zu Zeiteinsparungen während der Anzeichnung beitragen?

Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden Hypothesen formuliert, welche im Kapitel Material und Methoden vorgestellt werden. Ein ursprünglich geplanter Vergleich der Genauigkeit zwischen den Drohnentypen Starrflügler und Multi-Kopter konnte nicht durchgeführt werden, weil die vorgesehene Drohne während der Projektbearbeitungszeit nicht verfügbar war.

1.3 Praxisrelevanz

Die Relevanz des Themas ist für die Forschung und Praxis gegeben, weil mit Drohnen aktuelle und präzise Daten erfasst werden können, welche durch GIS-kompatible Software schnell aufbereitet und verwendbar sind. Für den Anwender bieten sich neue, verhältnismässig günstige Möglichkeiten.

Für die **waldbauliche Planung** von Eingriffen in Gebirgswäldern ist es wichtig, die kleinräumige Verteilung von Vorrat, Baumarten, Verjüngungsöffnungen und Verjüngung zu kennen. Damit sind Massnahmen zur Verjüngungseinleitung, -sicherung oder Bestandsausformung planbar. Solche Informationen anhand von Geländebegehungen zu erheben ist jedoch zeit- und kostenintensiv. Daten aus der allgemeinen Waldplanung sind nicht genau genug, um Eingriffe zu planen. Herkömmliche Bestandskarten sind schnell veraltet und im Gebirge kaum effizient nutzbar. Eine Drohne hilft, die Grundlagendaten effizient, zeitnah und kostengünstig zu beschaffen. Die plenterartigen Gebirgswaldstrukturen und die langen Verjüngungszeiträume zeigen die Notwendigkeit einer Strukturanalyse auf Bestandsebene.

Für die **forsttechnische Planung** ist neben der Geländeform auch die Verfügbarkeit geeigneter Anker- und Stützenbäume zur Realisierbarkeit von Seillinien entscheidend. Klassischerweise werden Seillinien durch eine iterative Trassierung im Gelände ermittelt. Bei fehlenden Stützen- oder Ankerbäumen wird die Linie seitlich verlagert und neu erfasst. Lage und Abstand der Linien zueinander sind wichtige Kostenfaktoren. Mit genauen Geländedaten und Informationen zur Position der Bäume scheint es möglich, die Linien vorab besser zu planen und damit den Anzeichnungsprozess zu beschleunigen.

Durch die **Synthese von waldbaulicher und forsttechnischer Planung** können die Eingriffszonen unter Berücksichtigung der waldbaulichen Notwendigkeit und technischen Möglichkeiten besser aufeinander abgestimmt werden.

Die **Forschung** hat das Potenzial von Drohnen- und LiDAR-Daten bereits in mehreren Studien untersucht und die Anwendbarkeit in verschiedenen Bereichen aufgezeigt (z.B. Martens 2012, Bont und Heinimann 2012, Breschan 2013, Bont 2013, Eysn et al. 2015). Der hier nun neu vertieft untersuchte Aspekt ist, die für die forsttechnische Planung notwendigen Attribute, welche aus Drohnen- und LiDAR-Daten generiert werden, hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu prüfen. Zudem werden die drohnenermittelten Daten mit LiDAR-Daten von swisstopo verschnitten und in die waldbaulich-forsttechnische Planung integriert. Mit der Überprüfung der Verfügbarkeit und Eignung von Anker- und Stützenbäumen wird somit eine bisher wenig beachtete Detailfrage betrachtet.

2 Stand der Forschung

2.1 Holzernteverfahren im Gebirge

Die Holzernte in steilem Gelände stellt die Verantwortlichen vor grosse technische Herausforderungen. Je nach Art der Seilkrananlage, Geländeform, Bringungsrichtung und Nutzungssortiment ist der Aufwand unterschiedlich hoch. So wird beispielsweise die Montagezeit unter einfachen Verhältnissen mit drei Stunden beziffert, während unter schwierigen Gegebenheiten ein ganzer Tag benötigt werden kann, bis das System einsatzbereit ist (Meier 2014).

Bei der Wahl des geeigneten Holzernteverfahrens wird gemäss Heinimann (2003) auf die technische Realisierbarkeit, Wirtschaftlichkeit, Ergonomie und Umweltschonung geachtet. Mit der Auswahl des Verfahrens und dessen Planung werden bereits 60 – 80% der Endkosten bestimmt (Weber et al. 2004). Aufgrund der Rahmenbedingungen bleiben nur noch einige Verfahren als Optionen übrig (Heinimann 2003; Weber et al. 2004). Diese werden nach ökonomischer Effizienz, Umweltverträglichkeit, Verfügbarkeit, Witterungsabhängigkeit, Belastung der Mitarbeiter und Sicherheit beurteilt, um das Bestverfahren zu eruieren (Weber et al. 2004). Ist Schlepper-, Forwarderbringung aufgrund der Hangneigung, Bodentragfähigkeit oder Erschliessungsdichte nicht möglich, stellen seilgestützte Verfahren oder der Helikopter eine Alternative dar (Heinimann 2003).

Nach der Verfahrenswahl ist die geeignete Feinerschliessung zu planen. Dies geschieht durch Seillinienkonzepte, für welche Bewirtschaftungseinheiten die Grundlage bilden. Geländeformen geben die Transportgrenze vor und grenzen Einheiten voneinander ab (Aggeler 2009). Die Seillinien können in Hangfalllinie, hangdiagonal oder sternförmig angeordnet sein. Weiter sind die Trassenabstände bedeutend für die Planung. Gemäss Nemostóthy und Sperrer (2011, 9) haben die in Tabelle 1 dargestellten Faktoren einen Einfluss auf den Trassenabstand.

Tabelle 1: Einflussfaktoren auf Seiltrassenabstand (Quelle: Nemostóthy und Sperrer 2011, 9, eigene Darstellung)

Bestandesfaktoren	Topografische Faktoren	Verfahrenstechnische Faktoren
Nutzungsart	Geländeneigung, -form	Rückeverfahren
Holzanfall pro ha	Zeitaufwand Auf-, Abbau der Seilanlage	Art der Seilanlage
Bestockung	Trassenlänge, Stützenanzahl, -art	Technische Parameter der Anlage (Laufwagen, 2- oder 3-Seilbetrieb, Geschwindigkeit)
Länge, Stückmasse		Basiserschliessung

Nach Festlegung des Konzeptes erfolgt die Detailplanung der Seillinien. Die zu beachtenden Richtlinien und Checklisten können Aggeler (2009) entnommen werden. Die Bestimmung der Azimutangabe kann analog oder digital erfolgen. Analog existieren folgende Möglichkeiten:

- Azimutangaben bestehender Seillinien übernehmen,
- Karten und Pläne verwenden,
- vom Anfangspunkt den Endpunkt anvisieren,
- Azimutangaben aus dem Gegenhang ermitteln (ebd.).

Bei digital erstellten Seillinienkonzepten besteht meist die Möglichkeit, die Azimutangaben der Seillinien am Computer abzulesen (Nemostóthy und Sperrer 2011, 73).

Der Ausgangspunkt für die Trassierung ist normalerweise der Abladeplatz. Von ihm ausgehend wird mit Trassierstäben, Spraydose und Wyssenkompasstrassiert (Nemostóthy und Sperrer 2011, 70). Aufgenommen werden Gefällsbrüche (Aggeler 2009). Am Ende der Seillinie sind Anker- und Endmastbäume zu bestimmen. Fehlen geeignete Bäume oder muss die Linie aus anderen Gründen geändert werden, kann die Winkelkorrekturtabelle verwendet oder die Linie parallel seitlich verschoben werden. Bei einer Winkeländerung muss die Absteckung neu begonnen werden, kann ausnahmsweise jedoch im Gegenzug erfolgen (ebd.). Ist bereits vor der Trassierung bekannt, dass wenige geeignete Stützenbäume vorhanden sind, wird von einer geeigneten Stütze aus trassiert. Diese wird dann als positiver Kardinalpunkt bezeichnet (Nemostóthy und Sperrer 2011, 73).

Nach Bestimmung des Ankerbaums werden die Daten für das Feldaufnahmeprotokoll ermittelt. Dazu wird mit dem Fadenmessgerät die Länge zwischen zwei Geländepunkten ermittelt und die Geländeneigung erfasst (Aggeler 2009). Zur Vereinfachung können elektronische Geräte (Vertex, TruePulse etc.) verwendet werden. Bei neuen Geräten ist die Auswertung durch eine Schnittstelle EDV-gestützt möglich (Nemostóthy und Sperrer 2011, 81). Konventionell werden die Daten auf Millimeterpapier aufgetragen und für die Spannungsfelder der Seildurchhang berechnet und eingezeichnet. Abschliessend werden Stützenknickwinkel und Sattelfkraft berechnet (Aggeler 2009).

2.2 Projektierungsprogramme und Optimierungsansatz zur Erarbeitung von Seillinienkonzepten

Mit Seilkranprojektierungsprogrammen sollen Trassen festgelegt werden. Dazu werden die Anker- und Stützenpositionen und deren Anforderungen sowie der Seildurchhang und die Lastkurven überprüft. Verwendet werden entweder rein numerische oder grafische, interaktive Programme. Auf erstere wird nicht näher eingegangen, weil die grafische Darstellung als wichtig erachtet wurde. Einige Programme, bei denen dies möglich ist, sind:

- **Seilaplan** ist ein gratis QGIS-Plug-In, welches über eine Systemerweiterung direkt in QGIS verwendet werden kann. Dadurch entfällt der Import und Export von Daten (Moll 2015).
- **SeilkranPROjekt** wurde von der Fomea GmbH entwickelt und ermöglicht den Import von Geländeprofilen aus QGIS und anderen Plattformen. Die technische Machbarkeit der Seillinie wird geprüft und Anpassungen in Echtzeit übernommen (Fomea GmbH 2017).
- **SkylineXL** ist ein excelbasiertes Programm vom United States Department of Agriculture (USDA) zur Analyse von Nutzlasten, Spannungsfeldern, Ausführbarkeit von Seillinien. Es kann für verschiedene Seilsysteme eingesetzt werden. Ein Addin von ESRI ermöglicht die Verwendung in ArcGIS. Detailliertere Informationen sind USDA (2017a) zu entnehmen.
- **LoggerPC** ist ein excelbasiertes Programm, welches über ein Plug-In für ArcGIS verfügt, damit das Geländeprofil direkt importiert werden kann. Es kann als Vorgängerversion von SkylineXL betrachtet werden (vgl. USDA 2017b).
- **RoadEng Forest** enthält eine Funktion, welche Analysen von Seillinien ermöglicht. Wird diese zusammen mit weiteren Modulen (Terrain, Karte) verwendet, können die meisten gängigen Seilverfahren simuliert werden. Durch Zusatzmodule können verschiedenste Formate digitalisiert und DGM generiert werden (Softree 2017).

Derzeit werden in Mitteleuropa Seillinienkonzepte anhand von Faustregeln oder Praxiserfahrung festgelegt (Bont 2013). Optimierungsmethoden resp. automatische Berechnungen sind in den USA oder Chile ansatzweise vorhanden (Chung 2002; Epstein et al. 2006, zitiert in Bont 2013). Für

Gebirgswälder sind diese Ansätze ungeeignet, weil sie auf Kahlschlag ausgelegt sind, die Seilbringung mit laufendem Tragseil erfolgt und ökologische Aspekte nicht abgedeckt werden (Bont 2013).

Das mathematische Optimierungsmodell von Bont (Abbildung 1) ist ein Ansatz zur automatischen Berechnung von Seillinienkonzepten. Mit dem Modell sollen Holzerntekosten und Schäden am verbleibenden Bestand sowie der Verjüngung minimiert werden. Betrachtet werden die Holzernte und -bereitstellung vom stehenden Baum bis zum gepolterten Stamm. Die Bewirtschaftungseinheit wird in Holzerntezellen unterteilt und die technischen Parameter für den Seilkraneinsatz werden erfasst (ebd.). Anfangs werden alle möglichen Seillinien betrachtet, indem von den Installationsplätzen 32 oder 64 Linien angelegt und die maximale Seillänge berechnet werden. Anschliessend werden die Seillinien in Sektionen eingeteilt, um die kostengünstigste Anordnung der Stützen zu berechnen. Davon ausgehend wird betrachtet, welche Zellen von welcher Sektion der Linie erreichbar sind. Bei Zellen ausserhalb des Arbeitsfeldes oder wenn sich die Holzernte mit dem Seilkran nicht lohnt, wird mit Bodenseilzug oder Helikopter geerntet. Anhand von Produktivitätsmodellen aus Österreich werden die Holzerntekosten geschätzt (Stampfer et al. 2003; Stampfer 2002; Daxner 1998; Stampfer et al. 2006, zitiert in Bont 2013). Umwelteinwirkungen werden durch Schäden am verbleibenden Bestand und Bodenschäden berücksichtigt (Bont 2013). In Hangfalllinie sind ab 25° Geländeneigung Trassen zu vermeiden, weil viele gravitative Naturgefahren ab dann zu wirken beginnen und die Bestandesbegründung erschwert wird (Frehner et al. 2005). Zudem entstehen durch Bergabbringung deutlich grössere Schäden am bleibenden Bestand (Limbeck-Lilienau 2002; Stampfer 2002, zitiert in Bont 2013). Die beste Seillinie wird mit der Gewichtung einzelner Kriterien gesucht.

Das Modell berücksichtigt wichtige Aspekte der Linienausscheidung (Position von Ankerbäumen, Vorhandensein geeigneter Stützen) nicht, weil Baumpositionen nicht berücksichtigt werden. Waldbauliche Strukturen und die Vorratsverteilung werden ebenfalls nicht berücksichtigt. Neben dem Ansatz von Bont wurde im Projekt NewFor (2014) ein Ansatz auf Basis von LiDAR-Daten erarbeitet.

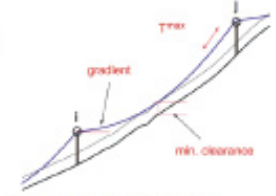
Mathematische Optimierung von L. Bont

Input-Daten

Grundlagendaten:
 Waldfläche unterteilt in Holzerntezellen [5x5 m oder 10x10 m]
 Digitales Höhenmodell (DHM)
 Installationsplätze (wahlweise auch ganze Strassenlayer)
 Hindernisse, mögliche Stützenbäume
 Karte mit zu erntendem Volumen

Technische Parameter

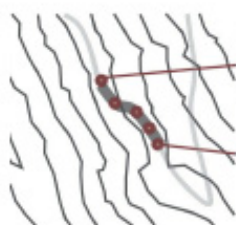
Seillinienparameter:
 Querschnittsfläche des Tragseils
 Tragseilgewicht
 E-Modul des Tragseils
 Mindestbruchlast
 Gewicht der Last (inkl. Laufwagen)



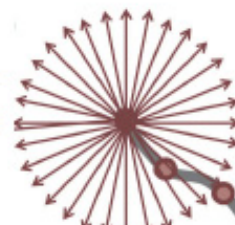
Gewicht des Zugseils
 Minimaler Bodenabstand der Lastwegkurve

Kalkulation

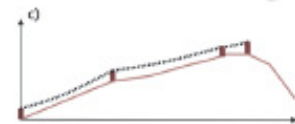
1. Auswahl aller möglichen Installationsplätze



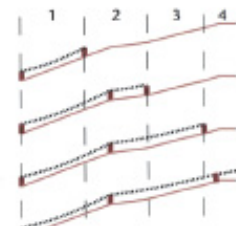
2. Erstellung von 32 resp. 64 radial ausgerichteten Linien pro Installationsplatz



3. Aufgrund vom Gelände und seilmechanischen Kennwerten wird die maximale Seillinienlänge bestimmt

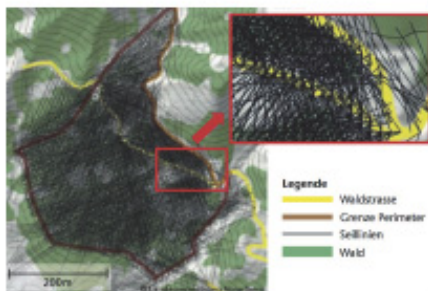


5. Kalkulation vom nächsten Installationsplatz

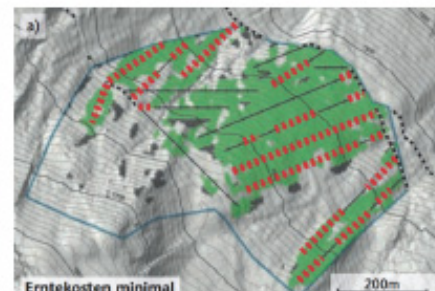


4. Unterteilung der Seillinie in Sektionen und Berechnung der kostengünstigsten Anordnung der Stützen

Resultate



Rohe Ergebnisse: Planungseinheit mit allen umsetzbaren Seillinien. Bei einer Größe von 13 ha und einer Rasterauflösung von 5m ergeben sich 2'800 Seillinien und 5800 Holzerntezellen. Insgesamt existieren somit 128'000 Kombinationsmöglichkeiten.



Bearbeitete Ergebnisse: Auswahl der "besten" Seillinien aufgrund 1 bis 3 Kriterien

Mögliche Kriterien: Erntekosten minimal, Bergabtransport minimal, Verlauf in der Falllinie minimal oder eine Kombination

Abbildung 1: Mathematisches Optimierungsmodell nach Bont (Quelle: Condrau 2017)

2.3 Fernerkundungsmethoden

Fernerkundung beschreibt alle Verfahren zur Gewinnung von Informationen ohne direkten Zugang zum Untersuchungsobjekt (Konecny und Lehmann 1984, 11). Neben Satelliten und Sensoren ist dies mit Drohnen möglich. Für die waldbauliche Planung im Gebirge können Fernerkundungsmethoden Entscheide bezüglich Handlungsbedarf und Dringlichkeit unterstützen (Glanzmann 2012). In einem sich schnell ändernden Umfeld sind aktuelle Daten von grossem Nutzen. Um dies in der forstlichen Planung zu berücksichtigen, braucht es neue, zeitnah verfügbare Methoden (Zürcher et al. 2015).

2.3.1 Swisstopo LiDAR-Daten

LiDAR-Daten entstehen durch Lichtimpulse, deren Reflektionen wieder eingefangen werden (Porwal und Udeechya 2013 zitiert in Noldin 2015). Derzeit werden sie häufig zur topografische Kartierung, Oberflächenerosionserkennung, Küstenzonenmanagement, Überschwemmungskartierung sowie in der Forstwirtschaft eingesetzt (Wever und Lindenberger 1999; Flood 1999, zitiert in Fischer 2011).

Airborne Laser Sanning Daten (ALS-Daten) werden durch an einem Flugzeug befestigte LiDAR-Sensoren generiert (Noldin 2015). Aus ALS-Daten können viele Informationen wie bspw. räumliche Verteilung, Vegetationshöhe, Grösse und Verteilung von Bestandslücken gewonnen werden.

Weil die Lichtgeschwindigkeit konstant ist, kann die Distanz zwischen LiDAR-Scanner und reflektierendem Gegenstand berechnet werden (Baltasvias 1999b). LiDAR-Aufnahmen liefern eine dreidimensionale Punktwolke des überflogenen Gebiets. Ein Teil der Lichtimpulse kann das Kronendach durchdringen und trifft auf den Boden, womit auch die Bodenoberfläche erfasst wird (Straub et al. 2009 zitiert in Noldin 2015). Anhand der Punktwolke können das digitale Oberflächenmodell (DOM), das digitale Geländemodell (DGM) und als Differenz der Modelle das digitale Kronenmodell (nKM) oder normalisierte Oberflächenmodell (nDOM) dargestellt werden. Die Genauigkeit der Daten hängt von Flughöhe, Scanwinkel, Bodentopografie, Bodenbedeckung, verwendetem GPS und Navigationssystem ab (Baltasvias 1999a zitiert in Fischer 2011).

2.3.2 Drohnengenerierte Fernerkundungsdaten

Mit Kameras ausgestattete unbemannte Fluggeräte, umgangssprachlich Drohnen, werden immer öfter in der Vermessung als kostengünstige, flexible Instrumente zur Gewinnung von Fernerkundungsdaten eingesetzt. Laut Kersten (2016) und Przybilla et al. (2015) hat der Einsatz zur Erfassung photogrammetrischer Bilddaten von Arealen kleiner bis mittlerer Grösse (einige 10 ha) in den letzten Jahren deutlich zugenommen. Drohnen können unterteilt werden in Flächenflugzeuge, Kopter (Hubschrauber mit bis zwölf Rotoren), Drachen, Gleitschirme und Ballone (Kersten 2016).

Einen Überblick über den Anwendungsbereich von UAV in Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation geben Haarbrink (2011), Nex und Remondion (2014), Remondino et al. (2011) sowie Colomina und Molina (2014) zitiert in Kersten (2016). Abhängig vom Anwendungsbereich werden zur forstlichen Fernerkundung Kopter oder Flächenflugzeuge eingesetzt. Bei diesen Drohnentypen basiert die Navigation in der Regel auf GPS-Verfahren (Przybilla et al. 2015).

Die Auswertung der UAV-Bildflugdaten geschieht durch verschiedene Softwarelösungen. Einige Untersuchungen wurden in den letzten Jahren publiziert (vgl. Neitzel et al. 2011; Kersten und Lindstaedt 2012; Kersten et al. 2012; Kersten und Mechelke 2013; Barille et al. 2015; Schöning und Heidemann 2015). Przybilla et al. (2015) untersuchten den Einfluss verschiedener Parameter auf die Qualität der Daten. Sie fanden heraus, dass Kreuzbefliegungen die Genauigkeit steigern und die Anzahl Passpunkte (=Referenzpunkte) reduziert werden kann. Als Schlüsselfaktor hat sich die Qualität

der verwendeten Sensoren herausgestellt, weil diese die Eingangsdaten für die weiteren Prozessierungen generieren. Eine weitere Qualitätssteigerung des Bildes wird durch die mit Echtzeitkinematik (RTK) und dem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) gemessenen Positionsparameter erreicht.

Die Softwarelösungen zur Georeferenzierung können gemäss Kersten und Lindstaedt (2016) grundsätzlich in 5 Kategorien eingeteilt werden:

- Open-source Software (PMVS2 von Bundler, Apero von MicMac),
- Freie Software (VisualSFM von SFM),
- Webservices (Photosynth von Microsoft Live Labs, 123D Catch, ARC 3D Webservice),
- Low cost Software (PhotoScan von Agisoft),
- Kommerzielle Software (Pix4Dmapper Pro von Pix4D, aspect 3D, smart3Dcapture von acute3D, ERDAS IMAGINE von Hexagon Geospatial, Trimble Business Center von Trimble Geospatial).

2.3.3 Photogrammetrie

Photogrammetrie beschreibt die Informationsgewinnung über Objekte und Vorgänge mit sich überlappenden Bildern (Linder 2009, zitiert in Gonzalez 2011). Die Form, Grösse und Lage von Objekten wird mit den Bild-Objekt-Beziehungen bestimmt (Schwidersky und Ackermann 1976, zitiert in Gonzalez 2011). Zur Bildentzerrung werden heute meist digitale Verfahren verwendet. Die Hauptanwendung der Photogrammetrie ist die Erstellung von Orthophotos, DGM und Strichkarten (Kraus 2004, zitiert in Gonzalez 2011). Einen Überblick über für Photogrammetrie verwendete Software und den Zusammenhang zur UAV-Photogrammetrie liefert Eisenbeiss (2009).

2.3.4 Terrestrisches Laserscanning

Für das terrestrische Laserscanning (TLS) werden wie beim ALS LiDAR-Sensoren verwendet. Zusätzlich wird der Scanwinkel während der Zeit von der Impulsabgabe bis zur Reflektion bestimmt (Bienert 2013). Die Baumposition wird jedoch nicht über die Baumspitzen, sondern über die Stammdetektion bestimmt (Schreck 2014). Dabei gibt es die Methoden von einer Position aus zu detektieren (Single Scan) oder mehrere Messungen von unterschiedlichen Positionen aus durchzuführen (Multiple Scan). Liang et al. (2011) und Püschel et al. (2013) zitiert in Schreck (2014) halten fest, dass das Problem der Okklusion die Genauigkeit des TLS stark beeinflusst. Eine Okklusion (occludere = verschliessen) tritt auf, wenn Objekte im Vordergrund (z.B. Blätter, dichter Jungwuchs) Lichtimpulse teils oder vollständig reflektieren. Die Objekte im Hintergrund werden nicht oder nur teilweise erfasst. Die Auswirkungen der Okklusion auf die Genauigkeit der Stammdetektionen kann in Bienert et al. (2007), Maas et al. (2008), Püschel (2013) und Püschel et al. (2013) nachgelesen werden. Thies und Spiecker (2004) zeigen in ihren Untersuchungen eine Detektionsrate von 52 % aller Bäume in einer Multiple Scan Aufnahme. Für die Methode des Single Scan wurde eine Detektionsrate von 22 % erreicht. Neben der Scanposition und -methode ist die Bestandesstruktur entscheidend (Püschel 2013).

Beim TLS werden aus den Reflektionen Punktwolken generiert. Zur Extraktion von Baumstämmen aus diesen erfolgt die Suche mit Clusteralgorithmen, wobei (halb-)kreisförmige Punktanordnungen gesucht werden. Simonse et al. (2003); Aschoff et al. (2004); Aschoff und Spiecker (2004) zitiert in Bienert (2013) beschreiben diesen Prozess detaillierter. Neben den Stammfusskoordinaten fokussiert sich die Forschung derzeit auf die Bestimmung von BHD und Baumhöhe (vgl. Watt et al. (2005); Wezyk et al. (2007); Hopkinson et al. (2004) zitiert in Bienert (2004).

An der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen wurde eine Methode zur Detektion von Objekten mit einer mobilen Lokalisierungseinheit entwickelt. Damit soll das Lokalisierungsproblem der GNSS-Daten gelöst werden, welche unter dem Kronendach lediglich eine Genauigkeit von 1 – 15 m erreichen (Emde et al. 2014). Der Schlüssel des verwendeten Konzeptes ist die Wahrnehmung, Erkennung und Zuordnung der Objekte. Durch vorgängige Attributierung wird den Objekten eine Bedeutung gegeben (Sondermann und Rossmann 2016). Bäume sind einfach zu detektieren, weil sie sich vertikal und halbkreisförmig vom horizontalen Laserprofil abzeichnen. Zur Abgrenzung von anderen Objekten (z.B. Berge, Kliffen) kann mit Limiten wie Höhe, Durchmesser usw. gearbeitet werden (Sondermann und Rossmann 2014). Für die zu detektierenden Objekte müssen vorgängig Algorithmen entwickelt werden. Der Aufwand dafür bleibt vertretbar, weil im Wald nur wenige verschiedene Attribute detektiert werden (Sondermann und Rossmann 2016).

Das zentrale Element des Systems ist das Lokalisierungsmodul. Es nutzt die Sensordaten als Input und wird durch Orientierungspunkte, welche aus bestehenden Informationen gewonnen werden, ergänzt (Emde et al. 2014). Orientierungspunkte besitzen eine bestimmte Position und einen verlässlichen Wert und dienen als Startpunkt. Der Abstand zu den Sensoren muss bekannt oder bestimmbar sein (Sondermann und Rossmann 2014). Durch Sensoren generierte Wahrnehmungen enthalten Richtung und Distanz zum Orientierungspunkt und sind über einen Algorithmus dem Referenzsystem zuweisbar. Der Lokalisierungsfehler liegt bei ca. 0.1 - 0.5 m (ebd.). Durch die Kombination der Objektdetektionen und die Position / Bewegung mit Bezug zu den Orientierungspunkten kann eine dreidimensionale Umwelt kreiert werden. Die Ergänzung mit weiteren Daten ermöglicht das Ableiten von Informationen (Sondermann und Rossmann 2016). Mit dem vorgestellten System wird der Zeitaufwand für die terrestrische Dokumentation derselben Waldfläche von 2 Stunden auf 3.5 Minuten reduziert (Sondermann und Rossmann 2014).

2.4 Forstliche Anwendungen der Fernerkundungsdaten

Wald- und Einzelbaumattribute anhand der Baumhöhe und ggf. der Kronenfläche und –form abzuleiten ist eine Herausforderung. Zhang et al. (2013) fassen die seit 2000 publizierten Verfahren zur Einzelbaumerkennung aus Fernerkundungsdaten zusammen.

Gemäss Vauhkonen et al. (2011) existieren zwei Hauptansätze, um Waldparameter mit ALS-Daten zu beschreiben. Der flächenbezogene Ansatz liefert Daten auf Bestandesebene (Bestandeshöhe, Stammzahl, Vorrat). Mit dem Einzelbaumansatz werden Informationen zu den Bäumen gewonnen. Die Detektion ist dabei der erste und wichtigste Schritt, für welchen zahlreiche Verfahren existieren (Kaartinen und Hyypä 2008). Die ALS-basierten Höhenwerte werden normalerweise zur Bestimmung der lokalen Maxima, welche den Baumspitzen entsprechen, verwendet (Vauhkonen et al. 2011). Die meisten Verfahren beruhen laut Zhang et al. (2013) auf einem der folgenden Algorithmen:

- Lokales Maximaum (vgl. Popescu et al. 2002),
- Region growing (vgl. Solberg et al. 2006),
- Valley following (vgl. Leckie et al. 2003),
- Template matching (vgl. Korpela et al. 2007),
- Wasserscheiden-Algorithmus (vgl. Pyysalo and Hyypä 2002),
- Marker-controlled Wasserscheiden-Algorithmus (Chen et al. 2006),
- Multi scale segmentation (vgl. Brandtberg et al. 2003).

Am häufigsten werden der Algorithmus des lokalen Maximums und der Marker-controlled Wasserscheiden-Algorithmus verwendet. Diese ergeben gemäss Kaartinen et al. (2012) zitiert in Zhang et al. (2013) plausible Ergebnisse. Unterschiede zwischen den Algorithmen beruhen entweder auf der Anpassung der Filterung zur Erlangung der gewünschten Anzahl lokaler Maxima oder in der Nachbearbeitung der Ergebnisse.

Hyypä et al. (2001) detektierten mit der lokalen Maxima-Filterung mit festgelegter Fenstergrösse **Einzelbäume** vom nDOM. Popescu et al. (2002) verwendeten eine abgewandelte Methode, um mit variablen Fenstergrössen die Detektions- und Fehlerrate zu verbessern. Sobald die Einzelbäume erkannt sind, eignet sich der marker-controlled Wasserscheiden-Algorithmus zur Abgrenzung und Ermittlung **weiterer Bauparameter**.

Vauhkonen et al. (2011) halten fest, dass nicht alle Bäume erfasst werden. Die Detektionsrate ist von der Punktdichte und Waldstruktur abhängig. In früheren Untersuchungen in Skandinavien und Zentraleuropa wurden Detektionsraten von über 70 % erreicht (Hyypä et al. (2001); Persson et al. (2002); Koch et al. (2006); Solberg et al. (2006) zitiert in Vauhkonen et al. (2011). Nach Brandtberg et al. (2003) und Koch et al. (2006), zitiert in Vauhkonen et al. (2011), ist die Detektionsrate in **Laubwäldern** wegen der komplexeren Kronenform und Struktur niedriger. Untersuchungen in Deutschland ergaben **Detektionsraten** zwischen 50 und 60 Prozent (Koch et al. (2006); Heinzel et al. (2011) zitiert in Vauhkonen et al. (2011).

Aufgrund der Vielzahl an Verfahren und der steigenden Bedeutung der Einzelbaumerkennung existieren verschiedene **Softwarelösungen, Tools und Anbieter**. Die folgende Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit:

- FINT (ecorisQ),
- LiForest (Open Topography),
- 3D ClusterTree Tool,
- Fusion (DataOne),
- Terrasolid,
- IDAHO Lidar Consortium,
- Rapidlasso GmbH,
- Laserdata LiS.

FINT (Find Individual Trees) berechnet die Stammfusskoordinaten anhand des nDOM. Alternativ ist bei gleicher Fläche und Zellgrösse der Raster die Berechnung anhand des DOM und DGM möglich. Mit zunehmender Zellgrösse nimmt die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten ab (Dorren 2014). Zur Identifikation von Bäumen wird der Algorithmus des lokalen Maximums verwendet. Als solches wird ein Pixel / eine Pixelgruppe bezeichnet, die markant höhere Werte als die Nachbarpixel aufweist (Soille 2003, 201, zitiert in Gonzalez 2011). Um lokale Maxima zu erkennen wird die Technik der bewegten Fenster angewendet (Dorren 2014). Dazu wird jede Zelle in einem Fenster von 3x3 Zellen angeschaut. Ist die Zelle das lokale Maximum, wird der Radius um eine Zelle erweitert. Dies wird wiederholt, bis eine Zelle höher ist als das Fensterzentrum, der maximale Fensterradius von 15m erreicht ist oder mehr als die Hälfte des Fensters Höhen unter 1m aufweist. Der BHD leitet sich von der Baumhöhe ab. Er wird mit der Standardfunktion $BHD = \text{Baumhöhe}^{1.25}$ oder durch eine benutzerdefinierte Funktion berechnet (Dorren 2014).

Schematisch dargestellt wurde der FINT-Analyseprozess von Menk et al. (2017; Abbildung 2). Das KHM-Raster entspricht dem nDOM, um Strauchvegetation herauszufiltern. Abhängig von der Kluppschwelle kann ein Höhenfilter angegeben werden, ab welchem die Bäume betrachtet werden. Mit der Technik der bewegten Fenster und ggf. einem GAUSS-Filter werden die Koordinaten der potenziellen Baumwipfel bestimmt und ihrer Baumhöhe nach absteigend sortiert. Für die Analyse wird zuerst der höchste potenzielle Baumwipfel betrachtet und mit den Nachbarzellen verglichen. Wenn der potenzielle Baumwipfel grösser ist, als die umliegenden Zellen erfolgt die Aufnahme in die Liste der detektierten Baumwipfel. Andernfalls wird der nächste potenzielle Baumwipfel betrachtet und das Vorgehen wiederholt.

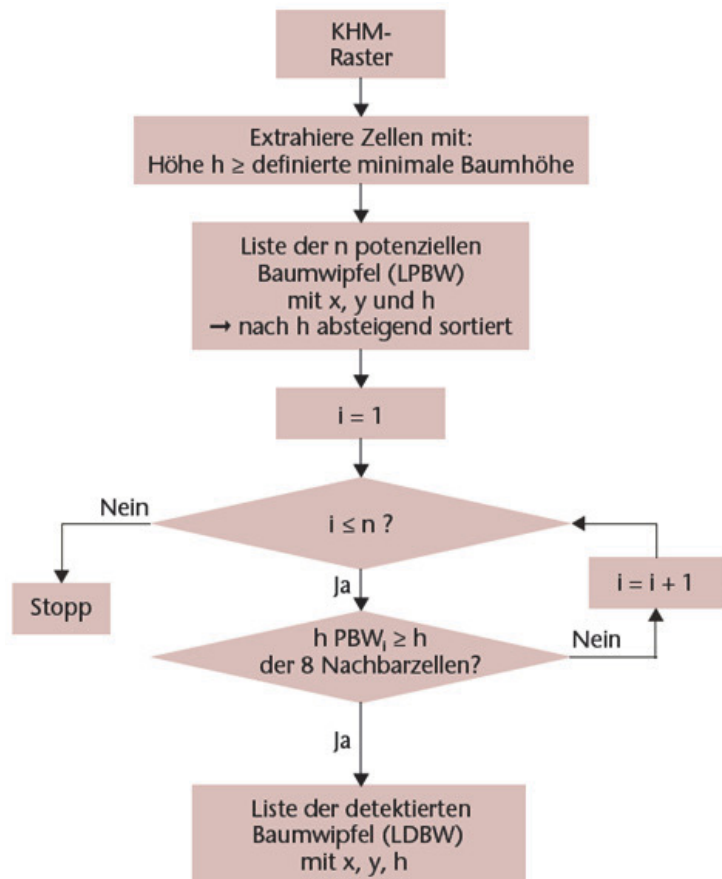


Abbildung 2: Ablauf des FINT-Analyseprozesses (Quelle: Menk et al. 2017, verändert)

Der Literatur konnte nicht entnommen werden, mit welchen Algorithmen das zweite in der Arbeit verwendete Programm **LiForest** arbeitet. Neben der Berechnung der Baumpositionen und der Ableitung des BHD, werden Kronendurchmesser und die -fläche errechnet. Der BHD wird analog zu FINT abgeleitet.

Exkurs allometrisches Wachstum

Die Proportionen von Körper und Organen eines Individuums folgen einem arttypischen Muster. Gemäss Noldin (2015) folgen auch bei den Baumarten die Verhältnisse von BHD zu Baumhöhe sowie BHD zu Holzvolumen diesen Proportionen, solange die Bäume unter gleichen Bedingungen aufwachsen. Bäume sind in der Lage, ihr Wachstumsverhalten und die Anatomie den biotischen und abiotischen Umweltfaktoren anzupassen. Entscheidenden Einfluss haben dabei die Konkurrenzsituation und die Nährstoffverfügbarkeit. Abhängig von diesen Faktoren werden die Nährstoffe gezielt den Strukturen der Pflanze zugeteilt resp. alloziert (ebd.).

Zur Beschreibung von allometrischem Wachstum existiert, weil die Zusammenhänge artabhängig sind (Picard und Saint-Andre 2012 zitiert in Noldin 2015) keine universelle Gleichung (Noldin 2015). In der Wissenschaft wird häufig die lineare Regression verwendet (Heritier et al. 2009, 45f). Details sind Picard und Saint-André (2012), Weiner und Thomas (1992) und Zeide (1993) zu entnehmen. Ebenfalls häufig verwendet wird die Chapman-Richards-Gleichung als flexible Wachstumsgleichung, bei welcher die maximal erwartete Baumhöhe verwendet wird (Richards 1959). Eine abgeänderte Form ist die Schumacher-Gleichung (Zeide 1993).

3 Material und Methoden

3.1 Allgemeines Vorgehen und Literaturrecherche

Durch eine Literaturrecherche mit Konsultation von Fachzeitschriften, Fachportalen, wissenschaftlichen Datenbanken und dem Online-Verbundkatalog NEBIS wurde der Stand der Forschung ermittelt und projektrelevantes Wissen gesammelt.

Die Projektschritte zur Erreichung der Forschungsziele lassen sich grob mit Abbildung 3 darstellen. Sowohl bei den bereits gut dokumentierten Marteloskopflächen als auch bei den Flächen zur Verifizierung im Feld wurde zuerst eine Befliegung mit der Drohne durchgeführt. Die Bilder wurden zusammengefügt, ein Orthophoto und das DOM erstellt. Durch Abzug des DGM (swisstopo-Daten) wurde das nDOM generiert, welches in dieser Arbeit synonym zum normalisierten Kronenmodell (nKM) verwendet wird. Anschliessend wurden FINT und LiForest zur Erkennung der Einzelbäume verwendet, um aus den nDOM die Baumspitzen und die BHD abzuleiten.

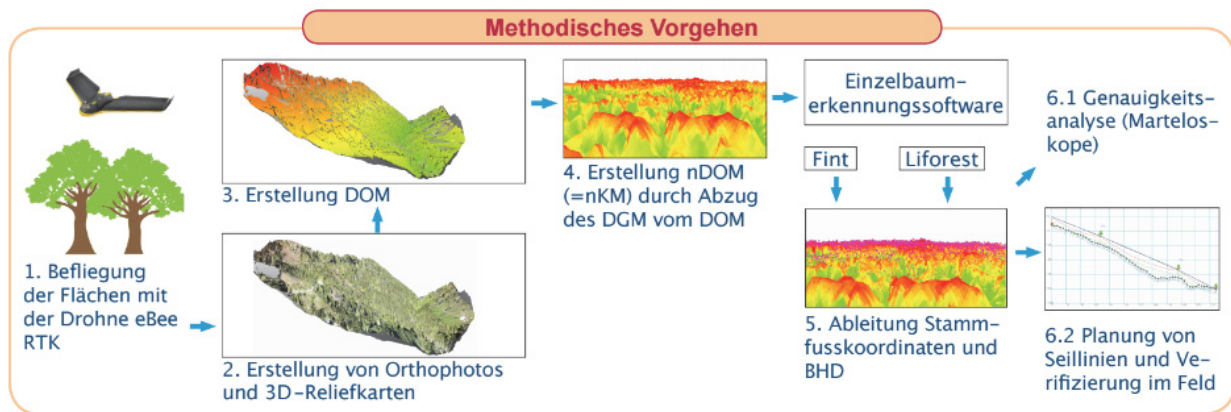


Abbildung 3: Übersicht zum methodischen Vorgehen (Condrau 2017, verändert)

Die Genauigkeitsanalyse (Punkt 6.1 in Abbildung 3) wurde von der Seillinienplanung separiert und auf Marteloskopflächen durchgeführt. Dazu wurden zwei in ihrem Charakter verschiedene Wald- und Geländetypen gewählt. Mit der Marteloskopfläche von Rona wird eine Gebirgswaldsituation abgebildet, während mit der Fläche Williwald ein submontaner Standort betrachtet wird. Im Williwald wurde zudem mit einem IT-gestützten terrestrischen Verfahren der RWTH Aachen eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt. Für die Fläche in Rona wurden die Drohnendaten zusätzlich mit einem Algorithmus der RWTH Aachen ausgewertet. Im Rahmen dieses Projektes können jedoch nur erste Aussagen zum Algorithmus der RWTH Aachen gemacht werden und kein Genauigkeitsvergleich mit FINT und LiForest. Als Referenzdaten wurden für die Genauigkeitsanalyse die herkömmlich terrestrisch erhobenen Marteloskopdaten verwendet. Aussagen über die Tauglichkeit der Drohnendaten im Vergleich zu den swisstopo-Daten erfolgten durch einen qualitativen Vergleich der gleichen Bildausschnitte.

Auf drei Testflächen wurde die Praxistauglichkeit (Punkt 6.2 in Abbildung 3) der entwickelten Methode überprüft. Dabei wurde die Auffindbarkeit der definierten Stützen- und Ankerbäume sowie deren Dimensionierung und Eignung für die vorgesehene Funktion anhand einer Feldbegehung überprüft. Zusätzlich wurde die grundsätzliche Eignung der Drohnenbilder für die waldbauliche und forsttechnische Planung im Seilkrangelände bei der Geländebegehung der Fläche Buhütte beurteilt.

Die Fläche Buhütte wurde nach Abschluss der Hiebmassnahmen erneut befliegen. Dadurch konnte ein Differenzbild ($nDOM\ 2017 - nDOM\ 2016$) berechnet werden, welches die entnommenen Bäume darstellt und Rückschlüsse auf die Entnahmemengen ermöglichte.

Abbildung 4 zeigt die Standorte der Marteloskopflächen und der für die Überprüfung der Praxistauglichkeit verwendeten Flächen. Weil die beiden Feldversuchsflächen Buhütte und Holzhackerwald sehr nahe beieinander liegen, sind sie auf der Karte nicht separat dargestellt.

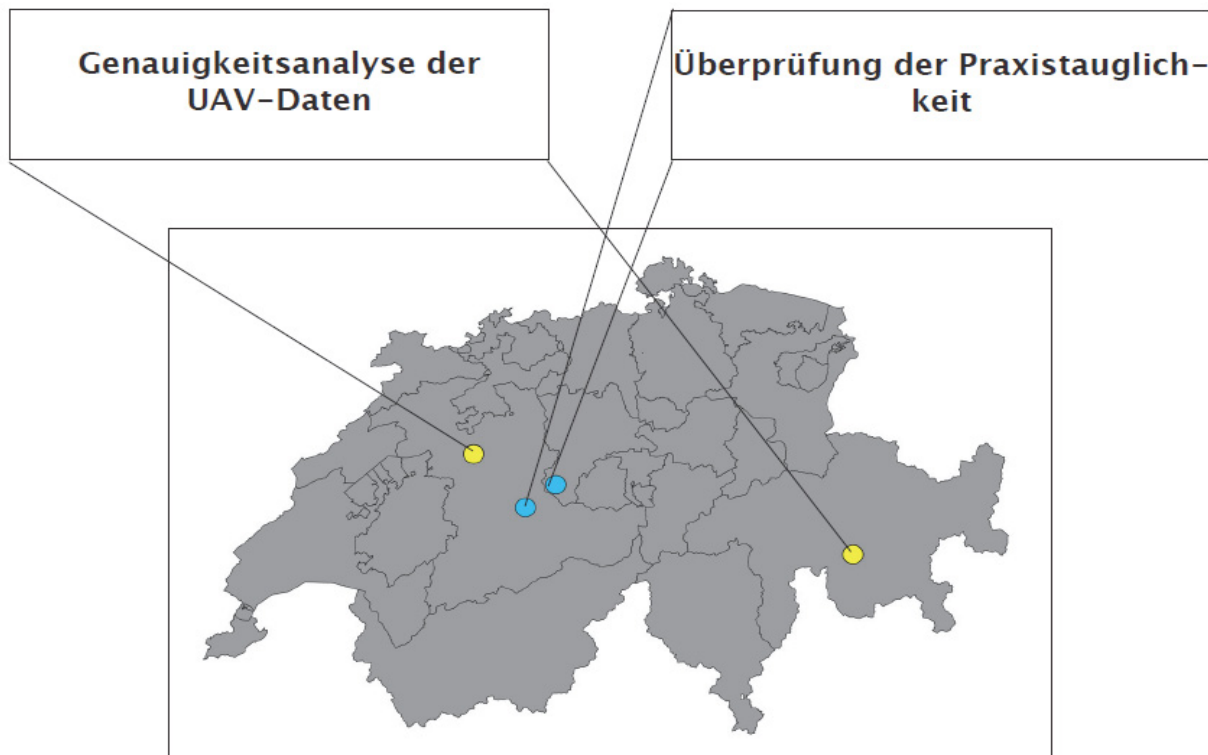


Abbildung 4: Für die Genauigkeitsanalyse und Praxistauglichkeit verwendete Versuchsfelder (Quelle: Condrau 2017). Auf den ursprünglich geplanten Vergleich zwischen herkömmlicher terrestrischer und drohnengestützter Methode mittels Zeitstudie wurde verzichtet, weil sich bei den Geländebegehungen gezeigt hat, dass die einzelnen Trassen zu unterschiedlich sind (Felsbänder, Blockschutt, Unterwuchs) und damit ein Vergleich nicht repräsentativ wäre. Zudem wäre das Ergebnis stark von der trassierenden Person abhängig und durch diese beeinflussbar gewesen. Die Beurteilung der drohnengestützten Methode erfolgte stattdessen rein qualitativ aufgrund von Rückmeldungen der Förster und Einschätzungen der Projektbearbeiter seitens HAFL.

In den folgenden Kapiteln wird auf die verwendeten Daten und Methoden eingegangen. Zuerst wird die Genauigkeitsanalyse, anschliessend die Überprüfung der Praxistauglichkeit und abschliessend werden die Flughöhenversuche behandelt.

3.2 Genauigkeitsanalyse

Die Genauigkeitsanalyse der abgeleiteten Stammfusskoordinaten und BHD erfolgte auf den Marteloskopflächen. Durch die Wahl der Flächen wurden einerseits Mittellandverhältnisse mit hohem Nadelholzanteil und andererseits eine steile, fichtendominierte Fläche abgedeckt. Der Fokus lag auf nadelholzdominierten Flächen, weil die Seilkranbringung vorwiegend auf solchen Flächen erfolgt.

3.2.1 Marteloskopflächen

Versuchsfläche 1 (Williwald)

Der untersuchte Perimeter im Williwald (Abbildung 5) liegt auf rund 560 M.ü.M. und ist im Besitz der Burgergemeinde Bern. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt bei 8.6° C, während die mittlere Niederschlagssumme rund 950mm pro Jahr beträgt (CLIMATE-DATA.ORG ohne Datum). Diese auf submontaner Höhenstufe im Mittelland als Marteloskop ausgeschiedene Fläche befindet sich nordöstlich der HAFL. Von der rund 2 ha grossen Fläche wurde für die Genauigkeitsanalyse der nordöstliche, ca. 0.6 ha grosse Bereich verwendet.

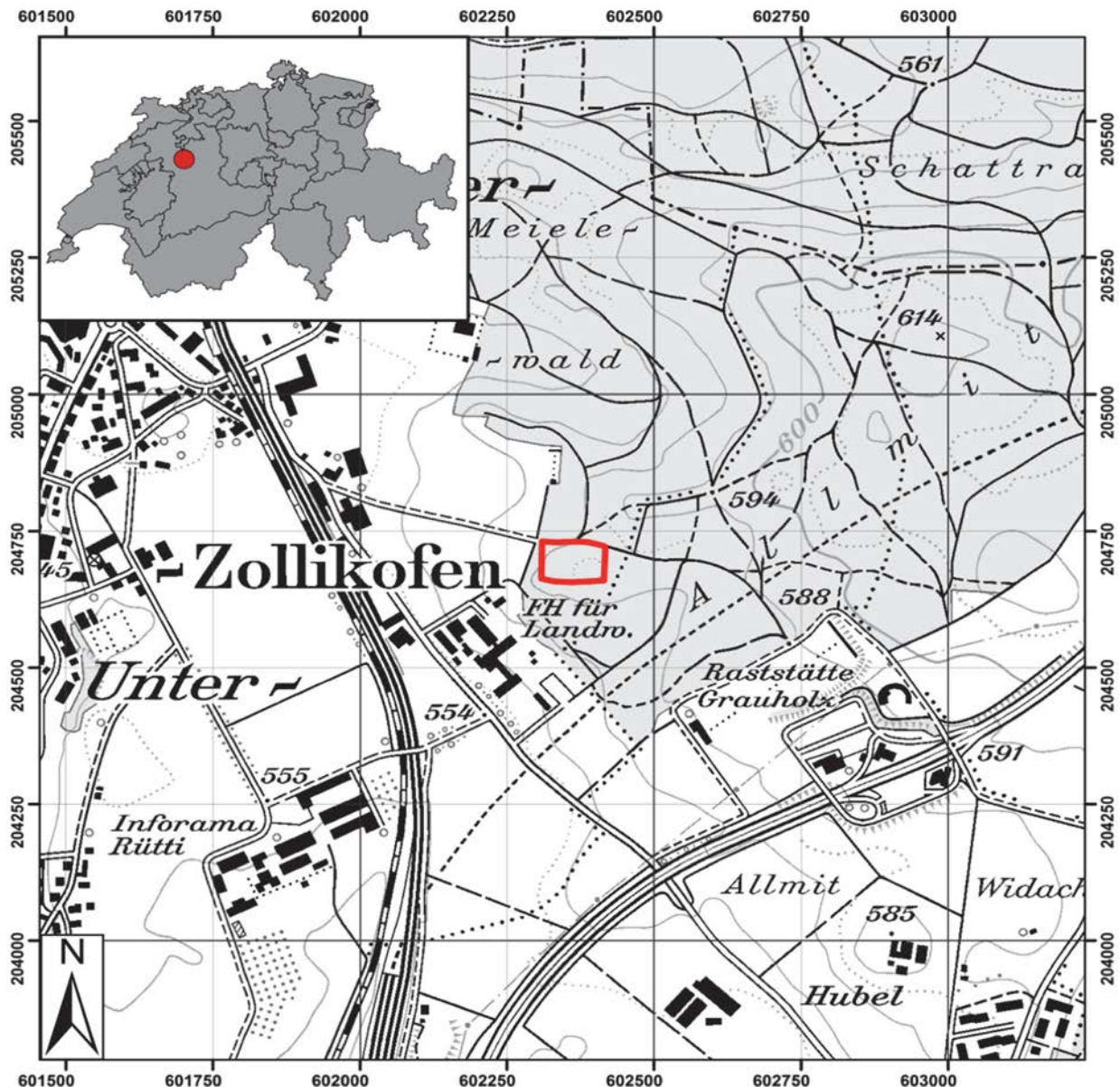


Abbildung 5: Versuchsfläche in Zollikofen (Quelle: Condrau 2017)

Das Baumartenportfolio ist sehr vielfältig und umfasst neben standortgerechten Baumarten (Buche - *Fagus sylvatica*, Vogel-Kirsche - *Prunus avium*, Gemeine Esche - *Fraxinus excelsior*, Berg-Ahorn - *Acer pseudoplatanus*) auch nicht einheimische Baumarten (Douglasie - *Pseudotsuga menziesii*, Sichelanne – *Cryptomeria japonica*, gewöhnliche Thuja – *Thuja occidentalis*).

Versuchsfläche 2 (Rona)

Die zweite Versuchsfläche (Abbildung 6) befindet sich im Kanton Graubünden in der Nähe von Rona. Die in den kontinentalen Hochalpen im Übergang von der hochmontanen zur subalpinen Höhenstufe gelegene Fläche umfasst rund 1.1 ha, die mittlere Meereshöhe liegt bei 1'660 M.ü.M. Die mittlere Jahrestemperatur von Rona beträgt 3.8 °C, die durchschnittliche Niederschlagssumme 1'099 mm (CLIMATE-DATA.ORG ohne Datum). Das Baumartenportfolio besteht mehrheitlich aus Fichte - *Picea abies*, Vogelbeere - *Sorbus aucuparia* und vereinzelt Lärche - *Larix decidua*.

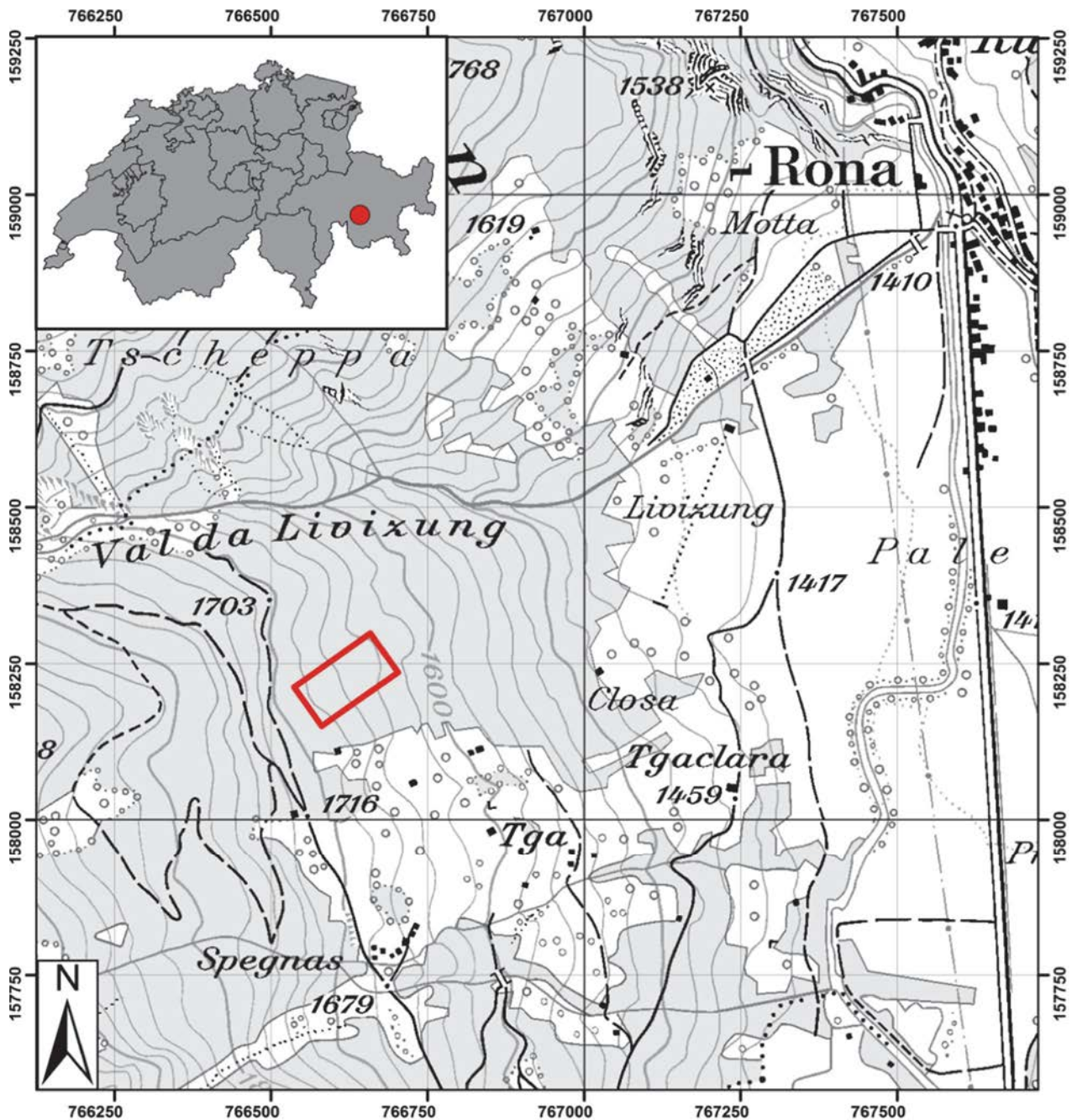


Abbildung 6: Versuchsfläche in Rona (Quelle: Condrau 2017)

3.2.2 Ausgangsdaten

Drohnendaten

Die Befliegung der Marteloskopflächen mit der Drohne eBee RTK erfolgte durch Mark Günter (wissenschaftlicher Mitarbeiter HAFL). Die Drohne verfügt über ein hochpräzises GPS und eine Fotokamera des Typs Sony WX RGB mit einer Auflösung von 18.2 Megapixeln. Die Bilder wurden mit 75 % Längsüberlappung und 70 % Querüberlappung aufgenommen und ermöglichen eine hohe Pixelauflösung im Bereich von 6 – 7 cm. Zur Flugplanung wurde die Software **eMotion** verwendet. Exemplarisch ist die Flugplanung der Fläche Willwald in Anhang A ersichtlich. Pro Flug sind bis zu 20 ha Fläche abdeckbar. Die Aufnahmen erfolgten in einer durchschnittlichen Höhe von 180 m.

Die Georeferenzierung erfolgt mit GNSS-Flugdaten für jedes Bild. Mit eMotion werden die Geotags, bzw. die raumbezogenen Informationen (Zeit und Koordinaten), den einzelnen Bildern zugeordnet. Dies ermöglicht der anschliessend verwendeten Software Pix4Dmapper die Zuordnung und Bearbeitung der Bilder. Anhand der Bildüberlappungen wird stereophotogrammetrisch zuerst eine dichte Punktwolke generiert. Anschliessend werden die hochaufgelösten DOM und Orthomosaik erstellt. Das nDOM wird durch Abzug des DGM vom DOM generiert. Als DGM wurden die Daten von swisstopo (swissAlti^{3D}) mit einer Auflösung von 0.5m verwendet.

Mit den Softwarelösungen FINT und LiForest wurden beim nDOM die lokalen Maxima gesucht. Diese entsprechen im Wald den Baumspitzen. Bei beiden Programmen wurde eine Anpassung der Rastergrösse des nDOM vorgenommen um die Anzahl lokale Maxima zu erhöhen / reduzieren. Dieser Prozess wurde iterativ durchgeführt und wiederholt, bis die Anzahl lokaler Maxima mit der Anzahl der terrestrisch erfassten Bäume näherungsweise übereinstimmte. Die Anzahl der geschätzten Einzelbäume ist von der räumlichen Auflösung des nDOM und der Anzahl lokalen Maxima im Raster abhängig. Für FINT und LiForest musste die Rastergrösse unterschiedlich angepasst werden. Für die Marteloskopfläche Zollikofen wurde für LiForest eine Rasterauflösung von 58 cm verwendet, für FINT eine solche von 90 cm. Für Rona wurde bei LiForest eine Rastergrösse von 31.5 cm und bei FINT eine solche von 50 cm festgelegt. Eine Glättung des nDOM, beispielsweise durch einen Gauss-Filter, oder die Eliminierung von Artefakten, wurde nicht vorgenommen. Erfahrungen haben gezeigt, dass die Kalibrierung ohne Glättung schneller und genauer erfolgt und wertvolle Oberflächeninformationen (Baumspitzen) weiterhin im Raster enthalten sind. Der Mehrwert der Daten liegt in diesen genaueren, durch Drohnen generierten DOM. Bei nahe zusammenliegenden Bäumen besteht die Gefahr, dass richtig detektierte Baumspitzen verloren gehen (Günter 2017). Durch die Anpassung der Rastergrösse findet ein ähnlicher Prozess wie bei der Glättung (vgl. Abbildung 7) statt.

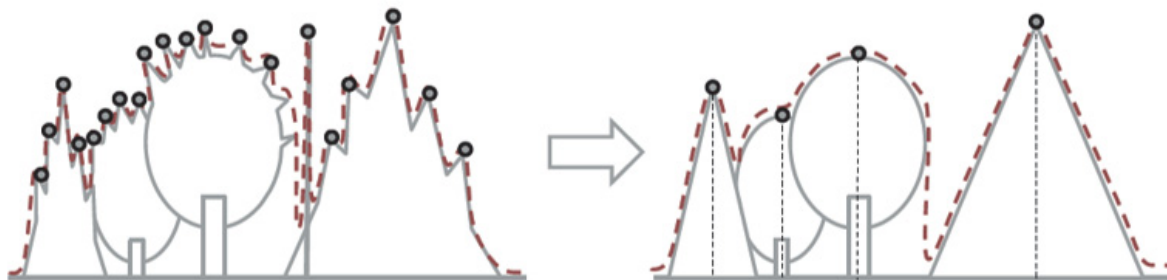


Abbildung 7: Schematische Darstellung eines ungeglätteten nDOM (links) oder nach der Glättung (rechts) mit als Punkten dargestellten lokalen Maxima (Quelle: Menk et al. 2017)

Der BHD leitet sich als Funktion von der Baumhöhe ab. Den Input gibt hierbei eine allometrische Gleichung, welche mit Excel anhand einer Stichprobe (Williwald $n = 42$, Rona $n = 118$) generiert wurde. Im Williwald wurde nur der BHD der Bäume gemessen. Anhand der Baumnummer waren die Koordinaten der Bäume bekannt und die Höhe konnte durch Abzug des DGM vom DOM berechnet werden. In Rona wurde der BHD und die Baumhöhe (Vertex IV von Haglöf) bestimmt und daraus die allometrische Gleichung abgeleitet. Die Gleichungen und abgeleiteten Regressionskurven befinden sich im Anhang B.

In Rona wurden die Drohnendaten zusätzlich von der RWTH Aachen mit ihrem selbst entwickelten Algorithmus ausgewertet. Für eine erste Auswertung wurden lediglich die Drohnendaten (ohne DGM von swisstopo) analysiert. Bei einer geplanten Folgeauswertung mit DGM von swisstopo verhinderten unterschiedliche Koordinatensysteme und Schwierigkeiten bei der Umwandlung der Daten eine Anwendung des Algorithmus.

LiDAR-Daten von swisstopo und den Kantonen

Für das Projekt wurde das neueste Höhenmodell der Schweiz (swissAlti^{3D}) von swisstopo eingesetzt. Dessen Nachführung erfolgte fotogrammetrisch anhand von Luftbildern aus dem Jahr 2013. Zusätzlich erfolgte die Integration der neuen LiDAR-Daten in Teilgebieten der Kantone Bern und Luzern sowie im ganzen Kanton Zug. SwissAlti^{3D} weist eine durchschnittliche Punktedichte von 0.8 Punkten pro Quadratmeter auf (Swisstopo 2015).

Die LiDAR-Rohdaten des Kantons Bern aus dem Jahre 2012 basieren auf hochpräzisen Lasermessungen. Die mittlere Punktdichte des Datensatzes ist mit 4 Punkten pro Quadratmeter höher als die von swisstopo. In Rona wurden als Datengrundlage die swisstopo-Daten verwendet.

Aus den Kantonen wurden folgende Daten genutzt:

- Rohdaten DGM (LAS, XYZCI): ohne Wald, Gebäude und Kunstbauten,
- Rohdaten DOM (LAS, XYZCI): mit Vegetation, Wald, Gebäuden und Kunstbauten (nur für qualitativen Vergleich verwendet).

TLS-Daten

Für einen Teil des Marteloskops Williwald hat die RWTH Aachen mit einer Lokalisierungseinheit eine IT-gestützte terrestrische Erhebung durchgeführt und deren Daten zur Verfügung gestellt. Für die Erstellung der dreidimensionalen Karte wurde ein 2D-Laserscanner mit 270° Blickwinkel verwendet, welcher Bäume bis zu einer Entfernung von 20m detektieren kann. Als zweiter Sensortyp ist ein Stereokamerasystem eingebaut, um Informationen zur Aufnahmehöhe und dem Scanwinkel abzuleiten und die Datengenauigkeit zu verbessern. Zur Datenauswertung wurden letztendlich jedoch nur die 2D-Laserscannerdaten verwendet, weil sich durch die Stereokameradaten keine signifikante Verbesserung der Aufnahmeperimeter ergab. Zusammen mit den LiDAR-Daten (swissAlti^{3D}) konnte das DOM und das DGM erstellt werden. Durch den Abzug des DGM vom DOM konnte das nDOM und somit durch Verschnitt mit den terrestrischen erhobenen Daten die Baumhöhen der detektierten Stämme abgeleitet werden. Weil mit diesen Daten eine räumliche Referenz zum Orientierungspunkt geschaffen wurde, konnten die detektierten Bäume anschliessend für die Lokalisierung verwendet werden. Genauere Informationen zur Aufnahmemethode können Sondermann und Rossmann (2016) entnommen werden. Die Marteloskopfläche Rona konnte wegen dichtem Unterwuchs nicht mit der Lokalisierungseinheit durchschritten werden.

3.2.3 Kontrolldaten

Zu beiden Marteloskopen existieren terrestrisch aufgenommene Daten, welche unter anderem den BHD und die Stammfusskoordinaten enthalten. Für die Marteloskope wurden dabei unterschiedliche Aufnahmemethoden verwendet (Abbildung 8).

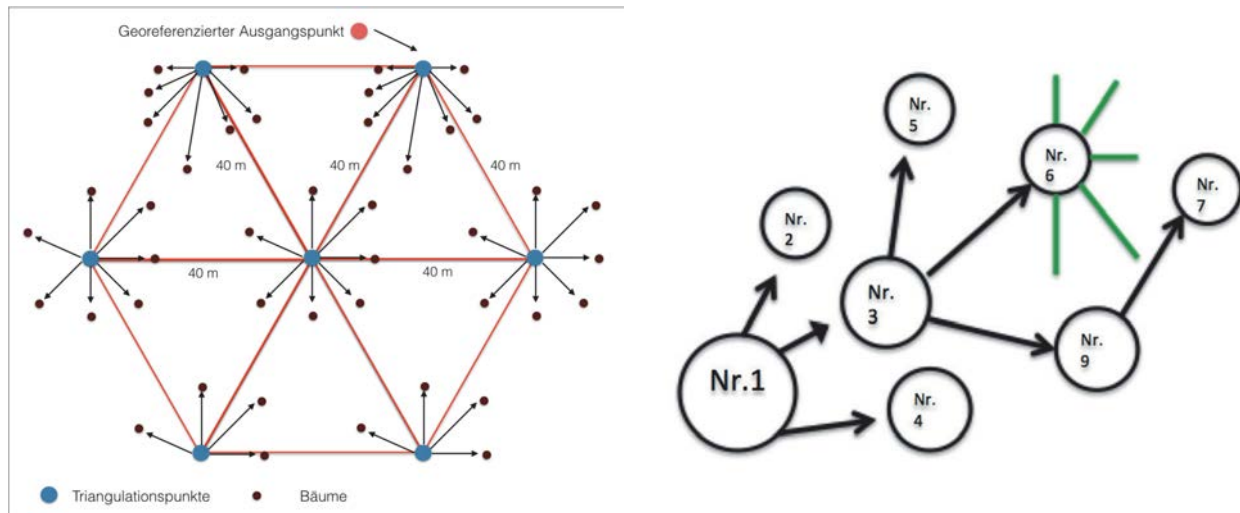


Abbildung 8: Aufnahmemethode der Marteloskopfläche in Zollikofen (links) und Rona (rechts) (Quelle: Condrau 2017)

Im **Williwald** wurden ausgehend von einem georeferenzierten Punkt Triangulationspunkte im Abstand von 40 Metern angelegt. Von diesen wurden alle Bäume ab 14cm Kluppschwelle erhoben und weitere baumspezifische Parameter festgehalten. Zur Bestimmung der Stammfusskoordinaten wurde von den Triangulationspunkten aus die Horizontalabstand (HD) und die Azimute zu den Bäumen mit den Geräten Vertex IV und SUUNTO-Kompass gemessen. Es wurde jeweils die linke Stammseite auf Höhe des BHD anvisiert. Mit Excel und den Parametern HD, BHD und Azimut wurden mit einer trigonometrischen Gleichung die Stammfusskoordinaten abgeleitet. Weil nur ein georeferenzierter Ausgangspunkt genutzt wurde, wurden die berechneten Stammfusskoordinaten in ArcGIS anschliessend manuell dem Luftbild angepasst, um die Genauigkeit zu verbessern.

Für die Marteloskopfläche **Rona** wurde mit einem Passpunkt gearbeitet. Dessen Koordinaten wurden vom drohnengenerierten Orthomosaik abgeleitet. Ausgehend von diesem Punkt wurden alle Bäume ab 8cm BHD durchnummeriert. Für die Genauigkeitsanalyse wurden lediglich die Bäume ab 14cm berücksichtigt, um die Vergleichbarkeit zwischen den Flächen zu gewährleisten. Baumart und BHD wurden notiert und in einem weiteren Schritt vom Fixpunkt ausgehend die HD und Azimut der Bäume mit TruPulse 360 und einem SUUNTO-Kompass bestimmt. Bei nicht direkt sichtbaren Bäumen wurde der nicht sichtbare Baum von einem vermessenen Baum aus eingemessen. Für die räumliche Anpassung der terrestrischen Daten an die Drohrendaten wurde das Spatial Adjustment Tool (ArcGIS) verwendet. Durch eine manuelle Verschiebung in ArcGIS wurde die Übereinstimmung der Baumspitzen gemäss Vegetationshöhenmodellen verbessert, wobei jeweils ganze Baumgruppen verschoben werden konnten. Einzelbaumweise musste nur selten angepasst werden. Die Stammfusskoordinaten wurden analog zum Vorgehen im Williwald bestimmt.

3.2.4 Analyse generierter Baumparameter

Um Aussagen über die Genauigkeit von FINT und LiForest zu ermöglichen, wurden die in diesem Kapitel formulierten Hypothesen überprüft. Weil angenommen wurde, dass die soziale Stellung einen Einfluss auf die Genauigkeit der Einzelbaumerkennungsprogramme hat, wurden sämtliche Bäume auf

den Marteloskopflächen in die Kraft'schen Baumklassen vorherrschend, herrschend, mitherrschend, beherrscht, unterdrückt (Kraft 1984 zitiert in Schütz 2003) eingeteilt.

Die Ergebnisse von FINT, LiForest und der TLS-Methode von Aachen wurden in ArcGIS digitalisiert und anschliessend händisch den terrestrischen Referenzpunkten (=Kontrolldaten) zugewiesen. Die händische Zuweisung war notwendig, weil den Autoren derzeit kein Algorithmus oder GIS-Tool bekannt ist, welches die Zuweisung auf die Referenzbäume vornehmen kann und gleichzeitig die Fehldetektionen erkennt und herausfiltert. Als Anhaltspunkte für die korrekte Zuweisung wurden die soziale Stellung und die Baumhöhe verwendet. Es wurde überprüft, ob die generierten Punkte korrekt sind, welchen Abstand die Bäume zu den Referenzpunkten aufweisen und welche Bäume nicht erkannt wurden. Zum besseren Verständnis ist die angewandte Methode im Anhang F dargestellt und erläutert. Sämtliche Überprüfungen wurden von derselben Person durchgeführt und anschliessend die Vollständigkeit und Korrektheit nach Straub (2003) berechnet.

Zur statistischen Auswertung wurde R Studio (Version 1.0.143) verwendet. Die Ergebnisse sind in Boxplots, statistische Kenngrössen tabellarisch, dargestellt. Folgende Hypothesen wurden überprüft:

Hypothese 1: Zwischen FINT und LiForest unterscheiden sich die Genauigkeiten der generierten Stammfusskoordinaten nicht.

Zur Überprüfung der Hypothese wurden t-Tests für gepaarte Daten durchgeführt. Zuerst wurden sämtliche Bäume der Marteloskopflächen als Stichprobe verwendet (Willwald $n = 155$; Rona $n = 224$). Anschliessend wurde pro Kraft'sche Klasse eine Stichprobe gebildet. Die Normalverteilung wurde mit dem Normal-Quantil-Quantil-Plot (Normal-QQ-Plot) und dem Shapiro-Wilk-Test (Signifikanzniveau $\alpha=5\%$) überprüft. Damit wurde überprüft, ob alle Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest zu den klassisch terrestrisch aufgenommenen Daten, normalverteilt sind. Bei allen Tests wurde die Varianzhomogenität überprüft. Bei nicht normalverteilten Differenzen wurde der Wilcoxon-signed-rank-Test angewendet. Weil nur eine Aussage möglich ist, ob es einen Unterschied zwischen den Datenreihen gibt, wurden die p-Werte für zweiseitige Tests verwendet (Signifikanzniveau $\alpha=5\%$).

Hypothese 2: Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten ist bei FINT und dem IT-gestützten TLS-Verfahren ähnlich.

Weil die Überprüfung der Voraussetzungen für den t-Test für gepaarte Daten ergab, dass keine Normalverteilung vorliegt, wurde der Wilcoxon-signed-rank-Test verwendet (Signifikanzniveau $\alpha=5\%$). Zur Testauswertung konnten nur von beiden Programmen erkannte Bäume verwendet werden.

Hypothese 3: Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT und LiForest korreliert mit den Kraft'schen Baumklassen.

Die Prüfung der Bedingungen für die ANOVA (analysis of variance) hat ergeben, dass die Bedingungen Intervallskalierung der abhängigen Variabel, Kategorialität des Faktors (soziale Klasse), Unabhängigkeit der gebildeten Gruppen gegeben sind. Nicht gegeben waren die weiteren Voraussetzungen (Varianzhomogenität, Normalverteilung), welche mit dem Levene-Test, Bartlett-Test, QQ-Plot und Shapiro-Wilk-Test untersucht wurden. Deswegen wurde mit der Varianzanalyse (Kruskal-Wallis-Test) überprüft, ob die Abweichung der Stammfusskoordinaten mit der sozialen Stellung korreliert. Mit diesem globalen Test ist nur eine Aussage darüber möglich, ob ein

signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten existiert resp. ob sich mindestens ein Mittelwert von den anderen signifikant unterscheidet. Nicht möglich ist eine Aussage darüber, welche Stichproben voneinander verschieden sind. Um die Unterschiede zwischen den Mittelwerten zu ermitteln wurde ein multipler Vergleichstest (Dunn-Test, Signifikanzniveau $\alpha=5\%$) verwendet.

Hypothese 4: Die mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD weichen nur geringfügig von den BHD-Werten der Referenzbäume ab.

Zur Überprüfung der Hypothese wurde der t-Test für gepaarte Daten verwendet, wobei die ganzen Marteloskope als Stichproben gewählt wurden. Die Überprüfung der Voraussetzungen Normalverteilung und Varianzhomogenität erfolgte analog zur Hypothese 1.

Da sowohl positive als auch negative BHD-Abweichungen möglich waren, wurde die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen (RMSE, Root Mean Square Error) berechnet. Diese gibt an, wie stark die mit FINT und LiForest ermittelten BHD durchschnittlich von den terrestrisch gemessenen BHD abweichen und ist damit aussagekräftiger als der arithmetische Mittelwert.

Auf einen statistischen Vergleich zwischen FINT und LiForest wurde verzichtet, weil bei beiden Programmen die BHD anhand der gleichen allometrischen Gleichung, welche anhand der erhobenen Stichprobe generiert wurde, abgeleitet wurden.

Hypothese 5: Die Genauigkeit der generierten Daten von FINT und LiForest nimmt mit zunehmender Hangneigung ab.

Zur Überprüfung wurde der t-Test für zwei unabhängige Stichproben verwendet (Williwald $n = 155$, Rona $n = 224$). Die Voraussetzungen Normalverteilung und Varianzhomogenität wurden mit dem Normal-QQ-Plot, dem Shapiro Wilk-Test und dem Levene-Test überprüft. Sofern bei einer der beiden Stichproben keine Normalverteilung vorlag, wurde der nicht parametrische Wilcoxon-Rank-Sum-Test angewendet.

3.3 Überprüfung Praxistauglichkeit

Die Praxistauglichkeit der vorgestellten Methode wurde an drei Bewirtschaftungseinheiten überprüft, von welchen zwei im Kanton Luzern und eine im Kanton Bern liegen. In den folgenden Unterkapiteln werden die Flächen, Ausgangsdaten sowie die zur Überprüfung verwendete Methode beschrieben.

3.3.1 Flächenbeschreibungen

Buhütte

Die nordöstlich - östlich resp. östlich - südöstlich exponierte Versuchsfläche (Abbildung 9) gehört zum Staatswald Luzern und befindet sich in der Gemeinde Escholz matt-Marbach. Die Flächengrösse beträgt rund 14.5 ha und liegt auf ca. 1200 - 1350 M.ü.M. Gemäss NaiS (Frehner et al. 2005) liegt sie in der obermontanen Höhenstufe der Region 1. Die durchschnittliche Hangneigung liegt bei ca. 30 °.

Die Baumartenzusammensetzung besteht vorwiegend aus Fichte (*Picea abies*). Vereinzelt kommen in der Fläche zudem Weisstannen (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) vor. Das geplante Entnahmevolumen beträgt rund 800 m³ und soll mit 6 Seillinien geerntet werden. Das Mittelstammvolumen wird auf ca. 1.4 m³ geschätzt. Mit dem Eingriff soll gewährleistet werden, dass der Hochwasserschutzwald seine Funktion langfristig erfüllen kann. Der

Holzschlag wurde grösstenteils von einem Unternehmer ausgeführt. Auf einem kleinen Teil der Fläche erfolgt die Holznutzung in Eigenregie durch Bodenzug.

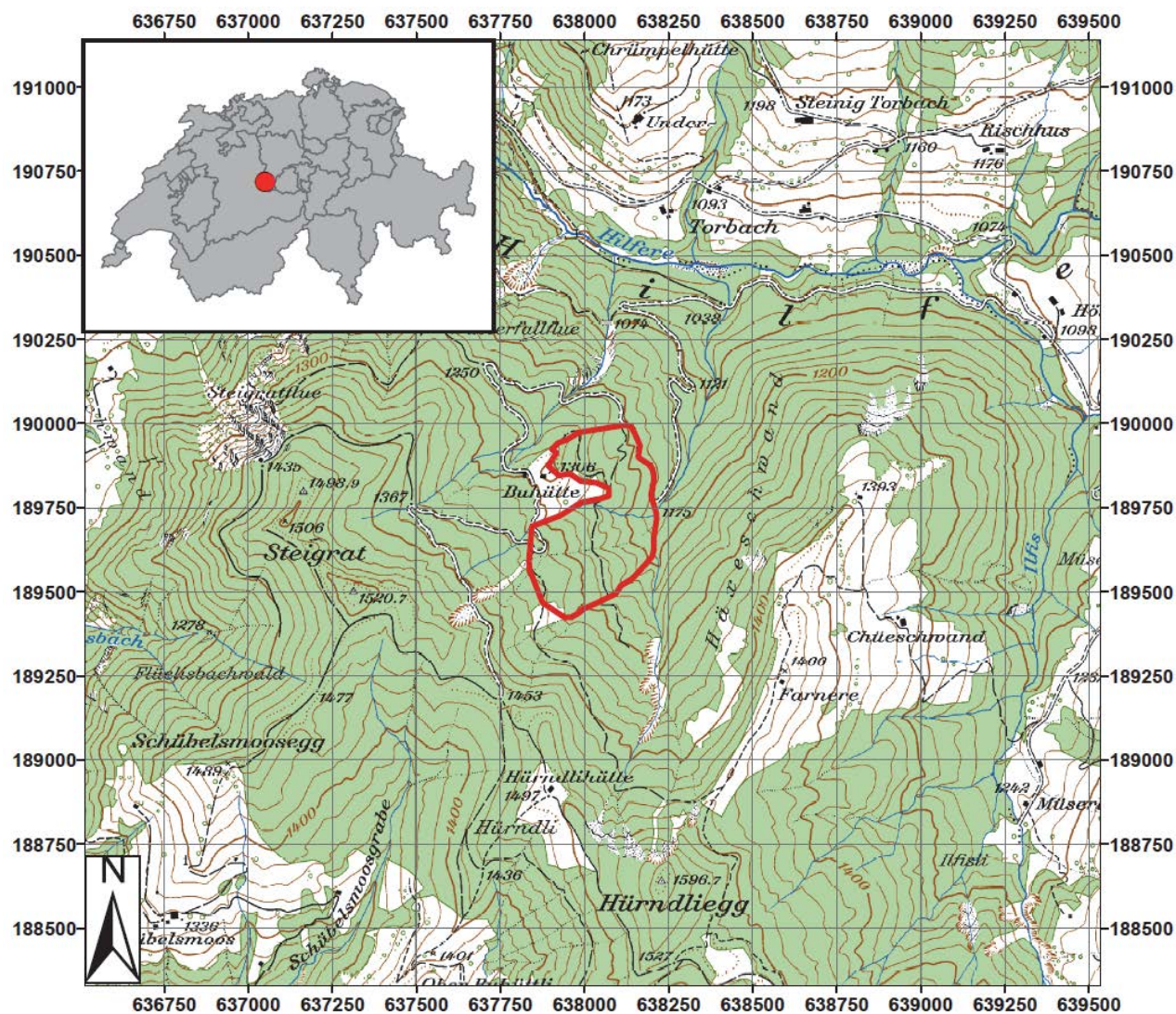


Abbildung 9: Versuchsfläche Buhütte

Huetgraben

Die östlich - nordöstlich resp. westlich - südwestlich exponierte Versuchsfläche (Abbildung 10) gehört zum Gemeindewald von Sigriswil (BE) und wird vom Forstbetrieb Sigriswil, Reutigen, Oberhofen bewirtschaftet. Der Huetgraben befindet sich an der Grenze zur Gemeinde Horrenbach. Die Flächengrösse beträgt rund 5.7 ha und liegt auf ca. 1050 – 1150 M.ü.M. Gemäss NaiS (Frehner et al. 2005) liegt die Fläche in der obermontanen Höhenstufe der Region 1. Die durchschnittliche Hangneigung beträgt 40°.

Die Baumartenzusammensetzung besteht aus Fichte (*Picea abies*), Weisstanne (*Abies alba*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*). Die geplante Erntemenge beträgt rund 500m³ und soll mit drei Seillinien realisiert werden. Das Mittelstammvolumen wird auf 1.8m³ geschätzt. Mit dem Eingriff soll der Gerinneeinhang gepflegt und das Nutzholz gewinnbringend geerntet werden. Der Holzschlag soll in Eigenregie (Mobilseilkran Grizzly 700 der Firma Herzog) durchgeführt werden.

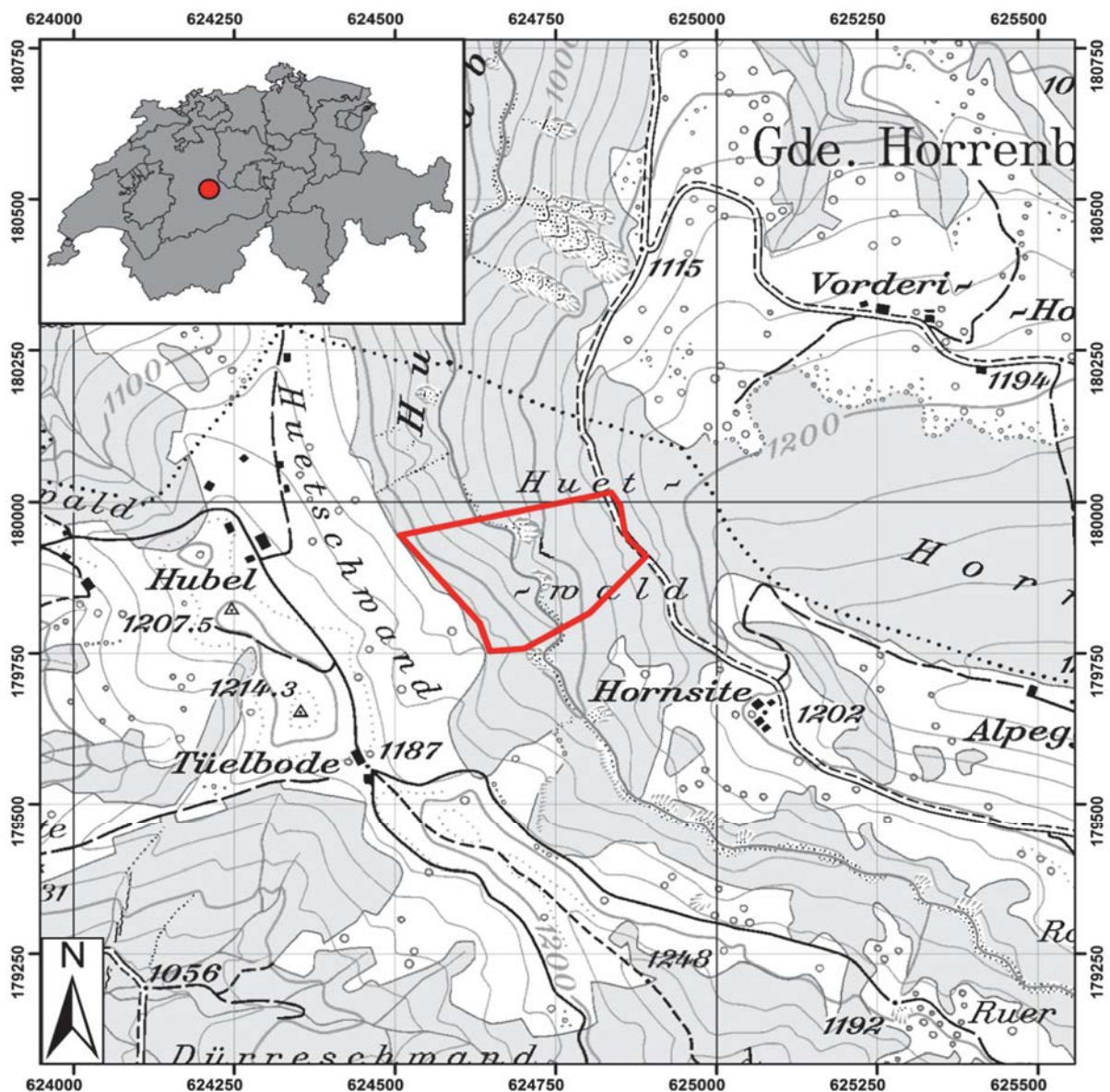


Abbildung 10: Versuchsfläche in Huetgraben (Quelle: Condrau 2017)

Holzhackerwald

Der Perimeter Holzackerwald (Abbildung 11) befindet sich im Luzerner Staatswald in der Gemeinde Escholz matt-Marbach. Die durchschnittliche Hangneigung der nord-nordöstlich exponierten Fläche beträgt 28°. Die Fläche beträgt ca. 8 ha und liegt auf rund 1000 – 1125 M.ü.M. Nach NaiS (Frehner et al. 2005) handelt es sich um obermontanen Wald in der Region 1.

Auf der Fläche sind die Baumarten Fichte (*Picea abies*), Weissstanne (*Abies alba*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*), Buche (*Fagus sylvatica*) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) vorhanden. Insgesamt sollen auf der Bewirtschaftungseinheit 1'200 m³ Holz, verteilt auf 9 Seillinien, geschlagen werden. Grösstenteils liegt die Fläche im besonderen Schutzwald, teils handelt es sich um Hochwasserschutzwald. Eingegriffen wird NaiS-konform, um Bestände über Schlitzte zu verjüngen, indem ausreichend Seitenlicht vorhanden ist. Die Holzernte wird an einen Unternehmer vergeben.

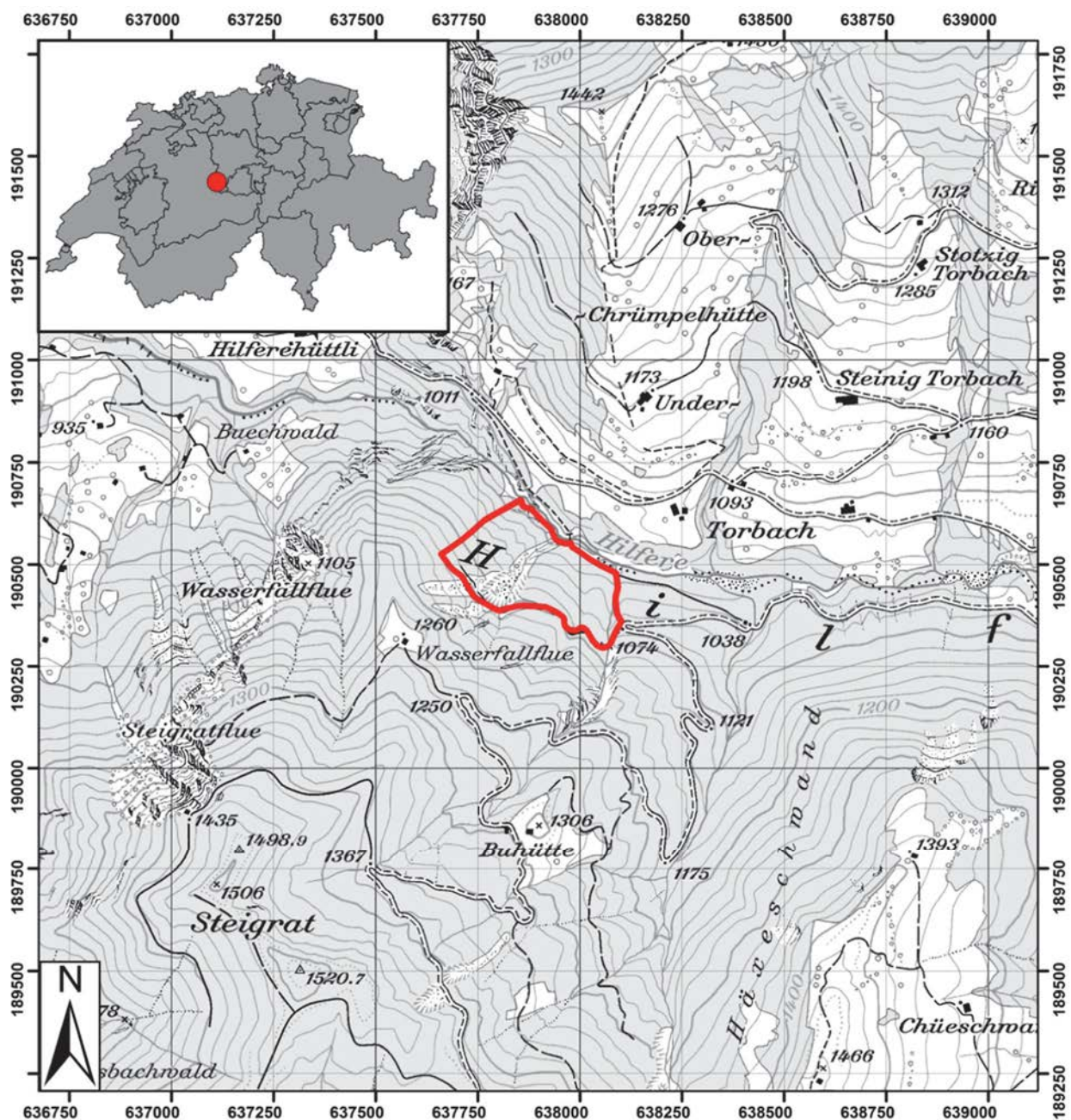


Abbildung 11: Versuchsfläche im Holzackerwald (Quelle: Condrau 2017)

3.3.2 Ausgangsdaten

Drohnendaten

Die Befliegung der Flächen mit der Drohne und die anschliessende Erstellung von DOM sowie nDOM erfolgte analog zum Vorgehen bei den Marteloskopflächen (vgl. Kapitel 3.2.2). Die Flughöhe und Bildüberlappungen wurden ebenfalls analog gewählt. Beim Holzhackerwald wurden zur besseren Auffindbarkeit die vorgesehenen Maschinenstandorte vor der Befliegung mit Kreuzen markiert.

Das nDOM wurde wiederum durch Abzug des DGM vom DOM erstellt und bildete die Grundlage für FINT, welches zur Einzelbaumerkennung auf den drei Flächen eingesetzt wurde. Die Anpassung der Rastergrössen des nDOM erfolgte iterativ. Dazu wurde die Rastergrösse einer für die Fläche repräsentative Stichprobe so lange angepasst, bis die Anzahl von FINT erkannter Bäume näherungsweise der Anzahl auf dem Orthophoto erkennbaren Bäumen entsprach. Dieses Vorgehen wurde gewählt, weil im Gegensatz zu den Marteloskopen, keine terrestrischen Vergleichsdaten vorhanden waren. Die optimale Rastergrösse lag für die Flächen bei: Buhütte 240cm, Huetgraben 110cm, Holzhackerwald 120cm. Für die Flächen Buhütte und Huetgraben wurde die Anpassung durch Mark Günter, für den Holzhackerwald im Rahmen einer Bachelorarbeit (Condrau 2017), durchgeführt. Eine Glättung des nDOM wurde auch hier nicht vorgenommen.

Die Ableitung der BHD erfolgte für alle Flächen mit FINT. Mit einer Stichprobe (Buhütte $n = 130$, Huetgraben $n = 106$, Holzhackerwald $n = 80$) wurde eine allometrische Funktion und Regressionskurve ermittelt. Die Stichprobe Buhütte wurde digital gewählt. Bei den Flächen Huetgraben und Holzhackerwald erfolgte eine terrestrische Messung von Bäumen zur Kalibrierung von FINT. Bei den Bäumen der Stichprobe Huetgraben und Holzhackerwald wurden Baumhöhe und BHD gemessen, weil im Gegensatz zu den Marteloskopflächen die Bäume nicht terrestrisch erfasst waren. Die ermittelten Regressionskurven sowie die allometrischen Gleichungen für die Versuchsflächen Huetgraben und Holzhackerwald befinden sich in Anhang B. Für die Fläche Buhütte wurde die Standardfunktion von Fint verwendet (Anhang B).

Die Fläche Buhütte wurde nach der Hiebsmassnahme erneut befliegen. Anhand der Differenz der beiden erstellten nDOM konnten die entnommenen Bäume dargestellt werden. Um Veränderungen aufgrund von Schneedruck oder Gipfelbruch nicht als Entnahme zu werten, wurde ein Filter eingebaut, so dass erst eine Differenz von 7m zwischen nDOM2017 und nDOM2016 als Entnahme betrachtet wurde. Sowohl durch die optische Betrachtung des Differenzbildes, als auch den Vergleich mit den Hiebsdaten, wurden Rückschlüsse auf die Genauigkeit und Praxistauglichkeit der Daten ermöglicht.

LiDAR-Daten von swisstopo und den Kantonen

Als Höhenmodell wurde das swissAlti^{3D} von swisstopo verwendet und durch neue LiDAR-Daten der Kantone ergänzt. Details zu den LiDAR-Rohdaten des Kantons Bern sind Kapitel 3.2.2 zu entnehmen. Die LiDAR-Daten von Luzern stammen aus dem Jahr 2012. Die hohe Punktdichte von ca. 5 Punkten pro Quadratmeter und die Genauigkeit des Lasers erlauben eine bisher unerreichte Informationsfülle. Als DGM wurden für beide Kantone die Rohdaten LAS, XYZCI ohne Wald, Gebäude und Kunstbauten verwendet.

3.3.3 Vorgehen zur Überprüfung der Praxistauglichkeit

Zur Überprüfung der Praxistauglichkeit wurden die zu beplanende Bewirtschaftungseinheit sowie betriebliche / verfahrenstechnische Vorgaben vom zuständigen Förster vorgegeben. Anschliessend

wurde die Befliegung mit der Drohne durchgeführt (analog Kapitel 3.2.2). Durch das im vorherigen Kapitel beschriebene Vorgehen wurden die Grundlagen für die Seillinienplanung geschaffen.

Zur Seillinienprojektierung wurden bestehende Programme / Lösungsansätze verglichen. Aufgrund dieser Analyse (Anhang C) wurde für die Buhütte das QGIS-Plug-In Seilaplan verwendet. Bei der Verwendung Buhütte hat sich gezeigt, dass das Programm noch nicht fehlerfrei läuft (Absturz bei Verwendung des gleichen Ausgangspunkts für alle 3 geplanten Seillinien, verschiedene Bugs). Deswegen wurde für die Flächen Huetgraben und Holzhackerwald mit SeilkranPROjekt gearbeitet.

Die Detailplanung der drei mit **Seilaplan** geplanten Seillinien erfolgte, indem das QGIS-Plug-In installiert wurde, welches anschliessend unter Erweiterungen verfügbar ist. Zusätzlich wurden die separaten Layer nDOM, DGM und das drohnengenerierte Orthophoto in QGIS hinzugefügt. Bei der Planung wurde die Skizze des zuständigen Försters (vgl. Anhang D) berücksichtigt. Konkret wurde in QGIS eine optische Ansprache durchgeführt, indem anhand des Orthophotos potenzielle Anker-, Stützenbäume in der Nähe der vorgesehenen Seillinie gesucht wurden. Die Machbarkeit der Seillinie wurde überprüft, indem die technischen Parameter der verwendeten Seilkrananlage in Seilaplan definiert wurden (Anhang D). Bei der Feldbegehung wurden Auffindbarkeit sowie qualitative Eignung der potenziellen Stützen- und Ankerbäume überprüft. Die Überprüfung der BHD bei Stützen- und Ankerbäumen wurde für die Linien 1 und 2 durchgeführt. Weiter wurde betrachtet, ob die Seillinien ohne Marschzahländerung abgesteckt werden können. Für die dritte Seillinie wurde diese Überprüfung aus Zeitgründen gutachterlich durchgeführt. Dabei wurde betrachtet, ob die Stützen- und Ankerbäume auffindbar und tauglich sind. Zusätzlich wurde bei der Geländebegehung geschaut, ob die auf dem drohnengenerierten Orthophoto erkennbaren Strukturelemente (Lücken, Verjüngung, innere Waldränder, Waldabschnitte mit hohem Vorrat etc.) im Gelände auffindbar sind.

Zur Detailplanung der Seillinien mit **SeilkranPROjekt** wurden das Orthomosaik der Drohnendaten, das DGM sowie die aus FINT generierten Stammfusskoordinaten und BHD als Shapefiles ins QGIS importiert. Weitere Inputdaten waren Maschinenstandorte, technische Daten des Seilkrans und die Hiebsfläche, welche durch die zuständigen Förster geliefert wurden. Mit dem Maschinenstandort war der Ausgangspunkt gegeben. Von diesem wurde eine Linie zu einem potenziellen Ankerbaum gezogen, um den Endpunkt zu definieren. Durch das Plug-In Tool von SeilkranPROjekt konnte mit dem DOM und der gezeichneten Linie ein Geländeprofil exportiert und in SeilkranPROjekt geöffnet werden. Darin wurden technische Parameter (Position und Höhe Kippmast, Ankertyp, Gesamtlast, Mindestbruchlast Tragseil, Spannkraft) angegeben. Mit Abschluss der Vorarbeiten begann die eigentliche Linienplanung. Die Linien wurden grafisch dargestellt und ihre technische Machbarkeit überprüft. Falls Stützen benötigt wurden, wurde der Ort der Stütze in SeilkranPROjekt bestimmt und in QGIS potenzielle Stützenbäume gesucht. Waren keine geeigneten Bäume vorhanden, musste die Linie verschoben und der Prozess wiederholt werden. Für die Fläche Huetgraben wurden zwei der insgesamt drei, für den Holzhackerwald vier der insgesamt neun Seillinien auf diese Weise beplant. Auch die mit SeilkranPROjekt beplanten Linien wurden mit einer Feldverifizierung überprüft. Es wurde auch hier betrachtet, ob die Seillinien ohne Änderung der Marschzahl abzustecken sind. Weiter wurde geschaut, ob die definierten Anker- und Stützenbäume auffindbar sind, die mit FINT berechneten BHD aufweisen und ihre Funktion erfüllen können.

Anschliessend an die Feldverifizierung wurden die erstellten Seillinienplanungen an die Förster übergeben, um die Anzeichnung vorzunehmen. Nach der Anzeichnung wurde die Tauglichkeit der drohnengestützten Methode bezüglich Qualität der Daten, Vorteil für die Anzeichnung und Hiebsdurchführung und Zeitgewinn / Kostenvorteil gegenüber herkömmlicher Trassierung beurteilen.

Zur Bestimmung der Vitalität der potenziellen Stützen- und Ankerbäume wäre ebenfalls denkbar, den normalisierten, differenzierten Vegetationsindex (NDVI) zu verwenden. Er wird aus den Reflexionswerten im nahen Infrarotbereich und denen des sichtbaren roten Bereichs errechnet und unterscheidet sich bei gesunder und kranker Vegetation. Auf die Bestimmung des NDVI wurde verzichtet, weil aufgrund der vorherrschenden / herrschenden Position der Stützen- und Ankerbäume eine hohe Vitalität der entsprechenden Bäume angenommen wurde und bei der Feldbegehung bestätigt werden konnte. Konkret wurden während der Feldbegehung folgende Hypothesen untersucht:

Hypothese 6: Die Genauigkeit der drohnengenerierten DOM und daraus abgeleiteten Stammfusskoordinaten, welche anschliessend mit dem Projektierungsprogramm dargestellt wurden, reicht für die Planung der Seillinien im Gelände aus.

Hypothese 7: Die auf Basis der Drohnenbefliegung bestimmten Stützen- und Ankerbäume können ihre Funktion erfüllen.

Hypothese 8: Für die waldbauliche und forsttechnische Planung notwendige Strukturelemente sind auf den Drohnenbildern erkennbar und bei der Feldbegehung auffindbar.

Hypothese 9: Dem Differenzbild, welches durch die Befliegung vor und nach der Hiebsmassnahme erstellt wird, können zusätzliche Informationen entnommen werden, welche Rückschlüsse zum ausgeführten Hieb erlauben.

3.4 Überprüfung des Einflusses verschiedener Flughöhen und Genauigkeitsvergleich swisstopo- und Drohnendaten

Die Überprüfung der Praxistauglichkeit zeigte, dass die Markierung der Maschinenstandorte wertvoll ist, um den exakten Startpunkt der Seillinie bestimmen und Leerläufe verhindern zu können. Ohne diesen muss die erste Stütze aufgesucht und von dieser zurück trassiert werden, um den exakten Startpunkt zu bestimmen oder alternativ vom Ankerbaum her mit der Trassierung begonnen werden. Weil die Markierungen in der Fläche Holzhackerwald nicht alle auffindbar waren, sollte überprüft werden, ob die Flughöhe einen Einfluss auf die Sichtbarkeit der Markierung der Maschinenstandorte hat. Dazu wurde bei der Marteloskopfläche Williwald am Boden ein weisses Kreuz (30cm x 100cm) angebracht, um den Maschinenstandort zu simulieren. Anschliessend wurde die Befliegung des Marteloskops auf 100m, 140m und 180m Flughöhe durchgeführt. Eine Befliegung unter 100m Flughöhe wurde aus Risikoüberlegungen und weil von der Gesetzeslage her auf Sicht geflogen werden muss, nicht durchgeführt.

Die Versuche wurden zusätzlich genutzt, um die Genauigkeit des drohnengenerierten DOM mit dem DOM von swisstopo zu vergleichen. Um Aussagen zur Genauigkeit der DOM zu ergänzen, wurden zusätzlich Bilder aus der Befliegung der Buhütte verglichen.

Weiter wurde überprüft, ob sich die Detektionsraten von FINT durch die Reduktion der Flughöhe verändern. Konkret wurden folgende Hypothesen überprüft:

Hypothese 10: Durch die Reduktion der Flughöhe wird die Qualität der drohnengenerierten Bilder positiv beeinflusst und die Sichtbarkeit von am Boden angebrachten Markierungen sowie Strukturelementen des Waldes verbessert.

Hypothese 11: Die Qualität des anhand der Drohnenbefliegung erstellten DOM ist ähnlich, wie die des DOM von swisstopo und kann somit für die Planung in der Praxis verwendet werden.

Zur Beurteilung der Tauglichkeit wurde ein optischer Vergleich des swisstopo-DOM und des drohnengenerierten DOM durchgeführt. Weil bereits dieser Vergleich die für den Projektverlauf entscheidenden Schlüsse erlaubte, wurde auf eine statistische Belegung der Aussage verzichtet.

Hypothese 12: Durch eine Reduktion der Flughöhe verändert sich die Detektionsrate von FINT nur geringfügig.

4 Ergebnisse

Der Aufbau des Ergebniskapitels orientiert sich am Kapitel Material und Methoden. Dementsprechend werden zuerst die Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse, anschliessend die Praxistauglichkeit und abschliessend die Flughöhenversuche präsentiert.

4.1 Genauigkeitsanalyse

4.1.1 Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT und LiForest

Marteloskop Williwald

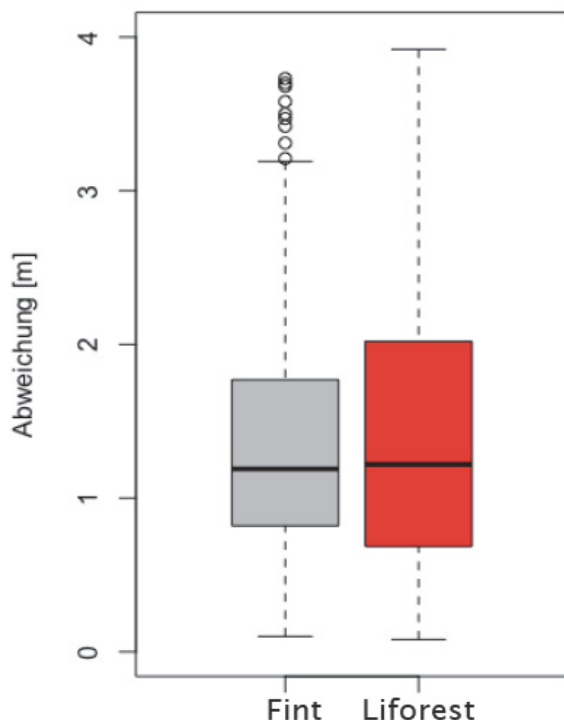


Abbildung 12: Boxplots Abweichung der Stammfusskoordinaten von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald (n=151) (Condrau 2017)

Die Vollständigkeit und Korrektheit der detektierten Bäume war für FINT im Williwald höher als für LiForest (FINT: 66.3% / 69.6%; LiForest 61.1% / 64.6%).

Bei FINT lag die Abweichung der Stammfusskoordinaten im Vergleich zu den terrestrisch erhobenen Daten zwischen 0.1 und 3.73m. Für LiForest lagen die Werte zwischen 0.08 und 3.92m. Der arithmetische Mittelwert der Abweichung war bei den Programmen nahezu identisch (FINT 1.37m, LiForest 1.39m). Genauso verhält es sich mit dem Median (FINT 1.19m, LiForest 1.22m). Weiter ist in Abbildung 12 erkennbar, dass die Boxplots der gepaarten Daten ähnlich sind. Die Werte für Q25 und Q75 liegen für FINT bei 0.82m und 1.77m, während sie bei LiForest mit 0.69m und 2.02m etwas weiter auseinander liegen. Konkret bedeutet dies, dass die mittleren 50% der Werte bei FINT weniger voneinander abweichen, als bei LiForest. Die Standardabweichung für FINT war geringer (FINT: 0.805m, LiForest 0.896m).

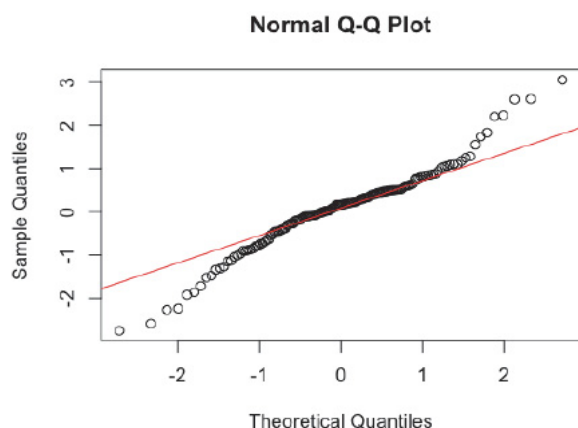


Abbildung 13: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)

Das Normal-Q-Q-Diagramm der Differenzen der Abweichungen von LiForest und FINT (Abbildung 13) lässt die Normalverteilung, welche mit dem Shapiro-Wilk-Test ($p < 0.001$) bestätigt werden konnte, bereits vermuten. Deswegen wurde die Signifikanz der Unterschiede mit dem nicht-parametrischen Wilcoxon-Signed-Rank-Test geprüft. Die Resultate konnten keinen signifikanten Unterschied zwischen FINT und LiForest belegen ($P = 0.089$; Tabelle 2).

Tabelle 2: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald und verwendeter statistischer Test (Condrau 2017, eigene Darstellung)

	n	min	max	Mittelwert	Median	SD	Verwendeter Test
FINT	199	0.1	3.73	1.37	1.19	0.805	Wilcoxon Signed Rank (zweiseitig)
LiForest	183	0.08	3.92	1.39	1.22	0.896	P=0.089

Marteloskop Rona

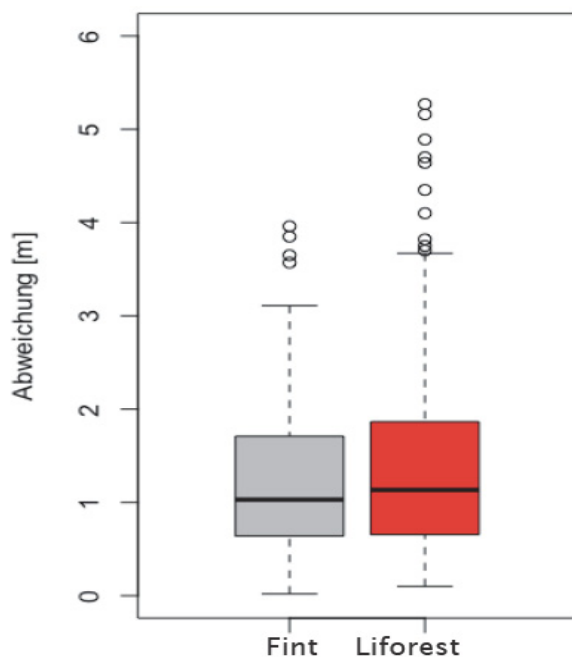


Abbildung 14: Boxplots Abweichung der Stammfusskoordinaten von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen in Rona (n=215) (Condrau 2017)

Die Vollständigkeit und Korrektheit der detektierten Bäume war bei FINT (64.9%, 43%) niedriger als bei LiForest (75.4% resp. 47.4%). Bei FINT lag die Abweichung der Stammfusskoordinaten im Vergleich zu den terrestrisch erhobenen Daten zwischen 0.02 und 3.96m. Für LiForest lagen die Werte mit 0.1 bis 5.27m weiter auseinander (Abbildung 14). Mittelwert und Median der Abweichung waren bei FINT mit 1.24 bzw. 1.03m geringer als bei LiForest mit 2.1 bzw. 1.41m. Die Boxplots der gepaarten Daten für das untersuchte Merkmal sind annähernd gleich (FINT: Q25 = 0.64m bzw. Q75 = 1.71m; LiForest: Q25 = 0.65m, Q75 = 1.86m). Unterschiede sind in der Anzahl Ausreisser erkennbar, welche bei LiForest deutlich höher ist und stärker streut. Die Standardabweichung war bei FINT geringer als bei LiForest (FINT: 0.81m, LiForest: 1.02m).

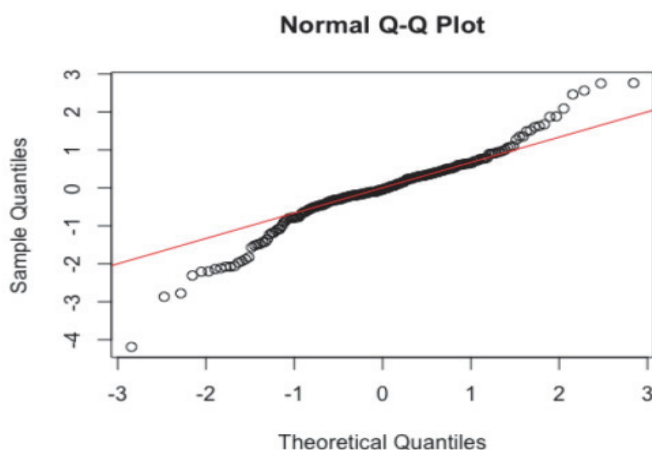


Abbildung 15: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)

Anhand des Normal-Q-Q-Plots (Abbildung 15) und dem Ergebnis des Shapiro-Wilk Tests ($P < 0.01$) konnte die Normalverteilung der Daten verworfen werden. Mit dem Wilcoxon-Signed-Rank-Test konnten auch bei den Stammfusskoordinaten der Marteloskopfläche Rona keine signifikanten Unterschiede zwischen den Programmen FINT und LiForest nachgewiesen werden ($P=0.875$; Tabelle 3).

Tabelle 3: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im Williwald und verwendeter statistischer Test (Condrau 2017, eigene Darstellung)

	n	min	max	Mittelwert	Median	SD	Verwendeter Test
FINT	241	0.02	3.96	1.24	1.03	0.81	Wilcoxon Signed Rank (zweiseitig)
LiForest	280	0.1	5.27	1.41	1.13	1.02	P=0.875

4.1.2 Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT im Vergleich zum IT-gestützten terrestrischen Laserscanning

Die IT-gestützte TLS-Methode der RWTH Aachen erbrachte im Williwald die in Abbildung 16 dargestellten Resultate. Zur Attributierung und Bestandsaufnahme wurden lediglich die 2D-Laserscannerdaten genutzt, da die Stereokameradaten keine signifikante Verbesserung der Aufnahmeparameter erbrachten. Aufgrund des dichten Unterwuchses auf Teilen der Fläche und der Belaubung zum Aufnahmezeitpunkt im Frühling 2017 konnte nicht die gesamte Fläche mit der Lokalisierungseinheit durchschritten werden (RWTH Aachen 2017).

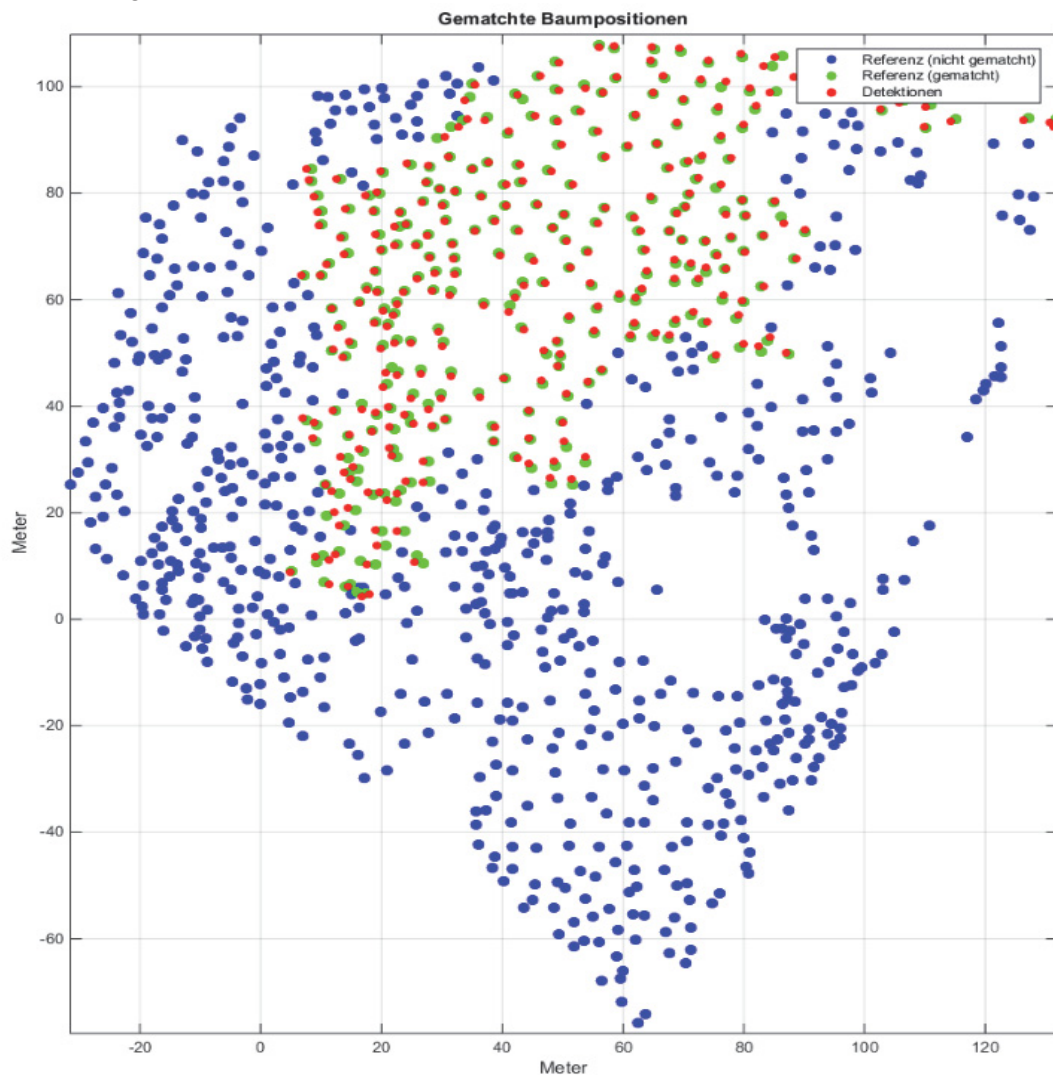


Abbildung 16: Gegenüberstellung der mit der Lokalisierungseinheit erfassten und kartierten Bäume (rot) mit den herkömmlich terrestrisch erfassten Bäumen (grün = Übereinstimmung, blau = nicht detektiert von der Lokalisierungseinheit) im Williwald (Quelle: RWTH Aachen 2017)

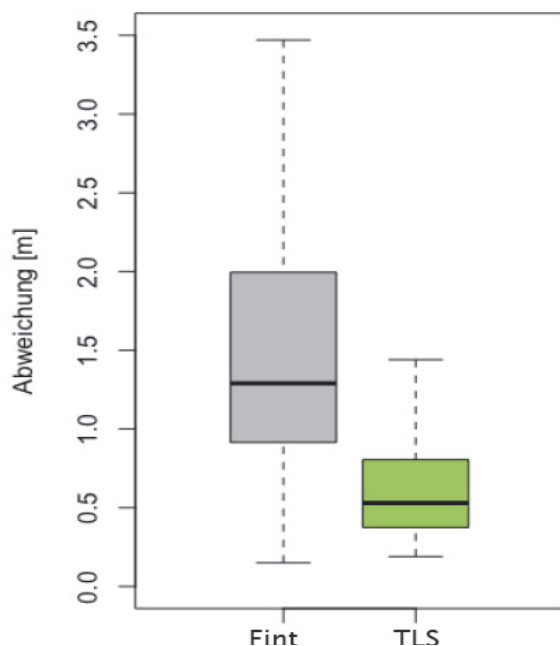


Abbildung 17: Boxplots der Abweichung der Stammfusskoordinaten für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren im mit der Lokalisierungseinheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald (n=52) (Condrau 2017)

Die Vollständigkeit des IT-gestützten TLS-Verfahrens lag lediglich bei 28.5%, dessen Korrektheit hingegen bei 100%. Die Abweichung der Stammfusskoordinaten lag im mit der Lokalisierungseinheit aufgenommenen Perimeter für FINT zwischen 0.15 und 3.47m. Das TLS-Verfahren wies Abweichungen von 0.19 bis 1.44m auf (Tabelle 4). Median und Mittelwert für FINT waren deutlich höher als beim TLS (FINT: 1.29m resp. 1.5m; LiForest: 0.63m resp. 0.53m). Auch die Boxplots der beiden Verfahren unterscheiden sich deutlich (Abbildung 17). Bei FINT liegen die Werte für Q25 und Q75 deutlich höher (FINT: 0.92m, 1.91m; TLS: 0.38m, 0.79m). An diesem grösseren Interquartilabstand von FINT ist ersichtlich, dass die Abweichungen eine grössere Streuung als beim IT-gestützten TLS-Verfahren aufweisen.

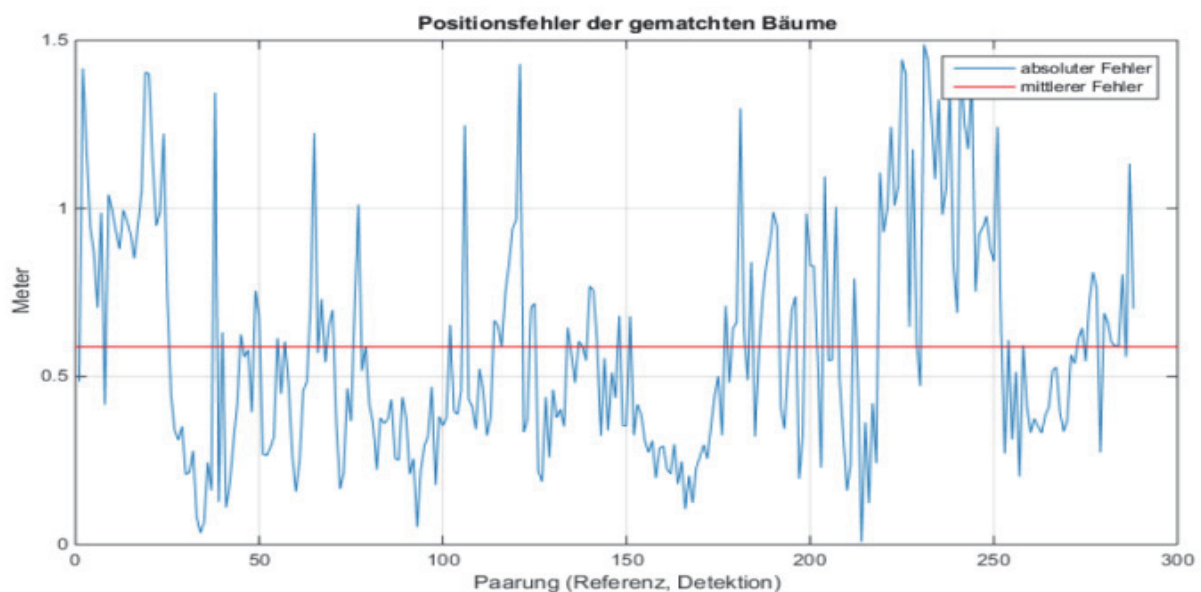
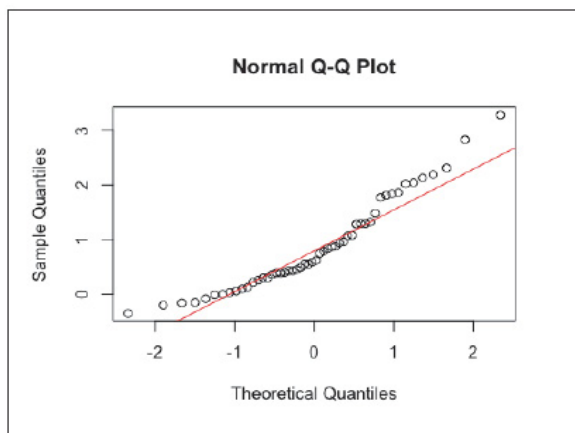


Abbildung 18: Positionsfehler des IT-gestützten TLS-Verfahrens (als Referenzdaten wurden die manuell erfassten terrestrischen Daten des Marteloskops verwendet) (Quelle: RWTH Aachen 2017)

In Abbildung 18 wird der mittlere Positionsfehler (Median) des TLS-Verfahrens dargestellt. Auf der x-Achse ist die Anzahl gematchter Bäume abgebildet, auf der y-Achse die Abweichung von den terrestrischen Referenzbäumen. Im Mittel lag die Positionsabweichung bei etwas mehr als einem halben Meter. Weil der Positionsfehler der Einzelbäume in der Referenzkarte einen vergleichbaren Wert aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass der effektive Fehler der aufgenommenen Baumpositionen tatsächlich unter einem halben Meter liegt. Die hohe Anzahl Paarungen (ca. 290)

ergibt sich daraus, dass die Bäume beim Durchschreiten des Marteloskops teils mehrere Male aus verschiedenen Entfernungen detektiert wurden.



Die statistische Analyse ergab eine signifikant höhere Abweichung von FINT (zweiseitiger Wilcoxon-Signed-Rank-Test $P < 0.001$) und bestätigte, was der Normal-Q-Q-Plot (Abbildung 19) bereits andeutete. Der verwendete Shapiro-Wilk-Test lag unter 0.05, womit für die Daten keine Normalverteilung gegeben war.

Konkret bedeuten die erhaltenen Werte, dass die Genauigkeit des IT-gestützten TLS-Verfahrens signifikant höher ist, als diejenige von FINT.

Abbildung 19: Normal-Q-Q-Plot der Differenzen von den Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren im mit der Lokalisierungseinheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald (Condrau 2017)

Tabelle 4: Statistische Kennwerte Abweichung Stammfusskoordinaten [m] von den herkömmlich terrestrischen Aufnahmen im mit der Lokalisierungseinheit durchschrittenen Bereich des Marteloskops Williwald für FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren sowie Testergebnis (Condrau 2017)

	n	min	max	Mittelwert	Median	SD	Verwendeter Test
FINT	52	0.15	3.47	1.5	1.29	0.816	Wilcoxon Signed Rank (zweiseitig)
TLS	52	0.19	1.44	0.63	0.53	0.334	$P < 0.001$

4.1.3 Korrelation der Genauigkeit der Stammfusskoordinaten mit den sozialen Klassen nach Kraft

Bereits die Säulendiagramme der erfassten bzw. nicht erfassten Bäume nach BHD für den Williwald (Abbildung 20) liessen einen Einfluss der Kraft'schen Baumklassen auf die Detektionsrate für FINT und LiForest vermuten. 33% (FINT) der nicht detektierten Bäume bzw. 26% (LiForest) wiesen einen BHD unter 22cm auf.

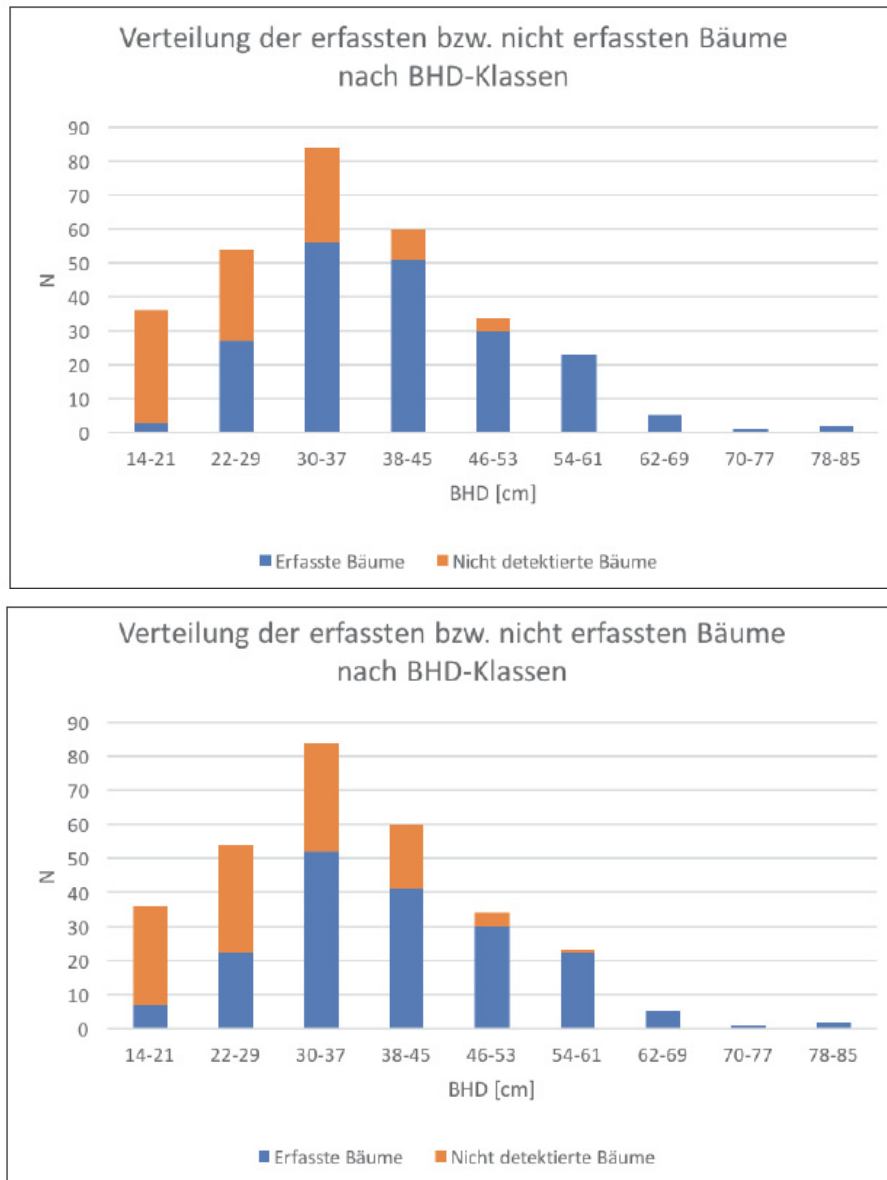


Abbildung 20: Verteilung der erfassten / nicht erfassten Bäume nach BHD für FINT (oben) und LiForest (unten) im Marteloskop Williwald (Condrau 2017)

In Rona wiesen deutlich mehr nicht detektierte Bäume einen BHD unter 22cm auf (FINT: 60%, LiForest 65%, Abbildung 21).

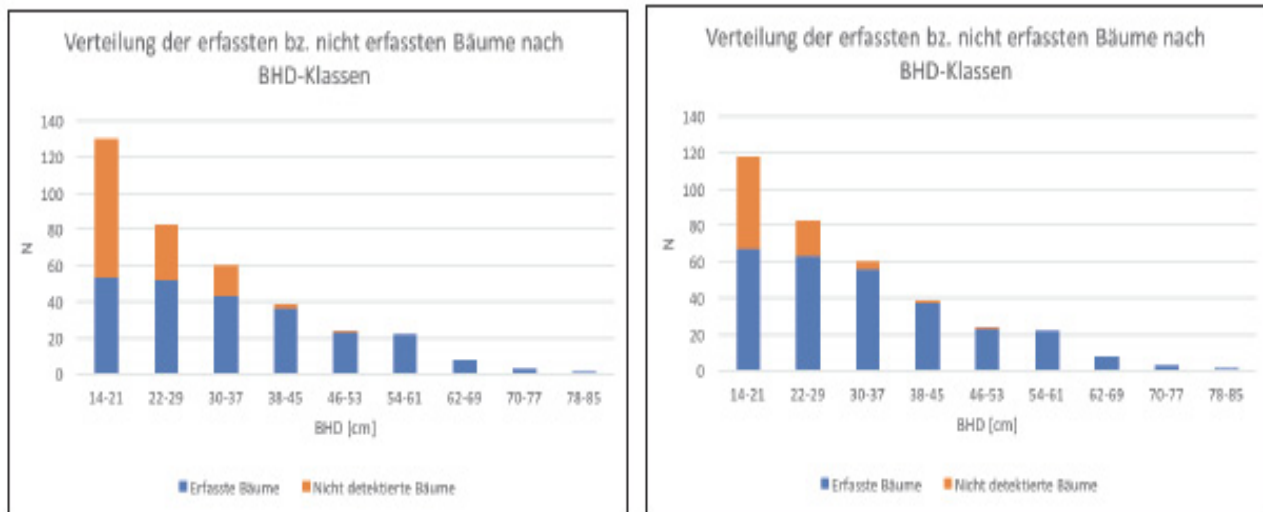


Abbildung 21 : Verteilung der erfassten bzw. nicht erfassten Bäume nach BHD für FINT (links) und LiForest (rechts) im Marteloskop Rona (Condrau 2017)

Aufgrund dieser Erkenntnis lag der Schluss nahe, dass die soziale Klasse der Bäume einen Einfluss auf die Detektionsrate hat. Deswegen wurde für die Analyse der generierten Stammfusskoordinaten die Einteilung in die Kraft'schen Baumklassen vorgenommen.

Williwald

Die Analyse im Williwald (Kapitel 4.1.1) ergab, dass 70% (FINT) resp. 65% (LiForest) der nicht detektierten Bäume den sozialen Klassen unterdrückt oder beherrscht angehörten (Abbildung 22).

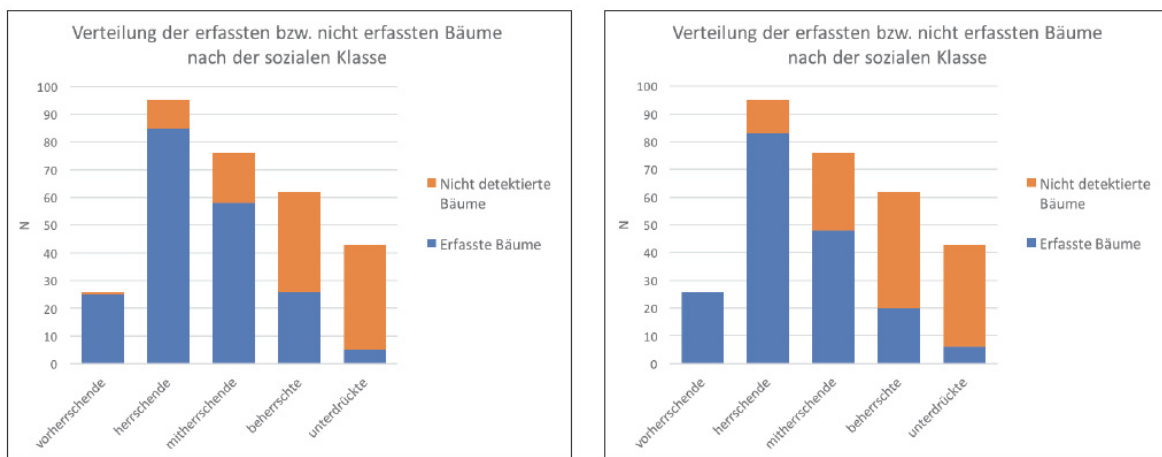


Abbildung 22: Von FINT (links) und LiForest (rechts) detektierte bzw. nicht detektierte Bäume im Williwald unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017)

Die statistischen Kennwerte der Analyse sind in Tabelle 5 zusammengefasst. In der Klasse der „herrschenden“ Bäume wurde der Wilcoxon-Signed-Rank-Test durchgeführt, weil die Bedingung der Normalverteilung nicht erfüllt wurde. Für alle anderen sozialen Klassen konnte der t-Test für gepaarte Daten verwendet werden.

Tabelle 5: Statistische Kennwerte und verwendete Tests zur Abweichung der Stammfusskoordinaten in Metern für FINT und LiForest in der Marteloskopfläche Williwald unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017, verändert)

Kraft'sche Klasse	Programm	n	n _{gem.}	min	max	Mittelwert	Median	SD	Verwendeter Test und Testresultate	
0	FINT	25	25	0.1	3	0.91	0.81	0.614	t-Test	
	LiForest	26		0.19	2.84	0.91	0.72	0.676	T=0.142	P=0.888
1	FINT	85	76	0.12	3.73	1.37	1.17	0.785	Wilcoxon-Signed-Rank	
	LiForest	83		0.11	3.2	1.36	1.19	0.816	P=0.065	
2	FINT	58	37	0.15	3.7	1.42	1.19	0.868	t-Test	
	LiForest	48		0.08	3.8	1.63	1.55	1.052	T=0.057	P=0.955
3	FINT	26	13	0.38	3.31	1.60	1.54	0.753	t-Test	
	LiForest	20		0.26	3.92	1.62	1.65	0.938	T=-0.273	P=0.789
4	FINT	5	0	1.19	2.71	1.99	2.19	0.660	t-Test	
	LiForest	6		0.77	2.16	1.35	1.17	0.511	Stichprobe zu klein	

Die Testresultate ergaben bei sämtlichen Tests Werte über 0.05. Somit war bei keiner sozialen Klasse bei 95%-Vertauensintervall ein signifikanter Unterschied zwischen LiForest und FINT gegeben.

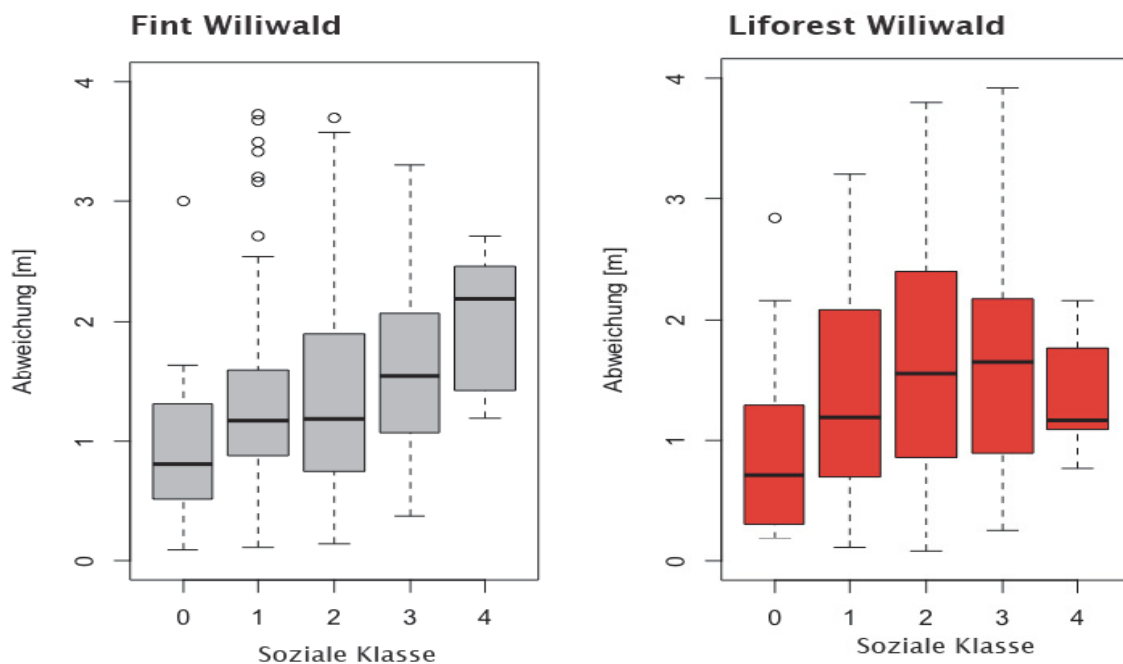


Abbildung 23: Boxplots zur Abweichung der Stammfusskoordinaten unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen für FINT (n = 25 (0), 85 (1), 58 (2), 26 (3), 5 (4)) und LiForest (n= 26 (0), 83 (1), 48 (2), 20 (3), 6 (4)) im Marteloskop Williwald (Condrau 2017, verändert).

Der Median der Abweichungen war bei FINT und LiForest bei den vorherrschenden Bäumen am geringsten. Für beide Programme nimmt er bis zur Klasse beherrscht (3) zu (Abbildung 23; Tabelle 5).

Anhand des Kruskal-Wallis-Tests konnte der signifikante Einfluss des Faktors „Kraft'sche Baumklasse“ auf die Abweichung der Stammfusskoordinaten nachgewiesen werden (FINT: $H=17.157$, $df = 4$, $p = 0.002$; LiForest: $H = 11.88$, $df = 4$, $p = 0.018$). Die Analyse mit dem Dunn-Test mit Bonferroni-Korrektur ergab bei beiden Programmen, dass die vorherrschende Klasse signifikant

tieferer Abweichungen aufweist, als die Abweichungen der anderen Kraft'schen Baumklassen (Tabelle 6). Der Unterschied zwischen den anderen Kraft'schen Baumklassen war nicht signifikant. Die Resultate des Dunn-Tests bei der Kraft'schen Baumklasse «unterdrückt» (4) sind aufgrund der geringen Stichprobengrösse vorsichtig zu interpretieren. Mit dem Dunn-Test konnte bestätigt werden, was sich mit den Boxplots bereits abzeichnete - die Abweichungen der Stammsfußkoordinaten korrelieren mit den Kraft'schen Klassen.

Tabelle 6: Ergebnisse Dunn-Test für FINT und LiForest im Marteloskop Williwald (Condrau 2017, verändert)

Vergleich sozialer Klassen	Resultate t-Test FINT	Resultate t-Test LiForest
1-0	0.003	0.072
2-0	0.036	0.007
3-0	0.002	0.029
4-0	0.010	0.669
2-1	1	1
3-1	0.515	1
4-1	0.265	1
3-2	0.719	1
4-2	0.310	1
4-3	1	1

Rona

In Rona gehörten sowohl bei FINT als auch LiForest 75% der nicht detektierten Bäume zu den Kraft'schen Klassen beherrscht oder unterdrückt (Abbildung 24).

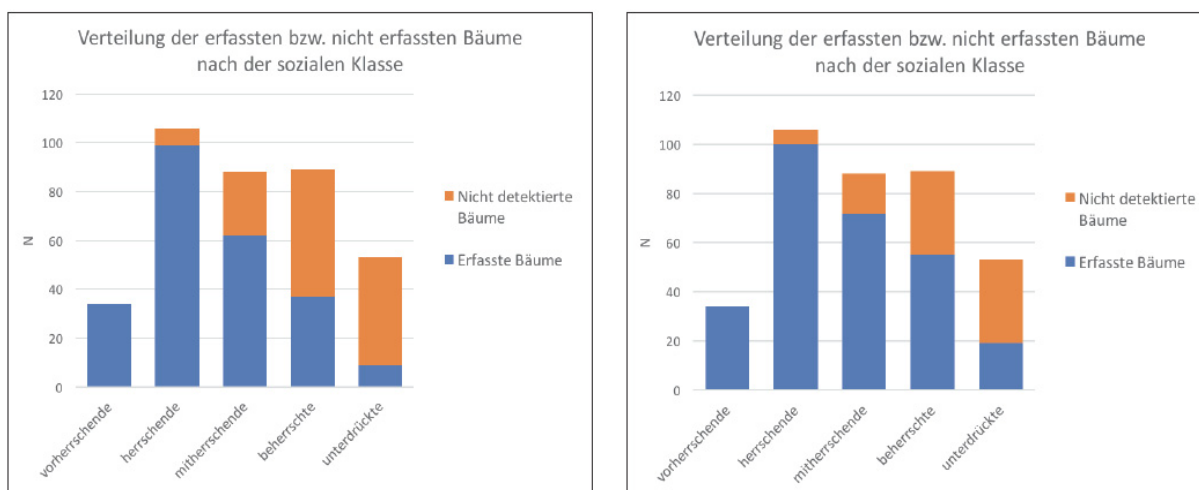


Abbildung 24: Durch FINT (links) und LiForest (rechts) detektierte bzw. nicht detektierte Bäume in Rona unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017)

Die statistischen Kennwerte der Analyse sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Für die Kraft'schen Klassen vorherrschend, herrschend und beherrscht waren die Daten normalverteilt. Für die Klasse mitherrschend war die Normalverteilung nicht gegeben (Shapiro-Wilk-Test $p < 0.01$). Bei den unterdrückten Bäumen konnte aufgrund der geringen Anzahl Bäume, welche von beiden Programmen

erkannt wurden (n=4), keine statistische Analyse durchgeführt werden. Der Vergleich der Boxplots von FINT und LiForest deutet auf eine geringere Abweichung von FINT bei den unterdrückten Bäumen hin.

Tabelle 7: Statistische Kennwerte und verwendete Tests zur Abweichung der Stammfusskoordinaten in Metern für FINT und LiForest in der Marteloskopfläche Rona unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen (Condrau 2017, verändert)

Kraft'sche Klasse	Programm	n	n _{gem}	min	max	Mittelwert	Median	SD	Verwendeter Test und Testresultate	
0	FINT	34	34	0.02	2.54	0.93	0.76	0.678	t-Test	
	LiForest	34		0.1	2.64	0.79	0.67	0.575	T=1.237	P=0.225
1	FINT	99	95	0.09	3.65	0.91	0.83	0.567	t-Test	
	LiForest	100		0.17	3.51	1.08	0.95	0.698	T= 1.773	P= 0.079
2	FINT	62	54	0.15	3.96	1.51	1.23	0.926	Wilcoxon-Signed-Rank	
	LiForest	72		0.13	4.35	1.50	1.47	0.947	P=1	
3	FINT	37	28	0.34	3.85	1.88	1.97	0.807	t-Test	
	LiForest	55		0.11	4.89	1.89	1.63	1.142	T=-0.047	P=0.963
4	FINT	9	4	0.74	3.92	2.01	1.84	0.995	t-Test	
	LiForest	19		0.9	5.27	2.96	2.75	1.486	Stichprobe zu klein	

Gemäss den Resultaten des t-Test für gepaarte Daten bzw. des Wilcoxon-Signed-Rank-Tests besteht bei einem Vertrauensintervall von 95% für keine soziale Klasse eine Signifikanz zwischen den Programmen FINT und LiForest.

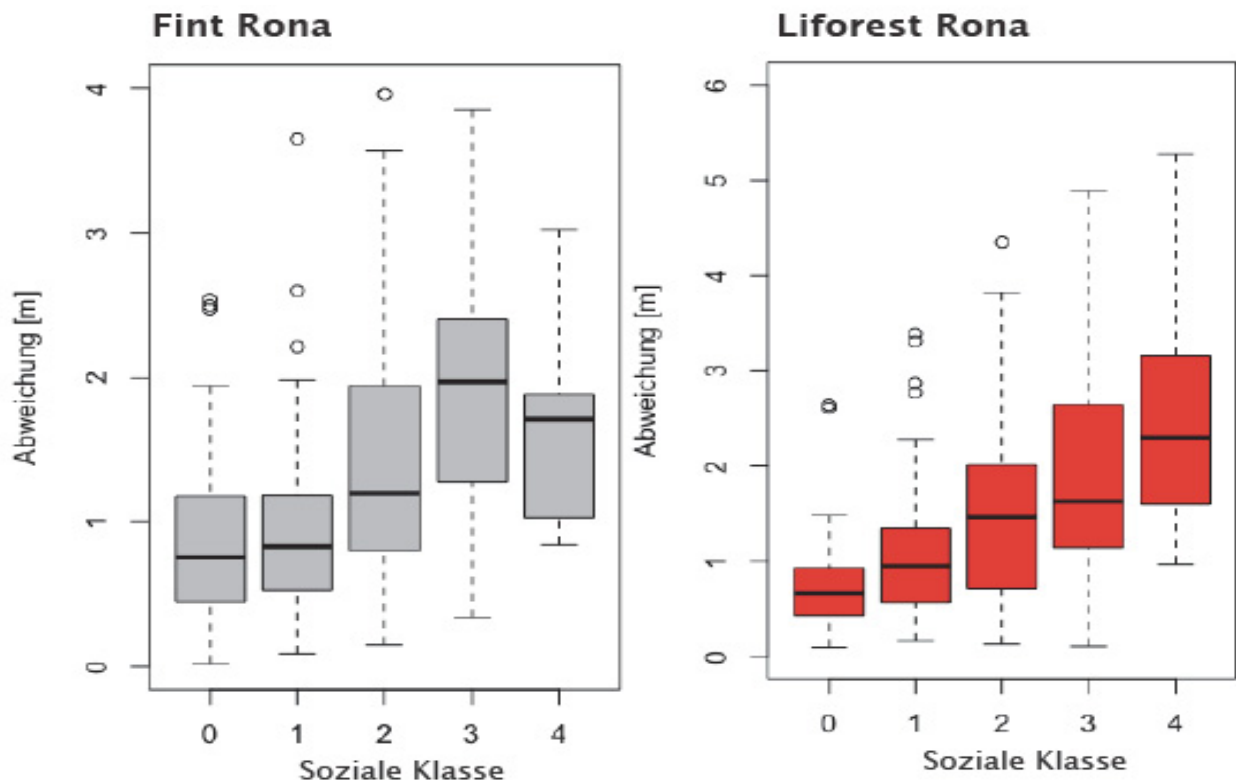


Abbildung 25: Boxplots zur Abweichung der Stammfusskoordinaten unterteilt nach Kraft'schen Baumklassen für FINT (n = 34 (0), 99 (1), 62 (2), 37 (3), 9 (4)) und LiForest (n= 34 (0), 100 (1), 72 (2), 55 (3), 19 (4)) im Marteloskop Rona (Condrau 2017, verändert).

In Rona wiesen die Mediane der Abweichungen der Stammfusskoordinaten klassiert nach Kraft'schen Baumklassen weniger deutliche Tendenzen auf, als im Williwald (vgl. Abbildungen 23 und 25). Mit dem Kruskal-Wallis-Test konnte ein signifikanter Einfluss der „Kraft'schen Klasse“ auf die Abweichung der Stammfusskoordinaten aufgezeigt werden ($H = 62.337$, $df = 4$, $p < 0.001$). Die anschliessende Analyse mit dem Dunn-Test mit Bonferroni Korrektur konnte bei **FINT** für die Klasse vorherrschend signifikant kleinere Abweichungen als für die Klassen mitherrschend, beherrscht und unterdrückt aufzeigen (Tabelle 8). Der Median der Klasse herrschend hingegen unterschied sich nicht signifikant von dem der vorherrschenden Klasse. Signifikante Unterschiede waren zwischen der Klasse herrschend und den Klassen mitherrschend, beherrscht und unterdrückt erkennbar. Abbildung 22 visualisiert dieses Ergebnis, indem bei der vorherrschenden und herrschenden Klasse von FINT ähnliche Quantile und Mediane ersichtlich sind. Erahnen lässt sich, dass mit abnehmender Dominanz der Bäume die Abweichung der Stammfusskoordinaten zunimmt.

Die anhand der Resultate von **LiForest** erstellten Boxplots (Abbildung 25 rechts) zeigen, dass sich die Mediane der einzelnen Kraft'schen Klassen deutlich unterscheiden. Dies und die Zunahme des Interquartilabstands lassen darauf schliessen, dass eine Korrelation zwischen der Kraft'schen Klasse und der Abweichung der Stammfusskoordinaten besteht. Diese Annahme konnte anhand des Kruskal-Wallis-Tests bestätigt werden ($H = 78.38$, $df = 4$, $p < 0.0001$). Mit dem Dunn-Test (Tabelle 8) konnte gezeigt werden, dass zwischen allen Kraft'schen Baumklassen ausser zwischen vorherrschend zu herrschend und mitherrschend zu beherrscht ein signifikanter Unterschied besteht.

Tabelle 8: Ergebnisse Dunn-Test für FINT und LiForest im Marteloskop Rona (Condrau 2017, verändert)

Vergleich sozialer Klassen	Resultate t-Test FINT	Resultate t-Test LiForest
1-0	1	0.254
2-0	0.006	0.000
3-0	0.000	0.000
4-0	0.000	0.000
2-1	0.000	0.018
3-1	0.000	0.000
4-1	0.000	0.000
3-2	0.079	0.408
4-2	0.150	0.000
4-3	1	0.012

4.1.4 Genauigkeit der durch FINT und LiForest abgeleiteten BHD

Williwald

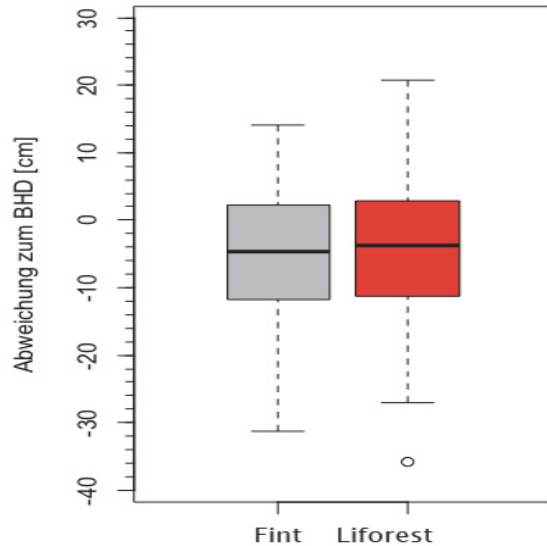


Abbildung 26: Boxplots Abweichung der mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD von den terrestrischen Vergleichsdaten für das Marteloskop Williwald (n=151) (Condrau 2017)

Sowohl bei FINT als auch bei LiForest wichen die abgeleiteten BHD im Vergleich zu den terrestrischen Daten teils stark ab (FINT: -31.3cm, 17.3cm; LiForest: -26.8cm, 19.9cm). Die Mittelwerte und Mediane der BHD-Abweichungen lagen bei ca. -4cm (FINT: -4.6cm, -4.2cm; LiForest: -4.5cm, -3.8cm). Die Boxplots von Fint und Liforest sind sehr ähnlich (Abbildung 26, FINT: Q25 - 11.4cm, Q75 2.2cm; LiForest Q25 -10.3cm, 1.8cm). Der berechnete Standardfehler ist nahezu identisch (Tabelle 9) Der RMSE liegt bei LiForest um rund 1.6cm höher als bei FINT (FINT: 10.5cm, LiForest 12.1cm).

Tabelle 9: Statistische Kennwerte zur Abweichung des BHD von den terrestrischen Referenzdaten für die Versuchsfläche Williwald [cm] (Condrau 2017, verändert)

	n	ngem	min	max	Mittelwert	Median	SD	Resultate RMSE
FINT	199	151	-31.3	17.3	-4.6	-4.5	9.405	10.5
LiForest	183		-26.8	19.9	-4.2	-3.8	9.124	12.1

Rona

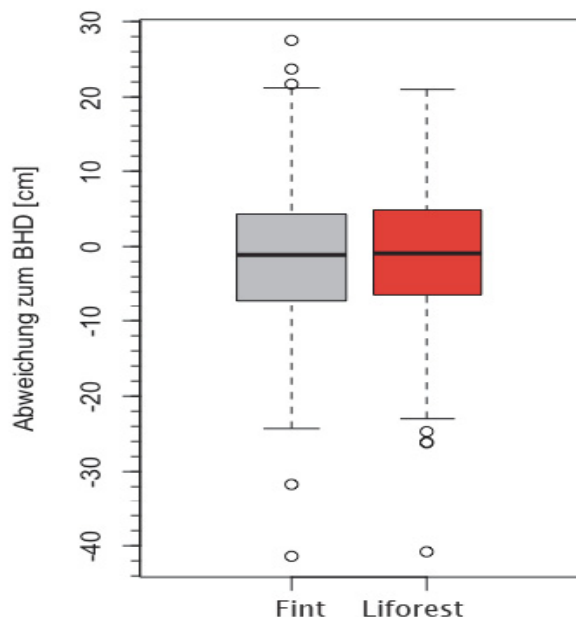


Abbildung 27: Boxplots Abweichung der mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD von den terrestrischen Vergleichsdaten für das Marteloskop Rona (n=215)

In Rona streuten die BHD-Abweichungen noch stärker als im Marteloskop Williwald (FINT: -41.7cm, 27.3cm; LiForest: -41cm, 21cm). Die Mittelwerte und Mediane der Abweichungen waren hingegen deutlich geringer und wichen nur wenig voneinander ab (FINT: -0.8cm, -0.4cm; LiForest: -0.9cm, -0.5cm). Die Boxplots sind wiederum sehr ähnlich (FINT: Q25 -6.7cm, Q75 5.6cm; LiForest: -5.9cm, 5.2cm). 50% der Daten weisen somit maximal eine Abweichung von 7cm gegenüber den terrestrischen Messungen auf. Der RMSE ist verglichen mit der Marteloskopfläche Williwald ebenfalls etwas geringer (FINT: 9.1cm, LiForest 8.7cm).

Tabelle 10: Statistische Kennwerte zur Abweichung des BHD von den terrestrischen Referenzdaten für die Versuchsfläche Rona (Alle Angaben in [cm]) (Condrau 2017, verändert)

	n	n _{gem}	min	max	Mittelwert	Median	SD	Resultate RMSE
FINT	241	215	-41.7	27.3	-0.8	-0.4	9.081	9.1
LiForest	280		-41	21	-0.9	-0.5	8.793	8.7

4.1.5 Vergleich von FINT und LiForest bezüglich der mittleren Abweichung der generierten Stammfusskoordinaten

FINT

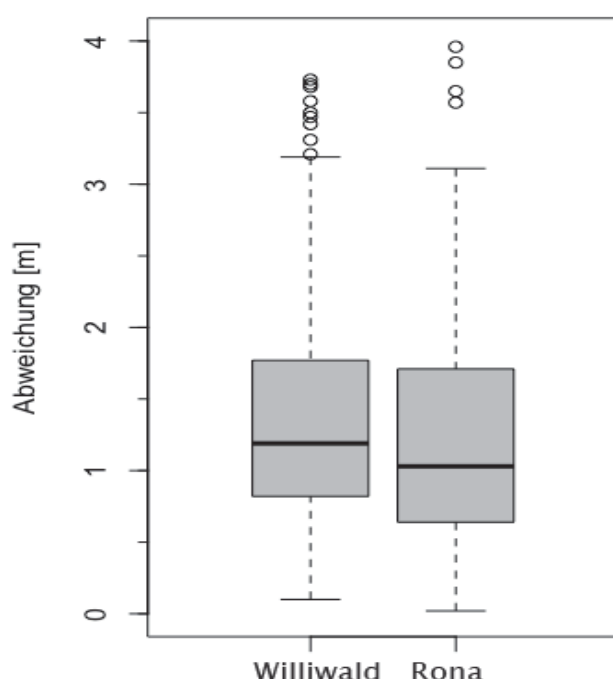


Abbildung 28: Boxplots zum Vergleich der Abweichung der Stammfusskoordinaten von FINT für die Marteloskope Williwald und Rona (Condrau 2017)

Die Abweichungen der Stammfusskoordinaten für FINT wurden in Kapitel 4.1.1 beschrieben und sind in Tabelle 11 zusammengefasst. Die beiden Boxplots von FINT sind ähnlich (Abbildung 28) und auch die statistischen Kennwerte weichen nur geringfügig voneinander ab.

Die statistische Analyse der nicht normalverteilten Daten (Shapiro-Wilk-Test, $P_{\text{Williwald}} < 0.001$, $P_{\text{Rona}} < 0.001$) mit dem zweiseitigen Wilcoxon-Sum-Test ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den Marteloskopflächen ($P = 0.118$).

Die beschriebene Analyse wurde ebenfalls für die Kraft'schen Klassen (vorherrschend, herrschend, mitherrschend, beherrscht) durchgeführt. Der Übersicht halber wird auf die detaillierte Darstellung hier verzichtet, diese kann Condrau (2017) entnommen werden. Stattdessen sind in Tabelle 12 die verwendeten statistischen Tests und deren Resultate zusammengefasst.

Tabelle 11: Statistische Kennwerte in Metern und Testresultat für den Vergleich der Stammfusskoordinaten der Marteloskope Williwald und Rona für FINT (Condrau 2017, verändert)

	n	n _{gem}	min	max	Mittelwert	Median	SD	Wilcoxon-Rank-sum-Test
Williwald	199	151	0.1	3.73	1.37	1.19	0.81	P= 0.118
Rona	241	215	0.02	3.96	1.24	1.03	0.81	

LiForest

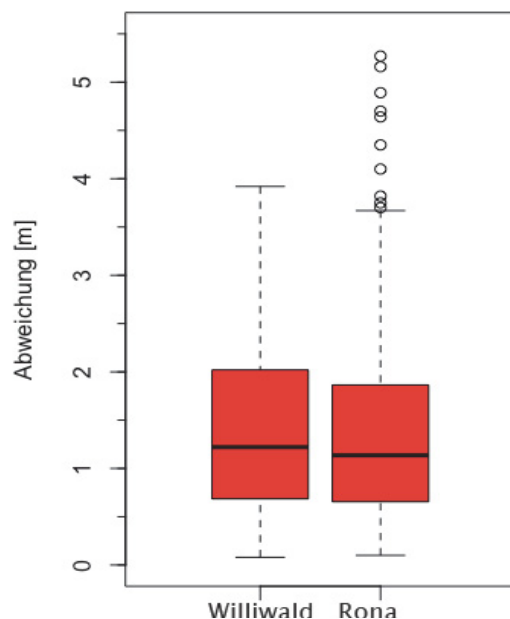


Abbildung 29: Boxplots zum Vergleich der Abweichung der Stammfusskoordinaten von LiForest für die Marteloskope Williwald und Rona (Condrau 2017)

Für LiForest sind die Boxplots der Marteloskope Williwald und Rona noch ähnlicher als bei FINT (Abbildung 26). Q25 und Q75 weichen weniger als 0.01m voneinander ab. Auffallend sind jedoch die vielen Ausreisser in Rona. Anhand des Shapiro-Wilk-Tests ($P_{\text{Williwald}} < 0.001$, $P_{\text{Rona}} < 0.001$) konnte keine Normalverteilung der Daten nachgewiesen werden. Mit dem zweiseitigen Wilcoxon-Rank-Sum-Test konnte nachgewiesen werden, dass es keinen signifikanten Unterschied zwischen LiForest im Williwald und in Rona gibt ($P=0.673$; Tabelle 12).

Die beschriebene Analyse wurde ebenfalls für die Kraft'schen Klassen (vorherrschend, herrschend, mitherrschend, beherrscht) durchgeführt. Detailliert kann sie der Bachelorarbeit von Condrau (2017) entnommen werden. Zusammengefasst sind die Resultate in Tabelle 13 dargestellt und nachfolgend erläutert.

Tabelle 12 : Statistische Kennwerte in Metern und Testresultat für den Vergleich der Stammfusskoordinaten der Marteloskope Williwald und Rona für LiForest (Condrau 2017, verändert)

	n	n _{gem}	min	max	Mittelwert	Median	SD	Wilcoxon-Rank-sum-Test
Williwald	183	151	0.08	3.92	1.39	1.22	0.90	P= 0.673
Rona	280	215	0.1	5.27	1.41	1.14	1.02	

Zwischen den Versuchsflächen existiert für LiForest in der Kraft'schen Baumklasse vorherrschend kein signifikanter Unterschied ($P=0.64$). Trotz höherer Anzahl Ausreisser in der vorherrschenden Klasse in Rona weisen die Resultate darauf hin, dass die mittleren Abweichungen in Rona geringer sind (Condrau 2017).

Bei der Kraft'schen Baumklasse herrschend sind auch für LiForest in Rona die Abweichungen der Stammfusskoordinaten signifikant geringer als im Williwald ($P=0.016$).

Bei den Klassen mitherrschend und beherrscht konnte keine Signifikanz nachgewiesen werden ($P=0.503$ und $P=0.311$).

Tabelle 13: Statistische Kennwerte zur Untersuchung der Genauigkeit von FINT und LiForest sortiert nach sozialen Klassen und zusammengestellt nach Programm (Condrau 2017, verändert)

Kraft'sche Klasse	Programm	Marteloskop	Shapiro-Wilk-Test (P=)	Levene-Test (P=)	t-Test (P=)	Wilcoxon Rank Sum Test (P=)
0	FINT	Williwald	0.006			0.866
		Rona	0.003			
	LiForest	Williwald	0.009			0.644
		Rona	0.023			
1	FINT	Williwald	0.003			0.023
		Rona	0.006			
	LiForest	Williwald	0.002			0.016
		Rona	0.001			
2	FINT	Williwald	0.001			0.787
		Rona	0.004			
	LiForest	Williwald	0.023			0.503
		Rona	0.002			
3	FINT	Williwald	0.509	0.480	0.168	
		Rona	0.712			
	LiForest	Williwald	0.425	0.278	0.311	
		Rona	0.054			

4.1.6 Auswertung Drohnendaten durch RWTH Aachen

Die Auswertung der Drohnendaten von Rona durch die RWTH Aachen anhand des eigenen Algorithmus ist nicht 1:1 mit derjenigen von FINT und LiForest vergleichbar. Es kann jedoch eindrücklich gezeigt werden, was mit Drohnendaten möglich ist und wo die Grenzen der Auswertung und Dateninterpretation liegen.

Die aus den Drohnendaten generierte Punktwolke wurde als LAS-Datei digitalisiert. Dadurch waren die Strukturen des Waldes und Einzelbäume von Auge gut erkennbar (Abbildung 30).

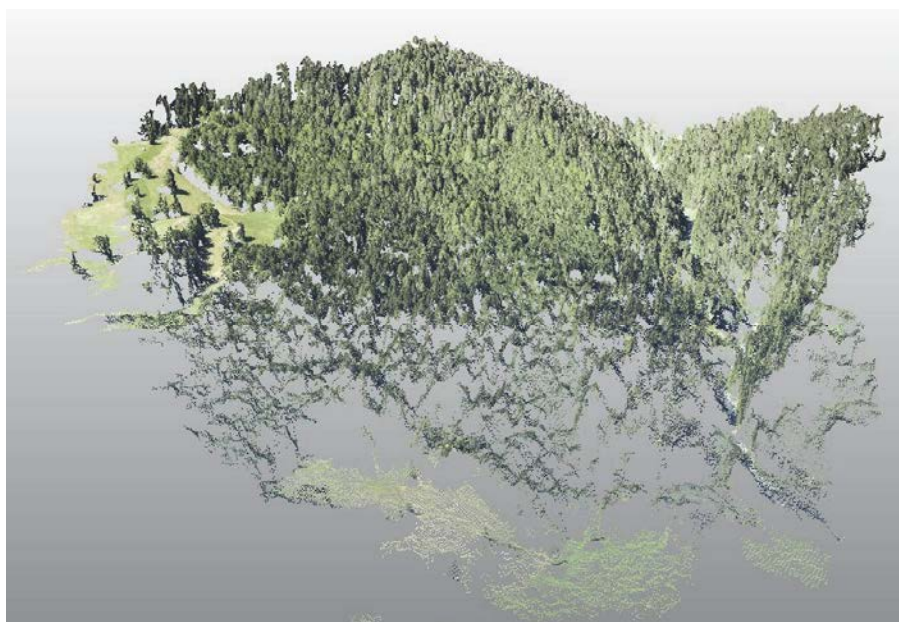


Abbildung 30: Punktwolke Marteloskopfläche Rona als LAS-Datei (Bücken 2017)

Die Betrachtung der Daten aus der Vogelperspektive auf rotem Hintergrund, um Lücken besser erkennen zu können, zeigt auf, dass die vegetationsfreien Bereiche zwischen den Kronen nur schlecht erfasst wurden. Um dies zu vermeiden, wäre eine viel höhere Bilddichte notwendig. Zusätzlich ist es von der Brennweite und dem Bildwinkel abhängig, wie viel Boden zwischen den Bäumen erkennbar ist. An Hängen ist die Situation erschwert, weil aufgrund der Wuchsform auch bei langer Brennweite der Boden manchmal nicht mit ausreichend vielen Bildern abgedeckt werden kann und somit keine photogrammetrische Berechnung erfolgen kann. In eher flachen Bereichen (Abbildung 31 links in Bildmitte) ist in Rona die Vegetation sehr dicht, so dass auch hier kaum Bodenpunkte im Modell erkennbar sind (Bücken 2017).

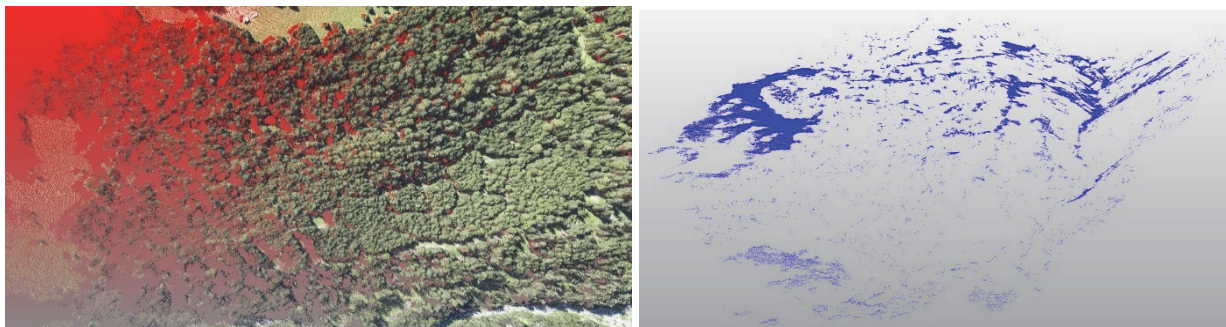


Abbildung 31: Im GIS digitalisierte Darstellung der Drohnendaten auf rotem Hintergrund (links) und anhand der Drohnendaten berechnetes DGM (rechts) (Quelle: Bücken 2017)

In Abbildung 31 rechts ist das durch ein externes Tool aus den Drohnendaten berechnete DGM dargestellt. Es zeigt sich, dass in den Bereichen mit dichter Vegetation kaum Punkte zur Generierung des DGM vorhanden waren. In den grösseren baumfreien Bereichen weist das generierte DGM eine hohe Informationsdichte auf. Bei der Weiterverwendung des DGM müssen die Bereiche mit fehlenden Informationen interpoliert werden. Neben der geringen Dichte ist die Fehlklassierung beim Trennen zwischen DGM und DOM problematisch. Bei Modellen wie dem von Rona ist dies problematisch, weil die nächstliegenden bekannten Punkte in grosser Entfernung liegen und dadurch die fehlklassifizierten Punkte nicht herausgerechnet werden können und dies zu Artefakten im DGM führt. Durch die Lockerung der zur Filterung verwendeten Parameter kann ein dichteres DGM errechnet werden, jedoch enthält ist der falsch klassifizierte Bereich dann auch grösser.

Durch eine an der RWTH Aachen entwickelte Prozessierungskette, welche die Lücken in den Modellen fraktal interpoliert und auch mit grösseren Lücken zurechtkommt, wurde aus der Punktwolke DGM, DOM und nDOM berechnet (Abbildung 32; Bücken 2017).



Abbildung 32: Aus den Drohnendaten errechnete Modelle: DOM (links), DGM (Mitte), nDOM (rechts) (Quelle: Bücken 2017)

Das DOM sieht aufgrund der Interpolation von Daten im Bereich zwischen den Bäumen etwas verwaschen aus. Im DGM sind weiterhin noch Reste der Vegetation erkennbar. Auf eine stärkere Filterung wurde jedoch verzichtet, weil dadurch zu viele Informationen verloren gehen würden. Trotz dieser Interpolationen und der Generierung von DOM und DGM aus den Drohnendaten ergibt das nDOM für einige Bereiche ein brauchbares Modell.

Auf dem nDOM wurde ein Ausschnitt definiert und auf diesem die Einzelbaumerkennung gestartet (Abbildung 33). Es wurde bei sämtlichen Bäumen die gleiche Baumart angenommen (ebd.).

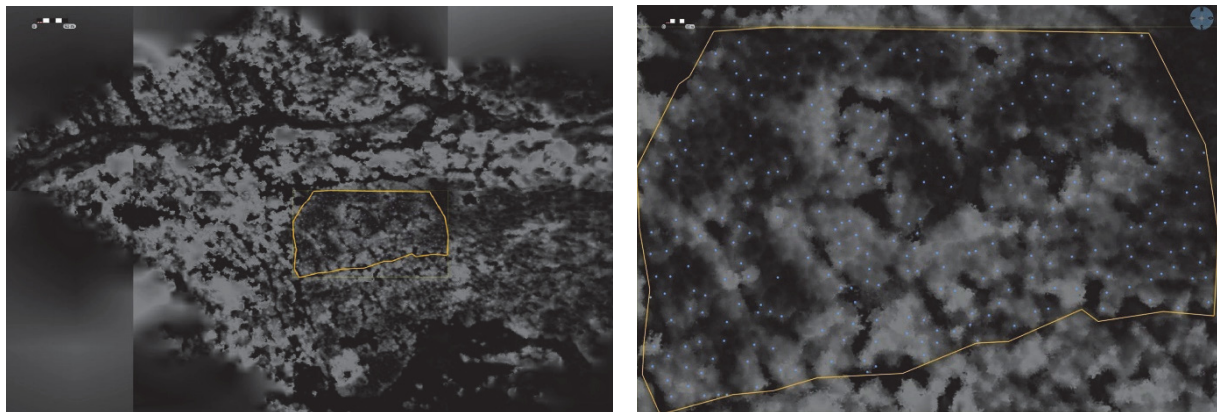


Abbildung 33: Für die Einzelbaumerkennung ausgewählter Bereich (links Übersicht, rechts detailliert) nach erfolgter Einzelbaumerkennung mit Algorithmus der RWTH Aachen (Quelle: Bücken 2017)

In einer Folgeanalyse wurde versucht, durch Verwendung des DGM von swisstopo eine Auswertung mit genaueren DOM und DGM-Daten durchzuführen. Schwierigkeiten ergaben sich dadurch, dass DOM und DGM nicht im gleichen Koordinatensystem vorlagen und die Überführung mit der GDAL (Geospatial Data Abstraction Library) nicht durchgeführt werden konnte. Deswegen wurde eine Umwandlung in QGIS durchgeführt. Zwischen DOM und DGM konnte jedoch durch die Überprüfung mit Höhenprofilen ein Höhenunterschied von bis zu 3m festgestellt werden. Das errechnete nDOM ergab unrealistische Baumhöhen, weswegen auf die Weiterverarbeitung der Daten (Einzelbaumerkennung) verzichtet wurde. Anhand des erhaltenen nDOM sollte es erfahrungsgemäss aufgrund der klaren Strukturierung einfacher sein, die korrekte Einstellung zu treffen, als mit drohnengenerierten DGM. Die besten Resultate werden jedoch mit einem rein laserbasierten nDOM erreicht (ebd.).

4.2 Ergebnisse Praxistauglichkeit

Die Überprüfung der Praxistauglichkeit wird zusammenfassend dargestellt. Auf die detaillierte Beschreibung jeder Seillinie wird verzichtet. Diese Beschreibungen sind für die Buhütte im Anhang D dargestellt und können für Huetgraben und Holzhackerwald Condrau (2017) entnommen werden.

4.2.1 Buhütte

Abbildung 34 zeigt die mit Seilaplan geplanten Seillinien in der Planungseinheit Buhütte. Für die geplanten Seillinien wurden jeweils zwei Varianten erstellt, welche mit den unterschiedlichen Farben für die Stützen- und Ankerbäume dargestellt sind. Nach der Geländeverifizierung wurde die besser geeignete Variante dem Förster überreicht. Beispielhaft ist die Seilaplan-Planung der Linie 1 in Abbildung 35 dargestellt, die weiteren Linien können Anhang D entnommen werden. Der unterschiedliche Startpunkt und die leichte Verschiebung des Ankerbaums bei den Seillinien resultieren daraus, dass bei gleichem Startpunkt für die Seillinien eine Fehlermeldung durch Seilaplan ausgegeben wurde und die Seillinien nicht berechnet werden konnten. Deswegen wurde ein nahe gelegener, ebenfalls möglicher Startpunkt als Ankerbaum gewählt.

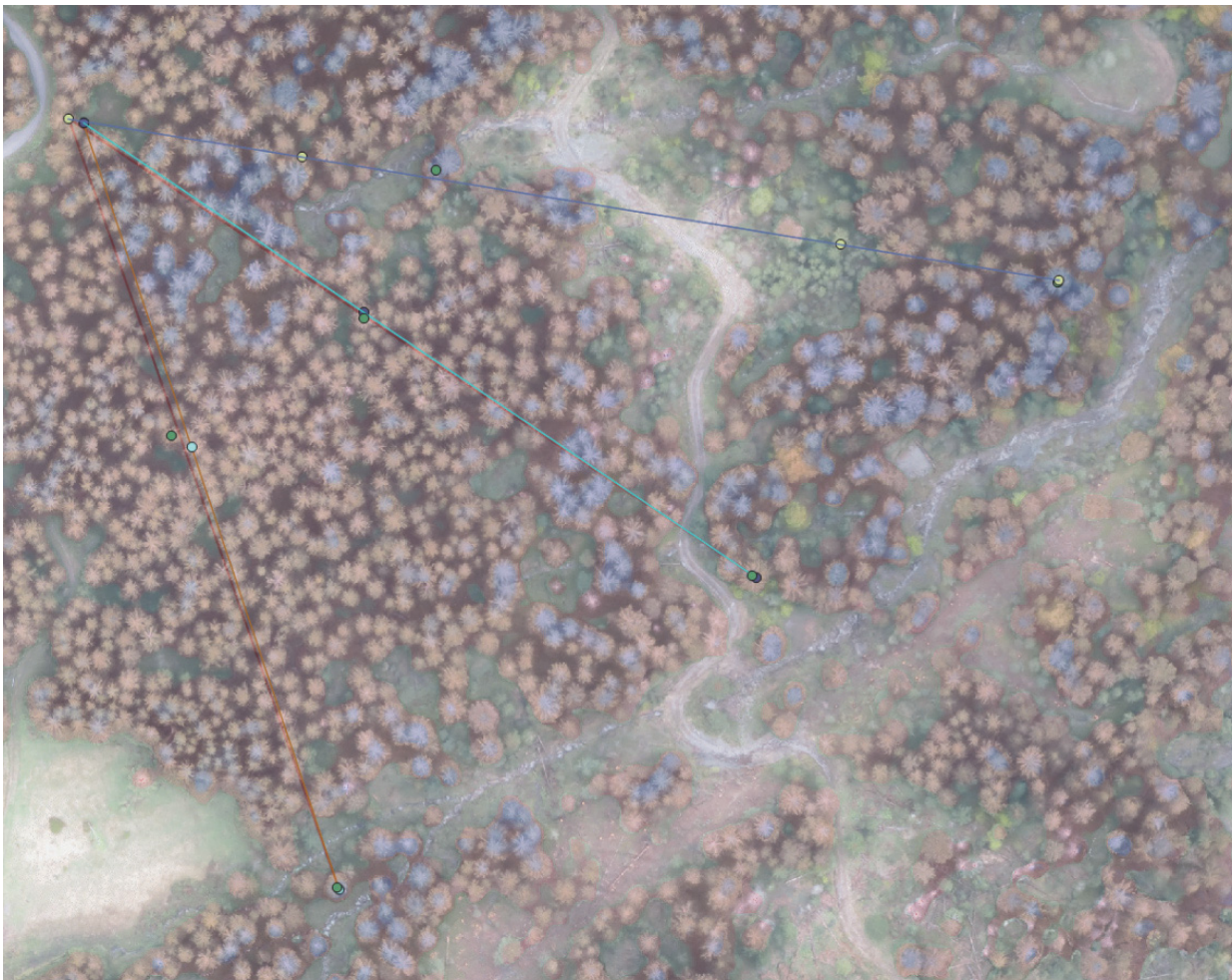


Abbildung 34: Übersichtsplan der mit Seilaplan geplanten Seillinien der Buhütte mit drohnengeneriertem Orthofoto (Linie 1 und 2: Grün = realisierte Stützen- und Ankerbäume; Linie 3: Gelb = realisierte Stützen- und Ankerbäume)

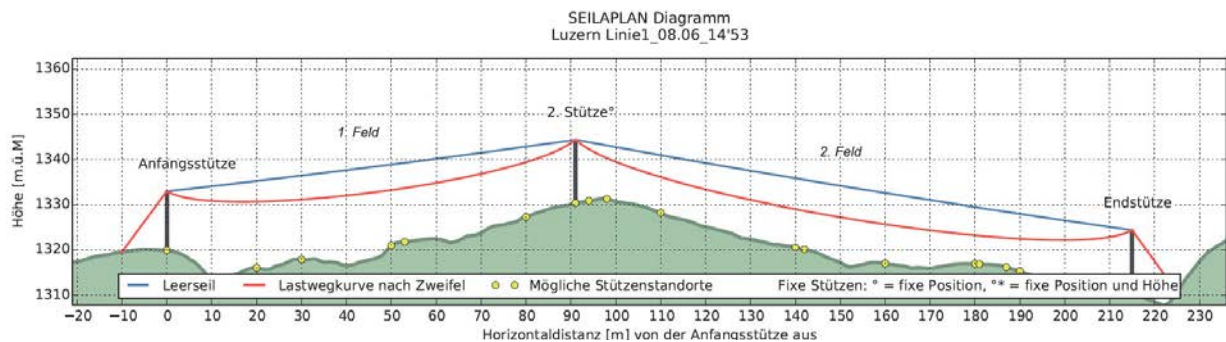


Abbildung 35: Mit Seilaplan erstellte Seiltrasse 1 mit unter Berücksichtigung des Orthophotos ausgewählten Stützen auf hinterlegtem DGM

Bei allen 3 geplanten Seillinien stellte sich mit der Geländebegehung heraus, dass eine der vorgeschlagenen Varianten realisierbar ist. Die definierten Stützenbäume waren anhand des Orthophotos auffindbar, bei den Linien stellte die exakte Bestimmung des Ausgangspunktes jedoch eine Schwierigkeit dar. Deswegen hätte beim exakten Abstecken der Linien jeweils beim ersten Stützenbaum die Linie seitlich verschoben und durch Trassierung zum Anfangspunkt der Ausgangspunkt bestimmt werden müssen.

Tabelle 14: Seilaplan-Daten und terrestrisch erhobene Daten der geplanten Seillinien 1 und 2 der Fläche Buhütte

Trasse 1: Azimut 162 gon					
	BHD FINT [cm]	BHD gemessen [cm]	HD Seilaplan [m]	Schrägdistanz Seilaplan [m]	Distanz gemessen [m]
Stütze 1	50	45	91	92	92
Anker	61	67	215	228	217
Trasse 2: Azimut 124 gon					
Stütze 1	45	45	90	90	95
Anker	57	46 / 50	216	224	224

In Tabelle 14 sind die mit FINT und Seilaplan bestimmten Daten der Stützen- und Ankerbäume sowie die terrestrische Verifizierung der Daten für die Trasse 1 und 2 ersichtlich. Den Tabellenwerten kann entnommen werden, dass die gemessenen BHD von den mit FINT berechneten BHD 0 – 7cm abweichen. Der Ankerbaum der zweiten Trasse war nicht eindeutig bestimmbar, deswegen sind die Werte 46 und 50cm angegeben, technisch realisierbar wäre die Seillinie mit beiden Bäumen. Die gemessene Distanz (Fadenmessgerät) stimmt mit der Schrägdistanz gemäss Seilaplan sehr gut überein und war als Orientierungspunkt bei der Suche der Stützen- und Ankerbäume wertvoll. Stützen- und Ankerbaum der 3. Seillinie waren auffindbar und die technische Realisierbarkeit gewährleistet.

Aus *waldbaulicher Sicht* sind die Drohnenbilder etwas kritischer zu beurteilen. Im Gegensatz zur forsttechnischen Sicht sind nicht primär die dimensionsstarken Bäume, welche potenziell als Stützen oder Anker geeignet sind, von Bedeutung. Vielmehr geht es um die ganzheitliche Betrachtung des Waldes. Es wird betrachtet, ob Verjüngung vorhanden ist, der Wald seine Funktion erfüllen kann (besonders wichtig im Schutzwald) und es ist den standortsgebundenen Besonderheiten Rechnung zu tragen.

Anhand der Drohnenbilder ist eine grobe waldbauliche Beurteilung über grosse Flächen möglich. Beispielsweise sind grössere Bestandeslücken oder Jungwaldflächen sowie volumenreiche Flächen erkennbar. Zur Bestandesstabilität können Annahmen anhand der Bestandesdichte und Kronenausformung getroffen werden. Verlässlich beurteilt werden können die Bestandes- sowie auch

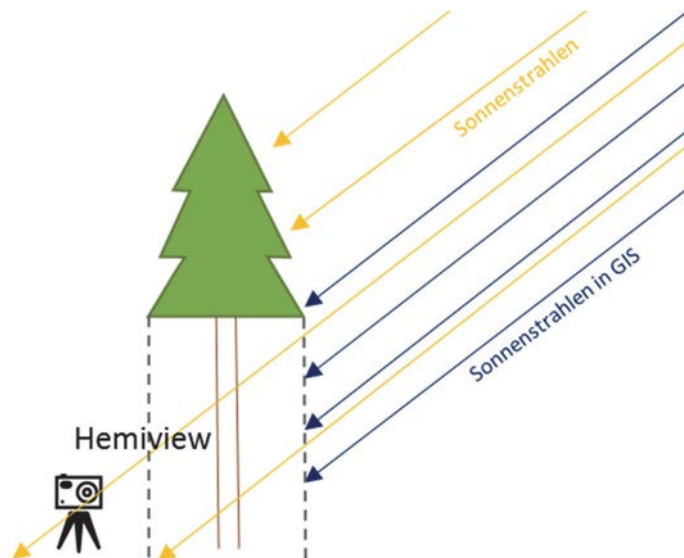


Abbildung 36: Mögliche Fehlerquellen der Sonneneinstrahlungsmodellierung mit GIS im Vergleich von Fischaugenfotos im Gelände mit HEMIVIEW (Herzog, 2016)

die Einzelbaumstabilität jedoch erst vor Ort. Nicht möglich mit Drohnenbildern ist die Beurteilung sämtlicher vom Kronendach verdeckter Parameter (Verjüngung unter Schirm, Stammverlauf, Verletzungen des Baumes, Verankerung). Derzeit ebenfalls noch nicht möglich ist die Beurteilung der notwendigen Lückengrösse, damit die Verjüngung genügend Licht bekommt. In einer Semesterarbeit hat Herzog (2016) dies in der Untersuchungsfläche mit einem Vergleich von Fischaugenfotos im Gelände und dem GIS genauer untersucht (Abbildung 36). Das ist diesbezüglich eine erste Pilotstudie. Die Fragestellung muss noch vertiefter untersucht werden.

Die Qualität der Drohnenbilder ist für die waldbauliche Planung entscheidend. Schattenwurf kann beispielsweise dazu führen, dass vorhandene Verjüngung oder innere Waldränder auf den Orthophotos nicht richtig erkennbar sind. Dennoch kann anhand einer ersten gutachtlichen Analyse der Orthophotos nach der Seillinienplanung vor der Anzeichnung im Feld grob abgeschätzt werden, wo und in welche Richtung eine Öffnung oder ein Verjüngungsschlitz angelegt werden kann. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Bestandesstabilität nicht zu stark gefährdet wird. An allenfalls kritischen Orten muss mit der Anzeichnung besonders vorsichtig vorgegangen werden (vgl. Anhang F). Aus den genannten Gründen können die Drohnenbilder zur ersten Orientierung und zur Unterstützung der waldbaulichen Planung nützlich sein, jedoch keine Feldbegehung ersetzen.

Bereits der Vergleich der Orthophotos der Fläche Buhütte zeigt den deutlichen Unterschied vor und nach Ausführung der Hiebmassnahme (Abbildung 37). Die realisierten Seillinien sind klar erkennbar und weisen eine hohe Übereinstimmung mit dem ersten Entwurf des zuständigen Försters auf (vgl. Anhang D).

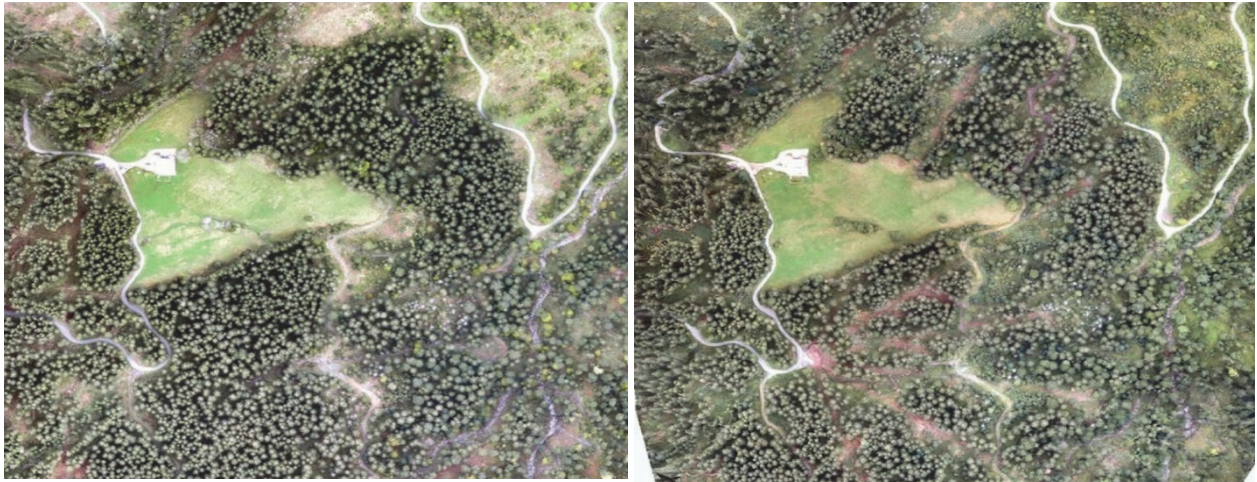


Abbildung 37: Orthophoto 2016 (links) und Orthophoto 2017 (rechts) der Fläche Buhütte

Die Weiterverarbeitung der Drohnendaten ermöglichte es, das nDOM für beide Orthophotos zu erstellen (Abbildung 38).

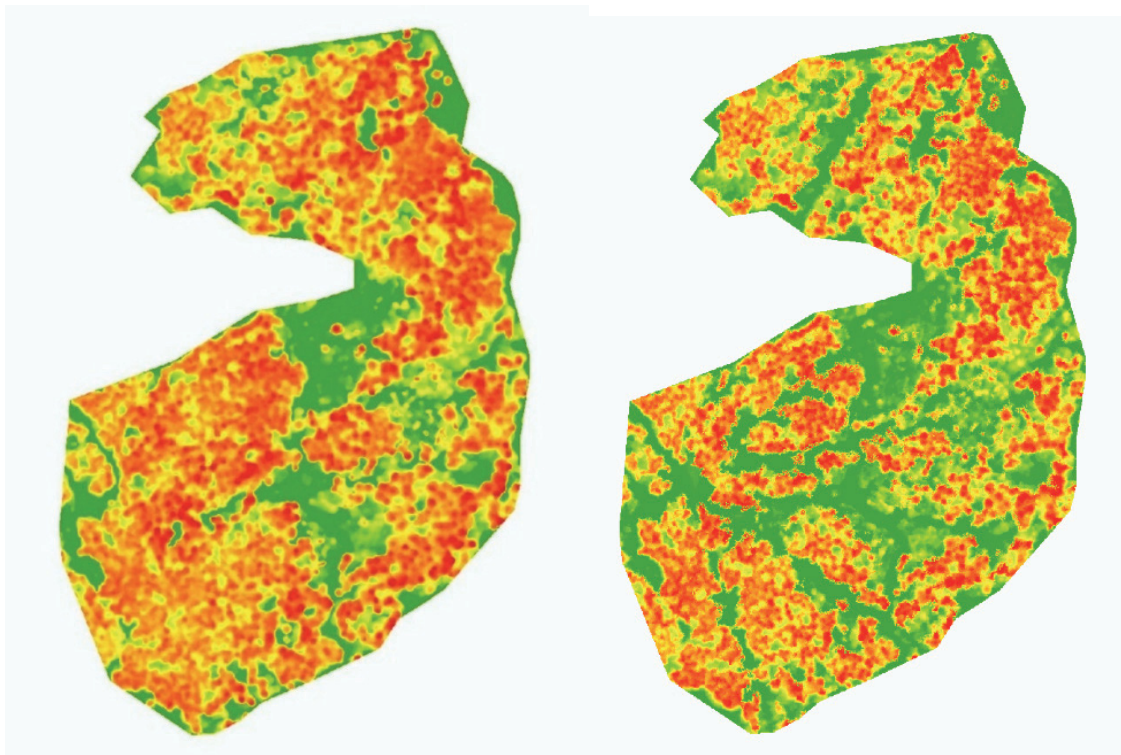


Abbildung 38: Vergleich nDOM 2016 (links) und nDOM 2017 (rechts) der Fläche Buhütte zur Verdeutlichung des Unterschiedes vor und nach erfolgtem Eingriff (grün = geringe Bestandeshöhe, rot = hohe Bestandeshöhe)

Dem Vergleich der nDOM können bereits interessante Informationen entnommen werden. Während vor dem Eingriff viele starke Bäume vorhanden waren, sind nach dem Eingriff deutlich weniger starke Bäume vorhanden. Ebenfalls gut erkennbar sind als grüne Linien die Seiltrassen.

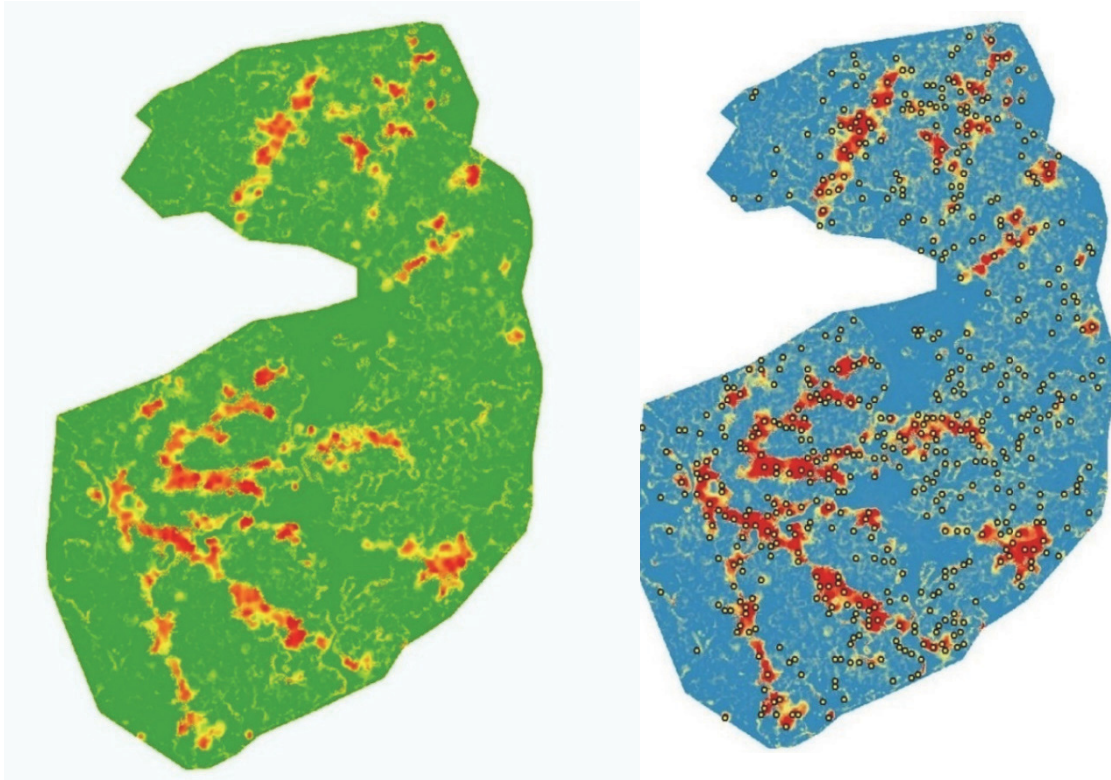


Abbildung 39: Aus dem Differenzbild von nDOM 2016 und 2017 erstellte entnommene Bäume (links, rot = Entnahme, wobei Entnahme = Differenz > 7m zwischen nDOM 2016 und nDOM 2017) und Anzahl entnommener Bäume (rechts, mit FINT ermittelt)

Auf dem Differenzbild der nDOM (Abbildung 39) sind die Trassen und Schwerpunkte des Eingriffs deutlich erkennbar und konnten durch die Darstellung nach der Anwendung von FINT (Abbildung 39 rechts) nochmal verdeutlicht werden. Die verwendete Rastergrösse wurde iterativ bestimmt und betrug 2.4m für das nDOM. Durch Vergleich der FINT-Detektionen vor und nach dem Eingriff konnte die Zahl der entnommenen Bäume berechnet werden. Vor dem Eingriff wurden 2'055 Bäume detektiert (vgl. Anhang E), nach dem Eingriff deren 1'494. Folglich wurden gemäss FINT-Analyse 561 Bäume entnommen. Gemäss Anzeichnungsprotokoll wurden 569 Bäume entnommen.

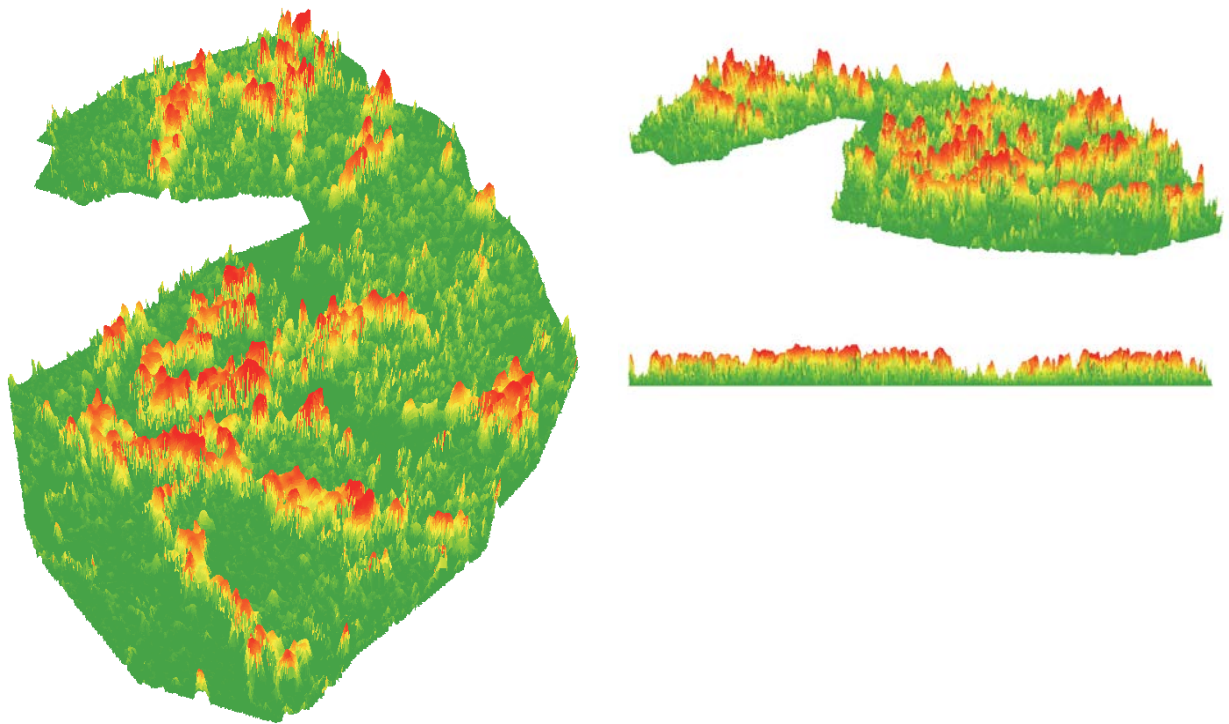


Abbildung 40: 3D-Darstellung der entnommenen Bäume der Fläche Buhütte aus verschiedenen Perspektiven (grün = niedrige Baumhöhe, rot = hohe Baumhöhe)

Wird mit dem aus dem Anzeichnungsprotokoll entnommenen Mittelstammvolumen von 1.4m^3 gerechnet, beträgt die Entnahmemenge der in Abbildung 40 dreidimensional dargestellten entnommenen Bäume 784m^3 . Die effektive Entnahmemenge gemäss Holzschlagprotokoll betrug 809m^3 .

4.2.2 Huetgraben

In Abbildung 41 sind die geplanten Seillinien im Huetgraben dargestellt. Die violette Umrandung stellt die Bewirtschaftungseinheit dar. Die Seillinien 1 und 2 wurden anhand der Drohnendaten geplant. Für diese Linien wurden Dimension der Anker- und Stützenbäume sowie deren exakter Standort angegeben. Die dritte, konventionell geplante Seillinie, geht vom gleichen Maschinenstandort wie Seillinie 2 aus. Die Azimutangaben wurden für alle Seillinien abgelesen und dem zuständigen Förster übergeben (1: 260.7 Gon, 2: 254.8 Gon, 3: 279.8 Gon).

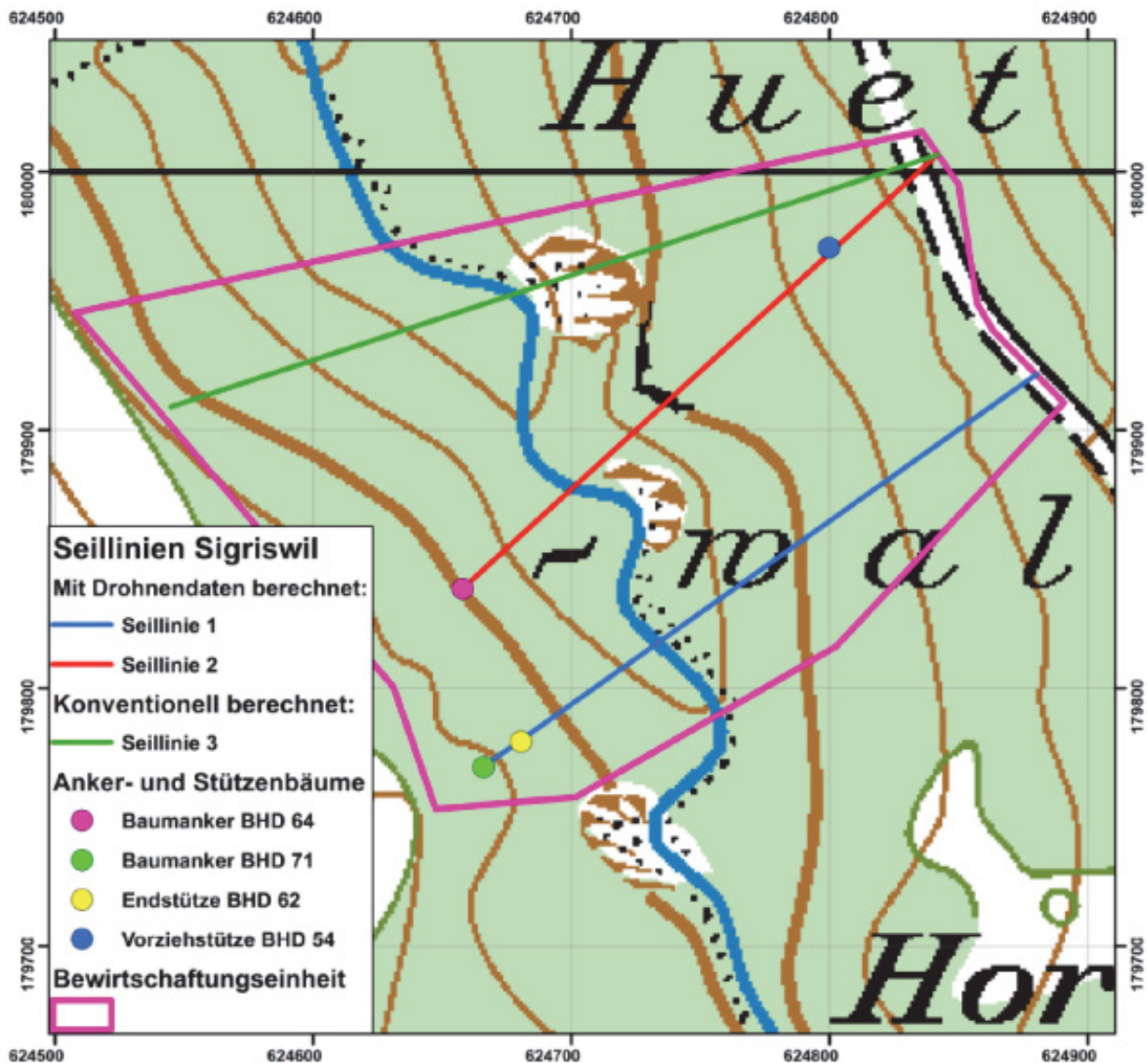


Abbildung 41: Skizze der Detailplanung in der Bewirtschaftungseinheit Huetgraben (Condrau 2017)

Bei der ersten Seillinie sollte sich nach 248.5m HD ein Endmast mit Bundstelle auf 12.5m Höhe befinden. Der Angriffswinkel des geplanten Ankerbaumes wurde mit 42 Gon als kritisch und lediglich bei guter Verankerung als zulässig eingestuft. Ansonsten sollte ein Zweibaumanker verwendet werden. Mit dem Drohnenbild konnten die Dimensionen von Endmast (62cm BHD) und Ankerbaum (71cm BHD) bestimmt werden. Bei 98 kN Tragseilspannung wurde eine Sattelfkraft von 17.6 kN, ein Knickwinkel von 8.2 Gon sowie ein Bundstellendurchmesser von 20 cm berechnet. Die technischen Kennwerte und das Querprofil für diese und alle weiteren Seillinien können Condrau (2017; Anhang L ff.) entnommen werden.

Die erste Seillinie konnte ohne Korrektur der Marschzahl abgesteckt werden, allerdings musste die Azimutangabe auf 261 Gon aufgerundet werden. Diese Rundung musste für alle weiteren Seillinien ebenfalls vorgenommen werden, weil mit dem Wyssenkompass lediglich ganze Gon-Zahlen verlässlich messbar sind. Die exakte Positionsbestimmung des Ausgangspunktes war weder mit GPS-Gerät noch anhand des drohnengenerierten Orthophotos möglich. Deswegen war erst beim anhand des Orthophotos bestimmten Endmasts erkennbar, dass die abgesteckte Linie um ca. 1.7m verschoben werden muss. Das Fadenmessgerät wurde nicht verwendet, weil die Orientierung anhand des Orthophotos möglich war. Der BHD des Endmastes war mit 67cm 5cm grösser, als von FINT berechnet. Der Ankerbaum war mit 77cm BHD 6cm dicker als von FINT berechnet. Wegen dem ungünstigen Angriffswinkel musste ein Zweibaumanker geplant werden. Die BHD-Abweichung zwischen FINT und Realität beeinträchtigte die technische Machbarkeit der Seillinien nicht.

Auch die zweite Seillinie konnte ohne Azimutänderung mit 253 Gon abgesteckt werden. Das Auffinden des Ausgangspunktes gestaltete sich auch hier schwierig. Nach 55m HD war eine Vorziehhstütze (BHD 54cm, 13m Bundstellenhöhe) geplant, welche bei der Geländebegehung auffindbar war, jedoch 2m seitlich verschoben. Deswegen wurde die bisherige Absteckung um diese 2m verschoben. Die Dimension der Vorziehhstütze betrug 51cm BHD. Die weitere Trassierung verlief plangemäss. Der Ankerbaum nach 256m HD hatte einen BHD von 62 cm (gegenüber 64 cm von FINT) und war mühelos bestimmbar und geeignet.

Die dritte Seillinie wurde konventionell vom Revierförster beplant. Vorgängig an die Trassierung wurde die Linie anhand der Drohnenbilder um 10 Gon verschoben, weil bei der geplanten Absteckung kein Ankerbaum vorhanden war. Dadurch konnte die Trassierung rasch durchgeführt und der anvisierte Ankerbaum mit einer Abweichung von 0.5m sehr exakt getroffen werden. Die Trassierung dauerte verglichen mit der drohnengestützten Methode länger, weil zusätzlich die Hangneigung erfasst werden musste, um das konventionelle Seilkranprojekt (Profilauftrag auf Millimeterpapier, händische Berechnungen technische Realisierbarkeit) zu erstellen. Trotz einfachem Gelände haben diese Arbeiten rund zwei Stunden beansprucht. Die Genauigkeit der Drohnenbilder überzeugte den zuständigen Vorarbeiter. Die generierten BHD beurteilte er als ausreichend genau, jedoch sei für die Vereinfachung der Projektierungsarbeiten vor allem das Orthophoto von grossem Nutzen.

4.2.3 Holzhackerwald

Im Holzhackerwald wurde die Detailplanung mit dem drohnengestützten Verfahren bei vier der neun Seillinien vorgenommen (Abbildung 42). Die Perimetergrenze ist grau umrandet, die beplanten Linien sowie deren Stützen- und Ankerbäume können der Legende entnommen werden. Für die Seillinien 1 und 2 war eine Stütze ausreichend, die Linien 3 und 4 benötigten deren 2. Zur besseren Auffindbarkeit des Maschinenstandorts für die Trassierung während der Feldbegehung wurden die Maschinenstandorte mit Kreuzen markiert.

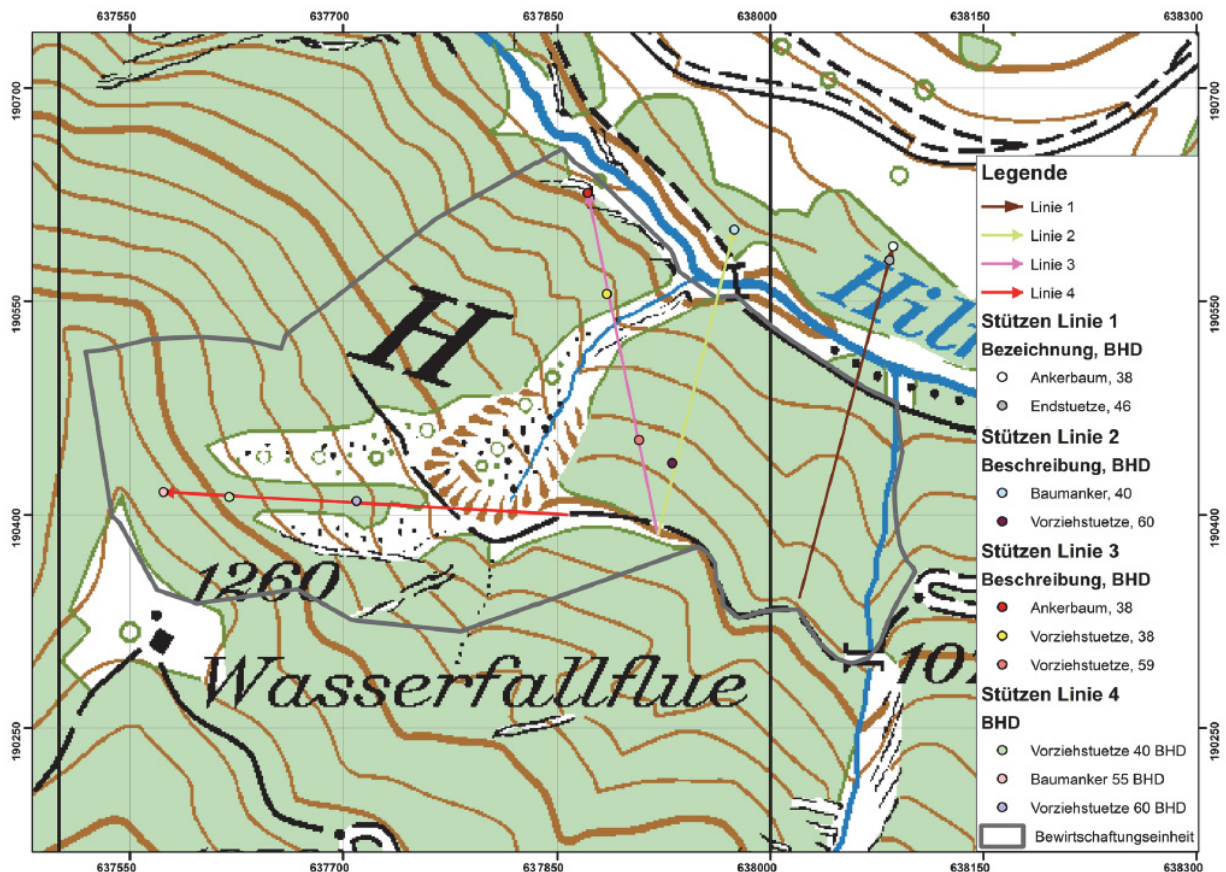


Abbildung 42: Skizze der Detailplanung in der Bewirtschaftungseinheit Holzhackerwald (Condrau 2017)

Die erste Seillinie konnte ohne Azimutänderung mit 17 Gon abgesteckt werden. Die Markierung des Maschinenstandortes war auf dem Orthophoto nicht erkennbar. Durch Betrachtung der Einzelaufnahmen war die Markierung erkennbar, so dass die Trassierung von ihr aus begonnen werden konnte. Der Planung konnte entnommen werden, dass nach 253m HD ein nicht befahrbarer Endmast (BHD 46cm) von 8m Höhe im Gegenhang benötigt wird. Der geplante Baumanker (BHD 38cm) wies einen Angriffswinkel von 60 Grad und somit mehr als die kritischen 45 Grad auf, weswegen die Verwendung eines Zweibaumankers in Betracht gezogen wurde.

Bei der Feldbegehung waren grössere Lücken und das auf dem Orthophoto erkennbare Flussbett gut auffindbar. Der Schattenwurf erschwerte die Orientierung in Teilen der Fläche. Der Endmast war durch Betrachtung des Orthophotos bestimmbar und hatte einen BHD von 47cm. Die als Ankerbaum bestimmte Weisstanne wies gegenüber der FINT-Modellierung einen deutlich höheren BHD von 75 cm auf, weswegen entschieden wurde, den Ankerbaum trotz ungünstigem Abspannwinkel zu belassen und abzuspannen. Die BHD-Abweichungen von Stützen- und Ankerbaum hatten keinen negativen Einfluss auf die technische Machbarkeit der Linie.

Seillinie 2 hatte eine Länge von 241.6m HD. Nach 56.5m Entfernung war eine Vorziebstütze (15m Höhe, 60cm) notwendig. Der Ankerbaum sollte einen BHD von 40cm aufweisen. Der Maschinenstandort war weder auf dem Orthophoto noch auf den Einzelbaufnahmen auffindbar. Deswegen musste die Linie bei der Vorziebstütze (62cm BHD) ca. 3m seitlich verschoben werden. Die weitere Absteckung der Linie verlief bis zum Flussbett problemlos. Der letzte Teil der Trasse wurde vom Baumanker (58cm BHD) aus abgesteckt, welcher anhand des Orthophotos problemlos auffindbar war. Die technische Machbarkeit war trotz grosser BHD-Abweichung gewährleistet.

Der Ausgangspunkt für die Trassierung der Seillinie 3 konnte grob anhand der Seillinie 2 bestimmt werden, musste bei der Vorziebstütze nach 73m HD jedoch um 1.5m korrigiert werden. Die Stütze (59cm gemäss FINT) sollte bei 11m Höhe 26cm Bundstellendurchmesser aufweisen. Die zweite Vorziebstütze nach 191m HD sollte eine Stützenhöhe von 11m mit 26cm Bundstellendurchmesser aufweisen. Der BHD gemäss FINT sollte 38cm betragen. Für den Baumanker wurde ein Angriffswinkel von ca. 11 Gon berechnet.

Die erste Vorziebstütze war eine Weisstanne (BHD 67cm) mit guter Verankerung. Bei der zweiten Vorziebstütze konnte lediglich ein BHD von 26cm gemessen werden. Neben der geringen Dimension der Stütze war auch die Verankerung und somit die Stabilität kritisch. Im Vergleich zur BHD-Berechnung mit FINT entspricht dies einer Abweichung von 12cm. Der Ankerbaum (BHD 69cm) war ohne Schwierigkeiten auffindbar und lag genau in der geplanten Linienführung. Der BHD war deutlich höher (+21cm) als von FINT berechnet.

Aufgrund der Feldbegehung konnte die technische Durchführbarkeit der Linie nicht gewährleistet werden. Die Suche nach alternativen Stützenbäumen auf der Kuppe blieb erfolglos. Als mögliche Varianten zur Realisierung ist eine künstliche Stütze oder eine Stütze mit Baumverstärkung denkbar.

Für Seillinie 4 wurden gemäss SeilkranPROjekt zwei Stützen benötigt. Die erste sollte nach 162m HD auffindbar sein, eine Stützenhöhe von 20.5m und 60cm BHD aufweisen. Die zweite Stütze sollte 10m Stützenhöhe und einen BHD von 40cm aufweisen. Der Baumanker sollte einen BHD von 55cm sowie einen ungünstigen Abspannwinkel von 50 Gon aufweisen, sollte jedoch abspannbar sein.

Die Feldverifizierung der Seillinie wurde vom Anker aus mit 104 Gon vorgenommen, weil der Ausgangspunkt nicht eindeutig bestimmbar war und der Ankerbaum als positiver Kardinalpunkt gesehen wurde. Die Lokalisierung des Ankerbaums anhand des Drohnenbildes gestaltete sich als schwierig. Nützlich wären die GPS-Koordinaten gewesen, welche die grobe Positionsermittlung bereits ermöglicht hätten. Der BHD des Ankerbaums betrug 57cm. Die Absteckung der Seillinie erfolgte rasch und problemlos, weil die Orientierung durch Lücken und dominante Bäume einfach war. Der zweite Stützenbaum war auffindbar und wies einen BHD von 37cm auf. Die erste Stütze wies einen BHD von 48cm auf und wurde aufgrund der Dimensionierung als gerade noch tauglich für die Seillinie beurteilt. Die Abweichung gegenüber der FINT-Modellierung war mit 12cm relativ hoch.

4.3 Überprüfung des Einflusses verschiedener Flughöhen und Genauigkeitsvergleich Swisstopo- und Drohrendaten

Das Kreuz zur Markierung des Maschinenstandorts war auf den Orthophotos mit 100m und 140m deutlich, bei 180m Flughöhe kaum erkennbar (Abbildung 43). Allerdings fällt beim Vergleich der Fotos auf, dass der Schattenwurf bei der Flughöhe von 180m deutlich schwächer ist, als bei den anderen Flughöhen. Wahrscheinlich hängt deswegen die Sichtbarkeit des Maschinenstandorts weniger von der Flughöhe als viel mehr vom Kontrast durch den Schattenwurf respektive der Farbe ab.



Abbildung 44: Sichtbarkeit des Maschinenstandorts (weisses Kreuz) auf verschiedenen Flughöhen (Links = 100m, Mitte = 140m, Rechts = 180m; orange = terrestrische Referenzbäume; gelb / grün / blau = mit FINT detektierte Bäume) in einem Ausschnitt der Marteloskopfläche Williwald (Massstab 1:500)

Abbildung 44 vergleicht die Bildqualität des Orthophotos von swisstopo (links oben) mit derjenigen der unterschiedlichen Befliegungshöhen. Vorratsreiche Partien des Waldes, die Unterscheidung in Laub- und Nadelholz sowie Bestandeslücken sind auf allen Orthophotos erkennbar - auf dem Orthophoto von swisstopo jedoch am schärfsten abgebildet. Mit zunehmender Flughöhe sind sie weniger deutlich erkennbar. Es gilt allerdings zu beachten, dass das Orthophoto von swisstopo aus dem Jahr 2012 stammt und somit nicht 1:1 mit den Drohnenbildern vergleichbar ist.

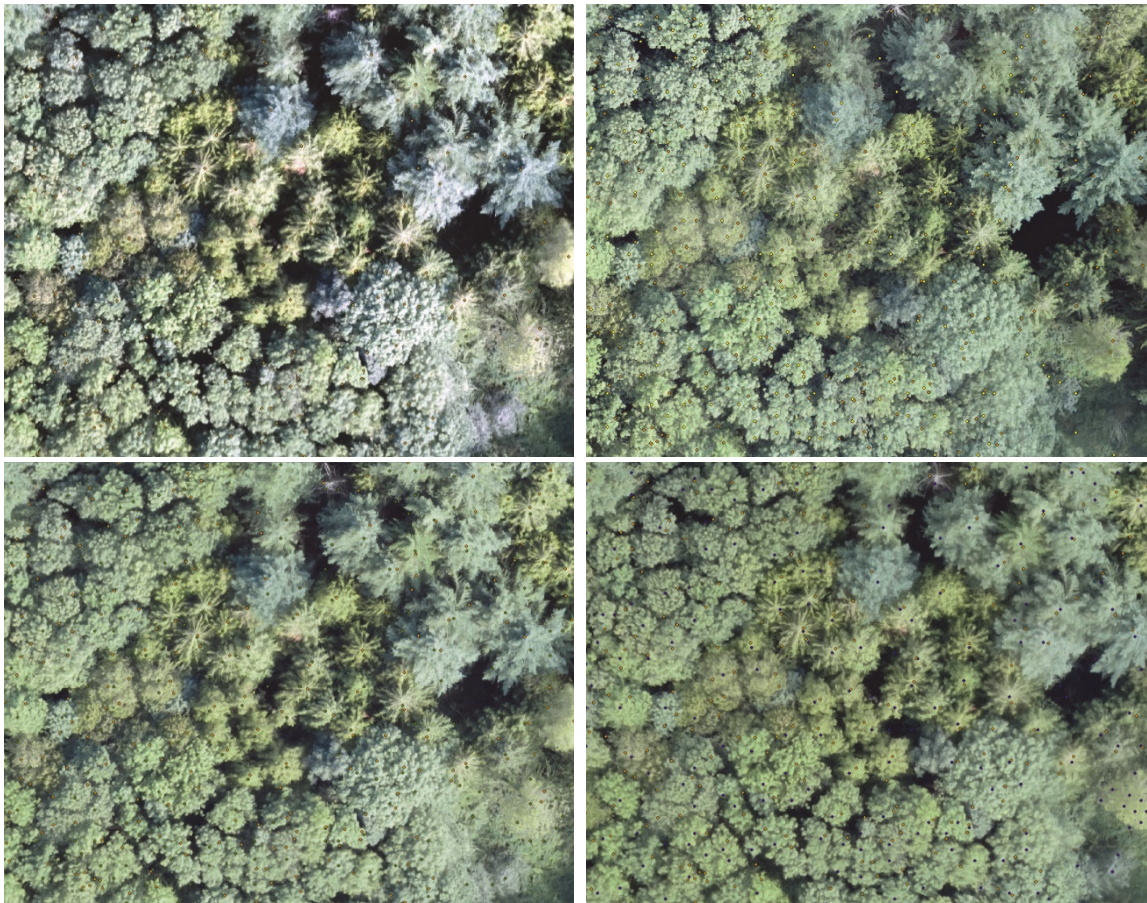


Abbildung 43: Bildausschnitt aus dem Marteloskop Williwald mit laub- und nadelholzreichen Partien, Bestandeslücken und verschiedenen Bestandesaltern zum Vergleich der Orthophotos swisstopo und verschiedene Befliegungshöhen (oben links = Orthophoto swisstopo 2012, oben rechts = 100m, unten links = 140m, unten rechts = 180m; Massstab 1:250)

Die Detektionsraten von FINT wichen für die Flughöhen nicht signifikant voneinander ab, jedoch war die Anzahl erfasster Bäume mit zunehmender Flughöhe etwas höher (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Flughöhen, Rastergrößen DOM und Anzahl erfasster Bäume bei den Flughöhenversuchen im Williwald

	Flughöhe [m]	Rastergröße DOM [cm]	Rastergröße nDOM [cm]	n erfasste Bäume [-]
Flug 1	100	4.5	66	719
Flug 2	140	5.5	78	731
Flug 3	180	7.2	69	733

Durch den optischen Vergleich der DOM von swisstopo und der Drohnenbefliegung kann grundsätzlich gesagt werden, dass die swisstopo-Daten für die Modellierung und grobe Schätzung ausreichend sind. Weil die Befliegung von swisstopo nur alle 6 Jahre stattfindet, können aktuelle und hochauflösende Drohnenbilder jedoch verlässlichere Daten liefern. Dies kann vor allem nach Kalamitäten (Windwurf, Käferbefall, Waldbrände) der Fall sein. Wie Abbildung 45 entnommen werden kann, sind auf dem drohnengenerierten Orthophoto durch die höhere Auflösung Einzelbäume erkennbar, wenn die Kronenspitzen sichtbar sind.

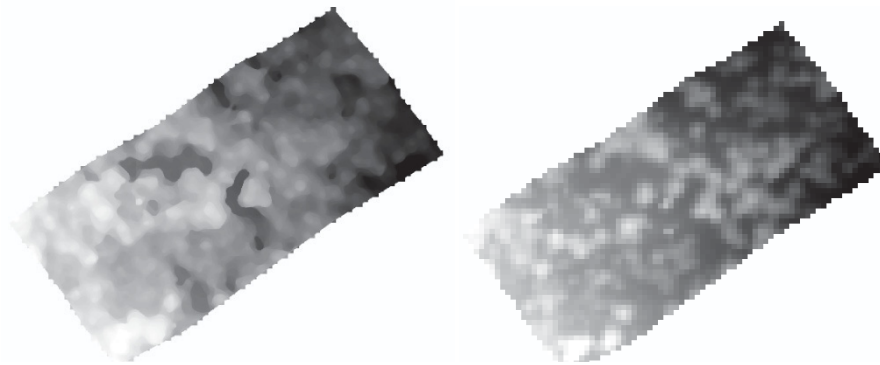


Abbildung 45: Vergleich der Auflösung des DOM von swisstopo (links) und Drohne (rechts) aufgezeigt an einem Ausschnitt der Marteloskopfläche Rona

Im Schatten liegende Teile der Fläche können bei einer Drohnenbefliegung problematisch sein. Es entstehen Bereiche, in denen keine Werte existieren. Die fehlenden Werte werden durch Interpolation von den nächstliegenden bekannten Werten anhand eines Algorithmus errechnet und können deswegen von der Realität abweichen. Deswegen werden die besten Drohnenbilder an bewölkten Tagen mit wenig Schattenwurf generiert. Die DOM von swisstopo liefern in Schattenlöchern genauere Daten. Zudem kann bei den LiDAR-Daten das nDOM aus dem gleichen Datensatz erstellt werden, weil mit der Befliegung sowohl DOM und DGM erstellt werden.

Weiter spielt die Jahreszeit für die Datenqualität eine entscheidende Rolle. In unbelaubtem Zustand sind mehr Informationen zum Waldboden aber weniger zu Laubhölzern erhältlich. Umgekehrtes tritt bei Frühlingsbefliegungen nach Blattaustrieb und Sommerbefliegungen ein; Objekte unter der Kronendecke werden bei Drohnenbefliegungen nicht erfasst, mit LiDAR-Daten sind sie darstellbar.

Auf einen statistischen Vergleich der Detektionsraten von FINT bei den beiden DOM wurde verzichtet, weil derzeit kein GIS-Tool existiert, welches Fehldetektionen herausfiltert. Deswegen müsste die Zuweisung zu den terrestrischen Referenzbäumen händisch erfolgen durch Betrachtung der Distanz zwischen Detektion und nächstgelegenen Referenzbaum sowie Berücksichtigung des Höhenunterschiedes der beiden Werte.

5 Diskussion

5.1 Genauigkeitsanalyse

5.1.1 Verwendete Methodik und Genauigkeit der verwendeten Daten

Die händische Zuweisung der durch FINT bzw. LiForest detektierten Bäume führt dazu, dass eine Wiederholung der Analyse nicht zu den selben Resultaten führen würde. Eine Automatisierung des Prozesses der Zuweisung der Detektionen auf die terrestrischen Referenzdaten der Marteloskopdaten wurde in Betracht gezogen. Ein möglicher Ansatz zur Automatisierung wird von Eysn et al. (2015) dargestellt. Dadurch wäre die Analyse objektiv und wiederholbar. Weil das Verfahren die Baumhöhe aller Referenzbäume als Eingangsparameter voraussetzt, wurde dieser Ansatz verworfen, weil dazu über 800 Referenzbäumen zu messen gewesen wären. In Noldin (2015) wird ein R-Skript von Hill und Breschan vom Institut für Terrestrische Ökosysteme der ETHZ erwähnt, welches die Zuteilung von Referenzbäumen und LiDAR-Bäumen ermöglicht.

Anfangs wurde in Betracht gezogen für die Zuweisung der Detektionen auf die terrestrischen Referenzbäume mit dem ArcGIS-Tool „nearest-neighbor“ zu arbeiten. Allerdings werden mit diesem Verfahren sämtliche Detektionen einem terrestrischen Referenzbaum zugewiesen. Folglich entstehen keine Fehldetektionen und die Vollständigkeit und Korrektheit der Detektionen kann nicht bestimmt werden. Gewisse Bäume sind jedoch vom Kronendach der vorherrschenden und herrschenden Bäume verdeckt, sodass sie nicht detektiert werden. Zudem entsteht aus verschiedenen Gründen (Mehrgipfligkeit, aufstehende Äste) ein gewisser Anteil an Fehldetektionen (Eysn et al. 2015, Kaartinen et al. 2012, Wallace et al. 2014). Deswegen wurde entschieden, die Methode der händischen Zuweisung von Detektionen auf Referenzbäume vorzunehmen, indem die Parameter Distanz zum Referenzbaum und Höhenunterschied zwischen Referenzbaum und Detektion betrachtet wurden.

Zur Ableitung der BHD von der Baumhöhe ist es notwendig, eine repräsentative Stichprobe für die jeweilige Fläche zu haben. Weil in den Marteloskopen die Baumhöhen anhand der Stammfusskoordinaten berechnet werden konnten, war die Bestimmung der Baumhöhen in diesem Fall nicht von der Genauigkeit der verwendeten Geräte oder der Messgenauigkeit des Anwenders abhängig. Ein weiterer Punkt, welcher diskutiert werden kann, ist die Beschreibung der allometrischen Wachstumszusammenhänge. Es existiert eine Vielzahl verschiedener Algorithmen, welche diese beschreibt. In der vorliegenden Studie wurde der Algorithmus gewählt, welcher den passendsten R^2 -Wert lieferte.

Die Positionsgenauigkeit der Referenzbäume weist eine gewisse, nicht exakt quantifizierbare Abweichung zur Realität auf. Diese ergibt sich aus den verwendeten Geräten und Messungenauigkeiten, welche durch die gewählten Methoden bedingt sind. Für die IT-gestützte terrestrische Methode der RWTH Aachen liegen Vergleichswerte früherer Untersuchungen vor, welche eine Abweichung von 0.1 - 0.2m aufwiesen (RWTH Aachen 2017). Somit kann angenommen werden, dass die Drohnendaten genauer sind, als in der Genauigkeitsanalyse hinterlegt wurde.

Weiter sind zwischen Stammfusskoordinaten und Kronenspitzen Abweichungen möglich, die auf die Wuchsform der Bäume zurückzuführen sind (vgl. Eysn et al. 2015). Zudem können, durch das Detektionsverfahren, die exakten Baumspitzen verfehlt werden, weil die Reflexion leicht neben der effektiven Baumspitze erfolgt (Yu et al. 2004).

5.1.2 Genauigkeit untersuchter Parameter

Genauigkeitsvergleich FINT und LiForest

Die Genauigkeitsanalyse erbrachte betreffend **Vollständigkeit** für FINT und LiForest keine signifikanten Unterschiede. Während im Williwald mit FINT leicht bessere Resultate erzeugt wurden, war in Rona LiForest etwas genauer. Die mit FINT und LiForest erzielten Detektionsraten lagen verglichen mit früheren Untersuchungen in einem eher tiefen Bereich. Bayer et al. (2013) erreichten Vollständigkeiten über 87%, Persson et al. (2002) Erkennungsraten zwischen 80 und 90%, Sperlich et al. (2014) sogar deren 87.5%.

Bei der Interpretation der Ergebnisse gilt es jedoch die Struktur der Wälder zu berücksichtigen. Die verglichen mit früheren Untersuchungen geringen Erkennungsraten sind vor allem auf die Kraft'schen Baumklassen beherrscht und unterdrückt zurückzuführen. Jakubowski et al. (2013) sowie Heurich (2006) erkannten, dass die Detektionsrate bei abnehmender Dominanz der Bäume stark abnimmt. Dieses Ergebnis war zu erwarten, weil die Baumerkennung davon abhängt, ob die Bäume überschirmt werden, was bei unterdrückten oder beherrschten Bäumen der Fall ist. Gemäss Eysn et al. (2015) ist die Erkennungsrate stark von der vertikalen Struktur der Wälder abhängig. Bei ausgeprägter vertikaler Strukturierung ist die Vollständigkeit der Detektionen, unabhängig vom angewandten Verfahren, geringer. Dies wird von Vauhkonen et al. (2011) bestätigt. Als zusätzlicher Faktor neben der Waldstruktur hat die Punktdichte einen Einfluss. Weiter hat die Kluppschwelle einen hohen Einfluss auf die Vollständigkeit der erkannten Bäume (ebd.). Bayer et al. (2013) verwendeten beispielsweise eine Kluppschwelle von 20 cm. Wenn die Kluppschwelle im Williwald und in Rona bei 22cm angesetzt worden wäre, wäre die Vollständigkeit der erkannten Bäume ebenfalls 9 resp. 21% höher gewesen (Condrau 2017) und somit im Bereich der bisherigen Untersuchungen.

Die **Korrektheit** der mit FINT und LiForest detektierten Bäume war im Williwald rund 15 – 25% höher als in Rona. Damit zeigt die Korrektheit der Daten im Williwald einen ähnlichen Wert wie beim schlechtesten Verfahren der Untersuchung von Vauhkonen et al. (2011). Gemäss Menk et al. (2017) kann die tiefe Korrektheit auf die Verwendung eines ungeglätteten nDOM zurückzuführen sein. Vor allem in stark strukturierten Wäldern entstehen deswegen viele Fehldetektionen. Eysn et al. (2015) untersuchten mit LiDAR-Daten das Verfahren vom lokalen Maximum mit und ohne vorgängige Filterung des nDOM und erkannten, dass die Filterung die Fehlerrate um mehr als das Zehnfache reduzierte.

Alternativ zur Glättung kann die Auflösung der Rasterzellen reduziert werden (Menk et al. 2017). Je grösser die Rasterzellen gewählt werden, desto grösser ist allerdings auch der entstehende Datenverlust und die Detektionsrate wird herabgesetzt.

Selbst wenn ein gewisser Anteil der Fehlerrate auf die nicht durchgeführte Glättung zurückzuführen ist, kann der deutliche Unterschied zwischen den Versuchsflächen Rona und Williwald damit nicht erklärt werden. Weswegen die Korrektheit der Detektionen in Rona sowohl bei FINT als auch LiForest geringer war, kann nicht abschliessend erklärt werden. Die Autoren vermuten, dass die ausgeprägte Rottenstruktur einen Einfluss hatte. Zudem wiesen DOM und abgeleitetes nDOM in Rona deutlich mehr Artefakte auf. Die Kombination sämtlicher Faktoren könnte die deutlichen Unterschiede zwischen Rona und Williwald ergeben haben. Die Bereinigung der Artefakte (vgl. Jakubowski et al. 2013) hätte möglicherweise die Anzahl korrekter Detektionen erhöht.

Die Genauigkeit der abgeleiteten **Stammfusskoordinaten** befindet sich für FINT und LiForest in einem ähnlichen Bereich und es konnten keine signifikanten Unterschiede belegt werden. Die Vermutung der Autoren ist, dass bei LiForest ebenfalls der Algorithmus des lokalen Maximums verwendet wird und deswegen kaum Unterschiede erkennbar waren. Wegen fehlenden Informationen zum implementierten Algorithmus kann dies jedoch nicht abschliessend beurteilt werden.

Eysn et al. (2015) erreichten für das Verfahren der lokalen Maxima je nach vertikaler Strukturierung und Nadelholzanteil mittlere Abweichungen der Stammfusskoordinaten von 1.4 bis 1.9m. Somit war die mittlere Genauigkeit in der hier vorgestellten Untersuchung sogar etwas besser. Allerdings ist die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten neben dem verwendeten Detektionsalgorithmus von weiteren Faktoren abhängig und nicht 1:1 vergleichbar. Wichtige Faktoren sind die Positionsgenauigkeit der Referenzbäume, die Genauigkeit des DGM, die Qualität der Kamera sowie Fehldetektionen aufgrund spezieller Baumformen (Hänger, Zwiesel, Steiläste, ...). Vor allem in Gebirgswäldern kann die Position von Baumwipfel zum Stammfuss aufgrund der Wuchsform massiv voneinander abweichen. Eysn et al. (2015) konnten Abweichungen von bis zu 5m Horizontaldistanz feststellen. Anhand eigener Beobachtungen in Gebirgswäldern konnten diese Werte bestätigt werden (Abbildung 46).



Abbildung 46: Fichte mit wuchsbedingter grosser Abweichung zwischen den Stammfusskoordinaten und der Kronenspitze

Eine Verbesserung der Ausgangsdaten könnte gemäss Przybilla et al. (2015) durch eine Kreuzbefliegung erzielt werden. Kreuzbefliegungen sind im Gebirge aufgrund der Hangneigung jedoch kaum realisierbar. Die gewählte Flughöhe von 180m kann kritisch hinterfragt werden; bei den durchgeführten Flughöhenversuchen im Williwald konnten bezüglich der Detektionsrate jedoch keine signifikanten Unterschiede belegt werden. Auffällig ist jedoch, dass viele Studien zu Drohnendaten mit einer Befliegungshöhe von 90 bis 100m durchgeführt wurden (vgl. Bayer et al. 2013, Persson et al. 2002, Sperlich et al. 2014). Thiel und Schmullius (2016) erreichten mit einer Befliegungshöhe von 100m mit Drohnendaten genauere Resultate als mit LiDAR-Daten. Gemäss Przybilla et al. (2015) ist die Qualität der verwendeten Kamera ausschlaggebend für die Güte der Rohdaten und somit auch von der Flughöhe abhängig. Anhand der Flughöhenversuche konnte dies bestätigt werden, weil das Kreuz zur Markierung des Maschinenstandorts nur auf 100 und 140m eindeutig sichtbar und auf 180m nur noch schwach erkennbar. Um die Sichtbarkeit des Maschinenstandorts zu gewährleisten sollte deswegen die Reduktion der Flughöhe in Betracht gezogen werden.

Genauigkeitsvergleich FINT und IT-gestütztes TLS-Verfahren

Die Vollständigkeit des TLS-Verfahrens war aufgrund des teils dichten Unterwuchses im Marteloskop Williwald mit 28% relativ gering, weil nur ein Teil der Fläche aufgenommen werden konnte. Von Thies und Spiecker (2004) wurde eine Vollständigkeit von 52% erreicht, eine höhere Vollständigkeit

wurde ebenfalls durch den Unterwuchs verhindert. Die Korrektheit des TLS-Verfahrens hingegen liegt bei 100%. Die Genauigkeit der generierten Stammfusskoordinaten war deutlich niedriger, als in früheren Studien, jedoch signifikant höher als mit FINT. Neben bereits genannten Gründen der Ungenauigkeit von Drohnendaten hängt dies damit zusammen, dass beim TLS die Stämme detektiert werden und nicht von den Kronenspitzen auf die Stammfusskoordinaten geschlossen werden muss. Aschoff et al. (2004) erreichten mittlere Abweichungen der Stammfusskoordinaten von 0.11m und eine Standardabweichung von 0.13m. Deswegen kann davon ausgegangen werden, dass die Referenzbäume bereits einen Positionsfehler von bis zu einem halben Meter aufweisen und die terrestrischen Vergleichsdaten nicht ganz genau sind. Dies würde gleichzeitig bedeuten, dass neben den Abweichungen des TLS-Verfahrens auch die Abweichungen der Drohnendaten in Wirklichkeit geringer sind und die Daten somit eine höhere Positionsgenauigkeit aufweisen. Derzeit sind dies jedoch nur Vermutungen, welche erst mit einem Verfahren, welches die Positionsgenauigkeit der Referenzbäume erhöht, geprüft werden müssten.

Korrelation der Genauigkeit mit den Kraft'schen Baumklassen

Auf beiden Marteloskopflächen korrelierte die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten für FINT und LiForest mit den Kraft'schen Baumklassen. Die Signifikanz des Dunn-Tests konnte nicht zwischen jeder sozialen Klasse nachgewiesen werden. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass bei abnehmender Dominanz der Bäume die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten abnimmt. Dass die Signifikanz nicht nachgewiesen werden konnte, kann auf den sehr geringen Stichprobenumfang zurückgeführt werden. Zudem ist die Einteilung der Bäume in Kraft'sche Baumklassen stets subjektiv und nicht vollständig objektivierbar (Ammann 2004, 53). Die Grenzen zwischen den sozialen Klassen sind fließend und eine mögliche Erklärung für die teils nicht signifikanten Unterschiede.

Beim Laubholz hat sich in früheren Studien gezeigt, dass die soziale Stellung weniger entscheidend ist als die Kronenform (Eysn et al. 2015). Deswegen wird vermutet, dass bei hohem Laubholzanteil der Zusammenhang zwischen Kraft'scher Baumklasse und Genauigkeit der abgeleiteten Stammfusskoordinaten weniger deutlich oder nicht ersichtlich ist. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs pro sozialer Klasse müssten zur wissenschaftlichen Belegung dieser Aussage Folgeaufnahmen durchgeführt werden.

Abgeleitete BHD

Die abgeleiteten BHD streuten in beiden Marteloskopflächen bei beiden Programmen relativ stark und unterschieden sich nicht signifikant. Die Mittelwerte und Mediane der Abweichungen von den terrestrischen Referenzbäumen waren im Williwald höher.

Eine erste Problematik bei der Bestimmung der BHD ist, dass die Baumhöhe durch die Messung mit dem Vertex tendenziell überschätzt und mit Fernerkundungsdaten eher unterschätzt wird (Rössler 2000). Die Ableitung der BHD beruhte zudem auf einer linearen Regression, die lediglich von der Baumhöhe abhängig ist. In der Dissertation von Bücken (2014) wurden verschiedene allometrische Gleichungen verglichen und aufgezeigt, dass durch den Einbezug der Kronenfläche die Genauigkeit der BHD-Ableitung verbessert werden kann. Der höhere RMSE im Williwald könnte auf die Baumartenvielfalt zurückzuführen sein, weil deswegen keine allgemeingültige Funktion abgeleitet werden konnte. Der Zusammenhang von BHD und Höhe ist von weiteren Faktoren wie der Baumart, Alter, Standortsbedingungen etc. abhängig.

Korrelation Genauigkeit der abgeleiteten Stammfusskoordinaten und Hangneigung

Die Ergebnisse bezüglich des Zusammenhangs der Genauigkeit der abgeleiteten Stammfusskoordinaten und der Hangneigung waren überraschend und nicht mit den Ergebnissen

anderer aktueller Forschungen übereinstimmend. Khosavipour et al. (2015) kamen zum Ergebnis, dass die horizontale Abweichung der Stammfusskoordinaten mit zunehmender Hangneigung grösser wird. In Rona war das Gegenteil zutreffend, denn sowohl für FINT als auch für LiForest konnte für die herrschenden Bäume eine signifikant geringere Abweichung als im Willwald festgestellt werden. Möglicherweise könnte der Grund für die höheren Abweichungen der herrschenden Bäume im Willwald am höheren Laubholzanteil liegen und weniger auf die Hangneigung zurückzuführen sein. Denn wie bereits ausgeführt führen Laubbäume aufgrund der Kronenform oft zu grösseren Abweichungen (vgl. Eysn et al. 2015; Menk et al. 2017).

Auswertung Drohnendaten durch RWTH Aachen

Die Auswertung der Drohnendaten durch die RWTH Aachen hat gezeigt, dass die Datenverarbeitung grundsätzlich funktioniert und Einzelbäume mit dem Algorithmus der RWTH Aachen abgeleitet werden können. Dadurch, dass keine Referenzdaten vorhanden waren, um die Kalibrierung des Einzelbaumerkennungsprogrammes vorzunehmen und weil DGM und DOM aus den Drohnendaten abgeleitet wurden, ist die Erkennungsrate wahrscheinlich jedoch deutlich geringer als normalerweise. Für eine höhere Erkennungsrate wären genauere Fernerkundungsdaten notwendig. Die Ableitung der Stammfusskoordinaten aufgrund der vorliegenden Daten ist fehlerhaft, weil mit dem nDOM von falschen Daten ausgegangen wird.

Anstelle einer Drohne mit Kamera wäre ein System mit kleinem Laserscanner (z.B. Velodyne) denkbar. Dieser liefert Punktwolken mit 100-200 Punkten pro Quadratmeter. Aufgrund des aktiven Sensors reicht es im Gegensatz zur Photogrammetrie aus, den Boden einmalig zu sehen, um ein DGM zu erstellen. Weil der Laserscanner auch zur Seite scannt, sollte er auch in Bergregionen einsetzbar sein (Bücken 2017).

5.1.3 Praxistauglichkeit der drohnenbasierten Daten

Beurteilung aufgrund der Genauigkeitsanalyse

Damit Bäume bei der Seilbringung als Stützen- oder Ankerbäume verwendbar sind, müssen sie ausreichend dimensioniert und nicht zu weit entfernt vom Tragseil sein. Mit der Genauigkeitsanalyse konnte gezeigt werden, dass die Erkennungsrate bei den als Stützen resp. Anker in Frage kommenden Bäumen der Kraft'schen Klassen vorherrschend, herrschend und mitherrschend hoch ist. Die mittlere Abweichung der Stammfusskoordinaten lässt vermuten, dass die Genauigkeit für die forsttechnische Planung der Seillinien ausreichend ist. Die mittlere Abweichung der BHD stimmt ebenfalls (besonders in Rona) optimistisch, allerdings ist die deutlich höhere Streuung der BHD kritisch zu betrachten.

Seilkranprojektierungssoftwares Seilaplan und SeilkranPROjekt

Der Ansatz von Bont (2013) eine Projektierungssoftware in GIS zu implementieren ist vielversprechend. Leider hat sich bei der Anwendung von Seilaplan bei der Fläche Buhütte gezeigt, dass das Plug-In nicht fehlerfrei läuft und noch verbessert werden müsste.

Die anschliessend verwendete Software SeilkranPROjekt überzeugte durch Benutzerfreundlichkeit und Stabilität. Ein Nachteil war, dass die im QGIS erstellten Geländeprofile erst aus dem GIS exportiert und anschliessend ins SeilkranPROjekt wieder importiert werden mussten. Die optimale Stützenposition konnte eruiert werden, es musste aber in QGIS geschaut werden, ob an dieser Stelle überhaupt ein geeigneter Baum vorhanden ist. Diese Überprüfung gestaltet sich umständlich, weswegen der Ansatz von Bont (ebd.) sinnvoll erscheint, die Projektierung im GIS zu implementieren.

Abgeleitete Stammfusskoordinaten, BHD der Stützen-, Ankerbäume und Ausgangsstandorte

Die Stützen- resp. Ankerbäume waren bei der Feldbegehung in allen Testflächen auffindbar und von der Position her für die Planung verwendbar. Bei gleichförmigen Beständen hätte die Verwendung eines GPS die Orientierung erleichtert und die schnellere Auffindbarkeit der Bäume gewährleistet.

Die effektiven BHD wichen zum Teil erheblich von den mit FINT berechneten BHD ab, hatten jedoch nur bei einem Stützenbaum Auswirkungen auf die Realisierbarkeit der Linie. Die BHD der Weissstannen wurden von FINT gegenüber den effektiven BHD deutlich unterschätzt. Der Grund liegt wahrscheinlich in wachstumskundlichen Unterschieden zwischen der Weissstanne und der Fichte. Interessant wäre es, baumartenspezifische Funktionen zur Ableitung der BHD zu generieren und zu schauen, ob dies zu einer Verbesserung der Ergebnisse führt.

Der nicht verwendbare Ankerbaum der Fläche Huetgraben zeigt die Grenzen der Seillinienplanung mit Drohnendaten auf. Es ist nicht möglich, die zur Realisierbarkeit der Seillinie wichtigen Parameter Verankerung und Stabilität zu erfassen. Diese sind weiterhin bei einer Feldbegehung zu beurteilen.

Ein Teil der Positionsabweichung der geplanten Seillinie von den Stützen- und Ankerbäumen kann durch die Trassierung begründet werden. Mit dem Wyssenkompass sind nur ganze Gon verlässlich messbar und es muss bei der Trassierung immer mit einer gewissen Abweichung gerechnet werden. Wesentlich grössere Schwierigkeiten als die Auffindbarkeit der Stützen- und Ankerbäume bereitete die Bestimmung des exakten Ausgangspunkts für die Trassierung. So musste bei fast allen Linien eine seitliche Verschiebung vorgenommen werden, sobald der erste Stützenbaum bestimmt war. Ein möglicher Ansatz um dies zu verhindern, wäre die Trassierung von einem positiven Kardinalpunkt aus zu beginnen oder wie bereits bei der Fläche Holzhackerwald die vorgängige Markierung der Maschinenstandorte vorzunehmen. Allerdings muss bei letzterer Variante sichergestellt sein, dass die Markierungen dann auch sichtbar sind, sprich eine geeignete Flughöhe verwendet und eine Markierung mit ausreichend Kontrast zur Umgebung angebracht werden.

Erkennbarkeit von Strukturelementen für die waldbauliche und forsttechnische Planung

Das drohnenbasierte Orthophoto erleichtert die Orientierung. Die Auflösung des Drohnenbildes begrenzt dessen Einsatzmöglichkeiten jedoch. Grosse Kronen von isoliert stehenden Bäumen der Oberschicht sind einfach zu erkennen und klar abgrenzbar. In dichten Beständen wird die Zuordnung von Kronen auf einzelne Bäume bereits schwieriger. Bestandeslücken sind abhängig von deren Grösse meist erkennbar. Der Schattenwurf spielt hier eine entscheidende Rolle. Bei starker Beschattung ist die Qualität der drohnengenerierten Bilder bodennah relativ schlecht und erschwert das Erkennen von Verjüngungsansätzen. Eine Verbesserung könnte sich durch die Reduktion der Flughöhe ergeben, jedoch kann selbst dann nicht gewährleistet werden, dass die Verjüngung immer erkennbar ist.

Die richtige Lückengrösse zu bestimmen, um genügend Licht für die Verjüngung zu erhalten, ist ohne Geländebegehung noch nicht möglich. Somit kann die vorgestellte Methode eine Ergänzung und Vereinfachung der bisherigen Anzeichnungspraxis darstellen, diese jedoch nicht ersetzen.

Der Mehrwert der drohnengenerierten Orthophotos hat sich bei der konventionell geplanten Seillinie im Huetgraben gezeigt. Ohne das Drohnenbild hätte die Linie verschoben werden müssen. Anhand des Bildes war die Planung auf den positiven Kardinalpunkt möglich. Somit kann festgehalten werden, dass das drohnenbasierte Orthophoto zur Planung der Seillinien eine wesentliche Unterstützung bietet.

Ob dazu die swisstopo-Daten ausreichen oder eine Drohnenbefliegung notwendig ist, hängt davon ab, wie aktuell die Daten sein müssen.

Differenzanalyse vor und nach Eingriff

Ein Satz an Orthophotos vor und nach einem Eingriff sind für weitere Analysen interessant. Dadurch sind die waldbaulichen Strukturen vor und nach dem Eingriff vergleichbar. Durch die Weiterverarbeitung der Drohnendaten können die auf dem Orthophoto erkennbaren Daten deutlicher hervorgehoben und durch FINT mit Zahlen hinterlegt werden. Bei der Buhütte konnte die Überprüfung anhand des Anzeichnungsprotokolls vorgenommen und aufgezeigt werden, dass die Kalibrierung sehr exakt erfolgen kann. Die Überprüfung der Resultate müsste im Feld vorgenommen werden, indem betrachtet wird, ob die Entnahmebäume gemäss FINT tatsächlich entnommen wurden.

5.1.4 Flughöhenversuche

Qualität der Drohnenbilder und Sichtbarkeit des Maschinenstandorts

Die Bildqualität ist beim DOM von swisstopo am besten. Bei den Drohnenbildern zeigt sich die Qualitätsabnahme mit zunehmender Befliegungshöhe. Allerdings sind die Qualitätseinbussen gering, so dass vor der Reduktion der Flughöhe bedacht werden sollte, dass dadurch die zur Befliegung und anschliessenden Bearbeitung (Zusammenfügen der Einzelbilder) notwendige Zeit zunimmt. Es gilt somit, das Optimum zwischen Bildqualität und benötigter Zeit zu finden. Dass die Qualität nicht deutlich besser ist bei niedriger Flughöhe, könnte damit zusammenhängen, dass die Triangulation durch die Reduktion der Flughöhe an Genauigkeit verliert.

Die Qualität der Drohnendaten kann unabhängig von der Befliegungshöhe geringer sein, wenn ungünstige Lichtverhältnisse herrschen. Insbesondere ist dies bei Schattenwurf der Fall. Es können weniger gut erkennbaren Bäume führen oder dazu, dass gar keine Daten vorhanden sind. Im letzteren Fall werden die fehlenden Daten aus den nächstgelegenen verfügbaren Daten interpoliert. Dies kann zu grossen Abweichungen zwischen der Realität und den Drohnendaten führen. Um dies zu vermeiden, sollten Befliegungen wenn immer möglich an bedeckten Tagen durchgeführt werden, um Verzerrungen durch Schattenwurf gering zu halten.

Die Sichtbarkeit von Strukturelementen, welche die waldbauliche Entscheidung beeinflussen, wird durch die Reduktion der Flughöhe von 180m auf 100m nicht genügend stark beeinflusst, um einen Einfluss auf die Entscheidung zu haben. Ein Argument für die Reduktion der Flughöhe auf 140m oder 100m könnte allerdings die Sichtbarkeit der Maschinenstandorte sein. Bevor voreilige Schlüsse gezogen werden, sollte jedoch bei einer Befliegungshöhe von 180m überprüft werden, ob die schlechte Sichtbarkeit der Maschinenstandortsmarkierung auf den Einfluss der Lichtverhältnisse respektive die verwendete Farbe des Kreuzes zurückzuführen war. In der Literatur wird die Flughöhe häufig zwischen 90 und 100m gewählt (Bayer et al. 2013, Persson et al. 2002, Sperlich et al. 2014).

Detektionsrate von FINT in Abhängigkeit der Flughöhe

Die Reduktion der Flughöhe hatte auf die Detektionsrate von FINT keinen signifikanten Einfluss. Dadurch, dass die Rastergrösse von DOM und DGM für die Verwendung von FINT identisch sein muss, ist das DOM anzupassen und die detaillierteren Informationen durch die niedrigere Befliegungshöhe können nicht genutzt werden. Somit wird derzeit die höchstmögliche Genauigkeit der Daten durch das DGM vorgegeben. Die Anpassung der Rastergrösse hat einen ähnlichen Effekt wie eine Glättung. Der Mehrwert, welcher durch die tiefere Befliegungshöhe erreicht wird, kann lediglich bei der optischen Ansprache des DOM genutzt werden.

6 Folgerungen

Die Forschungsfrage zur Genauigkeitsanalyse kann mit den Hypothesen 1 - 5 wie folgt beantwortet werden:

Hypothese 1 («Zwischen FINT und LiForest unterscheiden sich die Genauigkeiten der generierten Stammfusskoordinaten nicht.») kann bestätigt werden. Die durchschnittlichen Abweichungen der Stammfusskoordinaten, welche im Vergleich früherer Untersuchungen lagen, unterschieden sich für FINT und LiForest nicht signifikant und lagen zwischen 1.25 und 1.4m. Die Detektionsrate lag im Vergleich zu früheren Untersuchungen für beide Programme mit ca. 60 - 75% in einem niedrigen Bereich, konnte aber durch Erklärungen im Diskussionsteil (Kluppschwelle, vertikale Strukturierung) relativiert werden. Um die im Vergleich zu früheren Untersuchungen eher geringe Korrektheit zu erhöhen, wäre die Glättung und Bereinigung von Artefakten vor der Bearbeitung des nDOM zu prüfen. Die deutlich geringere Anzahl korrekter Detektionen der Stammfusskoordinaten zwischen den Marteloskopflächen kann nicht abschliessend erklärt werden. Gründe dafür könnten eine Kombination aus Effekten der Rottenstruktur (zusammenhängend mit vertikaler Strukturierung), des höheren Anteils an Artefakten und der niedrigeren Detektionsrate in Rona sein.

Die zweite Hypothese («Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten ist bei FINT und dem IT-gestützten TLS-Verfahren ähnlich.») konnte nicht bestätigt werden. Die Abweichungen der Stammfusskoordinaten beim IT-gestützten TLS-Verfahren waren signifikant geringer. Der Vergleich von Fint und dem TLS-Verfahren bereicherte das Projekt um einen weiteren Genauigkeitsvergleich. Es zeigten sich dadurch die Vor- und Nachteile von terrestrischen resp. drohnengestützten Verfahren. Durch die Ableitung der Stammfusskoordinaten anhand der Kronenspitzen sind die Positionsfehler bei FINT höher. Das TLS-Verfahren hingegen ist bei dichtem Unterwuchs, bei welchem das drohnengestützte Verfahren problemlos funktioniert, nicht anwendbar.

Die dritte Hypothese («Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten von FINT und LiForest korreliert mit den Kraft'schen Baumklassen.») kann bestätigt werden. Die Genauigkeit der Stammfusskoordinaten korreliert sowohl bei FINT als auch bei LiForest mit den Kraft'schen Baumklassen. Die Signifikanz konnte aufgrund des Stichprobenumfangs nicht bei allen Baumklassen nachgewiesen werden. Durch die Einteilung in Kraft'sche Baumklassen konnte gezeigt werden, dass die Vollständigkeit der Detektionen mit abnehmender Dominanz der Bäume abnimmt. Dass die Signifikanz zwischen den sozialen Klassen nicht immer gegeben war, kann auf den geringen Stichprobenumfang und die subjektive Einteilung in Kraft'sche Baumklassen zurückgeführt werden. Der Vergleich der Boxplots der sozialen Klassen zeigt eine höhere Abweichung der Stammfusskoordinaten bei den sozial niedriger gestellten Klassen nach Kraft. Die Genauigkeit der sozial höhergestellten Kraft'schen Baumklassen ist somit höher, als es der Mittelwert vermuten lässt.

Hypothese 4 («Die mit FINT und LiForest abgeleiteten BHD weichen nur geringfügig von den BHD-Werten der Referenzbäume ab. «) kann nicht bestätigt werden. Die abgeleiteten BHD von FINT und LiForest weichen zum Teil stark von den BHD der Referenzbäume ab. Der RMSE beträgt bei beiden Marteloskopflächen ca. 10cm. Der Einbezug weiterer Parameter wie bspw. Kronenfläche zur Ableitung des BHD könnte die Genauigkeit erhöhen. Weiter wäre bei Flächen mit grossem Baumartenportfolio zur Verbesserung der Genauigkeit die Verwendung von baumartenspezifischen Funktionen zu prüfen.

Die Standardabweichung der BHD sind auf beiden Marteloskopflächen ähnlich. Die Differenzen der RMSE zwischen den terrestrischen Referenzdaten und den Programmen FINT und LiForest liegen mit 0.4cm in Rona und 1.6cm im Willwald ebenfalls ziemlich nahe beieinander.

Hypothese 5 («Die Genauigkeit der generierten Daten von FINT und LiForest nimmt mit zunehmender Hangneigung ab.») konnte nicht bestätigt werden, denn die genaueren Resultate wurden in der Fläche in Rona und somit derjenigen Fläche mit der grösseren Hangneigung erreicht. Dass eine grössere Hangneigung auf die Positionsgenauigkeit keinen negativen Einfluss hatte, könnte damit zusammenhängen, dass der Einfluss des Laubholzanteils denjenigen der Hangneigung überwiegt. Dies kann jedoch derzeit nur vermutet werden.

Durch die erhaltenen Resultate kann zur 1. Forschungsfrage somit anhand der Genauigkeitsanalyse ausgesagt werden, dass die Informationen zu den Stammfusskoordinaten relativ präzise generiert werden können. Bei der Ableitung der BHD wurde eine höhere Genauigkeit erhofft; es wurden jedoch mehrere Ansätze zur Verbesserung in zukünftigen Projekten genannt.

Ein grundsätzliches Problem ergab sich dadurch, dass die Genauigkeit der terrestrischen Referenzdaten nicht bekannt ist. Es kann somit lediglich anhand von Ergebnissen vorhergegangener Studien zur IT-gestützten TLS-Methode vermutet werden, dass die terrestrischen Daten Messfehler von bis zu 0.5m aufweisen und somit sowohl die IT-gestützte TLS-Methode als auch die Ableitung mit FINT und LiForest noch genauer ist, als in der Untersuchung angenommen.

Hypothese 6 («Die Genauigkeit der drohnengenerierten DOM und daraus abgeleiteten Stammfusskoordinaten, welche anschliessend mit dem Projektierungsprogramm dargestellt wurden, reicht für die Planung der Seillinien im Gelände aus. «) konnte mit der Überprüfung der Praxistauglichkeit bestätigt werden. Die Genauigkeit der drohnengenerierten DOM und daraus abgeleiteten Stammfusskoordinaten war ausreichend, um mit einem Projektierungsprogramm die Stützen- und Ankerbäume abzuleiten und diese für die Planung der Seillinien zu verwenden. Zur Bestimmung der Anker- und Stützenbäume im Feld waren die Orthophotos hilfreich, weil lediglich anhand der Azimutangaben und Distanz zu den Bäumen aufgrund des nicht exakt bestimmbareren Startpunktes keine Bestimmung der entsprechenden Bäume möglich war. Das Problem der genauen Positionsbestimmung des Maschinenstandorts konnte auch mit vorgängiger Markierung nicht gelöst werden. Dennoch konnte mit dem Feldversuch gezeigt werden, dass die Linienplanung anhand der Drohnendaten möglich ist.

Hypothese 7 («Die auf Basis der Drohnenbefliegung bestimmten Stützen- und Ankerbäume können ihre Funktion erfüllen.») kann nicht generell, jedoch für die meisten Bäume bestätigt werden. Ihre Funktion konnten aufgrund von BHD-Abweichungen oder unzureichender Verankerung nicht alle Bäume wahrnehmen. Die auffällig grossen Differenzen der BHD zwischen FINT und terrestrischer Verifizierung bei Weisstannen konnten auf ein anderes Wachstumsverhalten als bei der Fichte zurückgeführt werden. Weil dadurch eine Unterschätzung der BHD stattfand, war die technische Machbarkeit nicht gefährdet. Es ist naheliegend, dass baumartenspezifische Funktionen zur Kalibrierung von FINT plausiblere Resultate liefern würden. Sofern diese nicht verfügbar sind, sollte die Linienplanung tendenziell eher unter Verwendung von dickeren Bäumen erfolgen, um die technische Machbarkeit sicherzustellen. Die Beurteilung der ausreichenden Verankerung kann nicht anhand von Drohnendaten erfolgen, sie ist weiterhin durch eine Feldbegehung zu verifizieren.

Hypothese 8 («Für die waldbauliche und forsttechnische Planung notwendige Strukturelemente sind auf den Drohnensbildern erkennbar und bei der Feldbegehung auffindbar.») kann anhand der Ergebnisse nur zum Teil bestätigt werden. Die für die forsttechnische Planung notwendigen Strukturelemente sind erkennbar. Dies, weil als potenzielle Anker- oder Stützenbäume die Bäume der Kraft'schen Klassen vorherrschend und herrschend interessant sind. Mit der Genauigkeitsanalyse konnte aufgezeigt werden, dass diese fast lückenlos erkannt werden. In den Flächen zur Überprüfung der Praxistauglichkeit waren sie mit dem Orthophoto meist problemlos auffindbar. Schwierigkeiten ergeben sich in homogenen Beständen, bei denen markante, sowohl auf dem Orthophoto als auch im Gelände auffindbare Elemente fehlen.

Für die waldbauliche Planung sind die notwendigen Strukturelemente nur zum Teil erkennbar. Grössere Lücken, vorratsreiche Flächen und grosse Verjüngungsansätze sind auffindbar, wohingegen die Grenzen bei kleinflächiger Verjüngung und kleinen Lücken liegen. Schattenwurf wirkt bei der Erkennung von bodennahen Strukturelementen erschwerend, weswegen nach Möglichkeit eine Befliegung an bewölkten Tagen durchzuführen ist, wenn solche Strukturelemente erkannt werden sollen. Zur Überprüfung der Lichtverhältnisse ist weiterhin eine Geländebegehung notwendig. Erste Ergebnisse, Fischaugenperspektiven in einem GIS zu ermöglichen sind vorliegend, jedoch noch nicht ausgereift genug, um in der Praxis Verwendung zu finden und bedürfen weiterer Forschung.

Hypothese 9 («Dem Differenzbild, welches durch die Befliegung vor und nach der Hiebsmassnahme erstellt wird, können zusätzliche Informationen entnommen werden, welche Rückschlüsse zum ausgeführten Hieb erlauben.») konnte bestätigt werden. Es können durch den Vergleich der Orthophotos Aussagen zur Art, Stärke und dem Ziel des Eingriffs erfolgen. Weiter sind Waldstrukturen und Maschinenstandorte erkennbar. Aussagen zur Genauigkeit von aus dem Differenzbild errechneten Daten sind mit Vorsicht zu geniessen, weil sie lediglich an bei einer Testfläche vorliegen.

Somit kann mit der Überprüfung der Praxistauglichkeit die zweite Forschungsfrage mit Ausnahme der diskutierten Punkte positiv beantwortet werden. Die Genauigkeit der Drohnendaten ist ausreichend, um diese anstelle der swisstopo-Daten verwenden zu können.

Mit den Flughöhenversuchen konnte Hypothese 10 («Durch die Reduktion der Flughöhe wird die Qualität der drohnengenerierten Bilder positiv beeinflusst und die Sichtbarkeit von am Boden angebrachten Markierungen sowie Strukturelementen des Waldes verbessert.») bestätigt werden, weil sich durch eine Reduktion der Flughöhe die Qualität der Bilder verbesserte. Es wäre in einem Folgeversuch zu überprüfen, ob die Sichtbarkeit des Maschinenstandortes bei 180m tatsächlich aufgrund der gewählten Flughöhe nicht mehr gewährleistet ist, oder ob dies, wie vermutet, auf den Einfluss der Lichtverhältnisse zurückzuführen ist. Falls bestätigt werden kann, dass aufgrund der Flughöhe die Sichtbarkeit des Maschinenstandorts nicht mehr gewährleistet ist, sollte eine Reduktion auf 140m Flughöhe erfolgen. Diese Reduktion hat jedoch zur Folge, dass bei technischen Schwierigkeiten mit der Drohne weniger Zeit bleibt, um die Kontrolle wieder zurück zu gewinnen. Zudem wird die mit einem Flug abdeckbare Fläche kleiner, da jederzeit auf Sicht geflogen werden muss und die Drohne bei reduzierter Flughöhe aufgrund des flacheren Winkels zwischen Beobachter und Drohne schneller am Horizont verschwindet. Es gilt also einen Kompromiss zu finden.

Hypothese 11 («Die Qualität des anhand der Drohnensbefliegung erstellten DOM ist ähnlich, wie die des DOM von swisstopo und kann somit für die Planung in der Praxis verwendet werden. «) konnte bestätigt werden, denn die Qualität der Drohnendaten unterscheidet sich von den swisstopo-Daten

nicht wesentlich. Folglich ist die Planung mit Drohnendaten möglich. Durch die Anpassung des DOM an die Auflösung des DGM können derzeit nicht sämtliche Informationen genutzt werden. Die Drohnendaten weisen bei Schattenwurf schlechtere Genauigkeiten auf und sind in schattigen Bereichen wegen den interpolierten Daten vorsichtig zu interpretieren. Weil dies jedoch vor allem bodennahe Bereiche betrifft, ist dieser Effekt vor allem aus waldbaulicher Sicht relevant und tangiert die forsttechnische Realisierbarkeit weniger.

Die letzte Hypothese («Durch eine Reduktion der Flughöhe verändert sich die Detektionsrate von FINT nur geringfügig.») konnte bestätigt werden. Einen wesentlich grösseren Einfluss könnte die Reduktion der Flughöhe haben, falls DOM und DGM mit der gleichen Befliegung realisiert werden können. Dann muss keine Anpassung der Rastergrösse an das DGM erfolgen und es können die genaueren Daten genutzt werden. Denkbar wäre dies bei der Verwendung einer LiDAR-Drohne.

Die dritte Forschungsfrage kann anhand der Flughöhenversuche somit zum Teil bestätigt werden. Die Reduktion der Flughöhe verbessert die Qualität der drohnengenerierten Bilder. Allerdings ist die Erkennung von Strukturelementen auch bei 100m Befliegungshöhe nur begrenzt möglich und die Detektionsrate verbessert sich durch die reduzierte Flughöhe nicht signifikant. Eine verbesserte waldbaulich-forsttechnische Planung ist jedoch bereits bei einer Flughöhe von 180m möglich.

Als Gesamtfazit kann die vierte Forschungsfrage beantwortet werden. Die vorgestellte Methode mit Drohnen- und LiDAR-Daten vereinfacht und unterstützt die Anzeichnung im Gelände. Die Genauigkeit der Methode reicht aus, um für die forsttechnische Planung notwendige Strukturelemente zu erkennen. Zeitvorteile bei der Anzeichnung sind möglich, jedoch nicht quantifiziert. Es ergeben sich ergonomische Vorteile durch kürzere Begehungen in schwierigem Gelände, weil die Linie im Idealfall nicht mehr verschoben werden muss. Falls der Maschinenstandort nicht eindeutig bestimmbar ist, kann vom Ankerbaum aus trassiert werden, um zu verhindern, dass die Linie seitlich verschoben werden muss. Die Grenzen der vorgestellten Methode sind einerseits, dass lediglich eine Perspektive von oben möglich ist und somit alle unter dem Kronendach befindlichen Elemente nicht sichtbar sind. Grenzen technischer Natur sind gesetzt, weil die Drohne nur bei klaren Sichtverhältnissen ohne Regen und bei nicht zu starkem Wind fliegen kann. Ideale Ergebnisse werden an bedeckten Tagen mit minimalem Schattenwurf erreicht. Gesetzlich sind Einschränkungen dadurch vorhanden, dass die Drohne nur auf Sicht benutzt werden darf.

Weil sowohl die Befliegung mit der Drohne als auch die Holzernte in Seillagen in der schneefreien Zeit erfolgen, bedarf der Einsatz der vorgestellten Methode einer guten Koordination zwischen den Förstern und den Unternehmern. Es muss gewährleistet sein, dass die Drohnendaten für die auszuführenden Hiebe zur vereinbarten Zeit zur Verfügung stehen.

Aus Sicht der Praxis ist in Zukunft die Verfügbarkeit von Drohnendaten für die Planung relevant. Es scheint aufgrund der hohen Anschaffungskosten der Drohne sowie wegen dem notwendigen IT-Wissen nicht realistisch, dass sich jeder Forstbetrieb und jede Forstunternehmung die Ausrüstung beschafft. Folglich sind Schulungen bezüglich der Bedienungsabläufe weniger bedeutend. Interessanter für Forstbetriebe und Unternehmer sind die Möglichkeiten, welche sich durch die Verwendung der Drohnendaten ergeben. Folglich sollen die Betriebe und Unternehmer über die Forschungsergebnisse und die sich dadurch verbessernden Abläufe der waldbaulich-forsttechnischen Planung informiert werden. Dazu sind nach Projektabschluss Veröffentlichungen in Fachzeitschriften geplant. Weiter müssen geeignete Partner gesucht werden, welche die Befliegungen verlässlich und

zeitnah durchführen können. In Frage kommen Ingenieurbüros, welche bereits Erfahrungen mit Drohnen und der Verarbeitung von Drohnen Daten gesammelt haben und somit lediglich noch die forstspezifisch wichtigen Punkte erlernen müssen.

Um die Analysen effizienter zu gestalten sind Prozessoptimierungen denkbar. Der Planungsprozess könnte durch die Implementierung eines Projektierungsprogramms ins GIS verbessert werden / respektive bereits vorhandene, GIS-kompatible Ansätze (bspw. seilaplan) weiterentwickelt werden.

Durch die Verwendung einer LiDAR-Drohne wäre es möglich, die DOM- und DGM-Daten aus der gleichen Befliegung zu generieren und damit für beide Modelle mit der gleichen Abweichung zu rechnen. Die Modellierungen und Genauigkeit der Daten sollte dadurch zunehmen. Ebenfalls interessant wäre der Einsatz eines kleinen Laserscanners (z.B. Velodyne).

Wenn es gelingen würde den BHD der Stützen- und Ankerbäume mit vordefinierten Funktionen abzuleiten, welche die Baumart und die Standortseigenschaften berücksichtigen, würde sich ein erheblicher Zeitgewinn ergeben. Die vorhandenen Grundlagen hierzu sind derzeit jedoch veraltet oder nicht vorhanden.

Weiter wäre um die Genauigkeit der BHD-Ableitung mit FINT zu erhöhen neben der baumartenspezifischen Funktion auch die Einbindung weiterer Parameter zur Ableitung wie bspw. die Kronenfläche denkbar.

Als ferne Vision ist eine komplette Automatisierung des Prozesses anzustreben. Das Projektierungsprogramm ist in GIS implementiert und berechnet anhand von eingangs bestimmten zu berücksichtigenden Punkten (bspw. Minimierung von Bodenkontakt, Erntekosten, Anzahl Stützen / Trassen sowie maximale Erschliessung des Gebietes) die bestmögliche Kombination aus allen möglichen Trassen. Dazu müssen lediglich der Perimeter und die gegebene Erschliessung bekannt sein. Falls gewünscht können weitere Punkte wie Anfangspunkt / Ankerbäume etc. definiert werden. Um diese Vision zu erreichen, bedarf es der Weiterentwicklung und Automatisierung verschiedener vorhandener Ansätze. Anschliessend müssen diese zusammengefügt werden.

Aus Sicht der Forschung sollte eindeutig geklärt werden, ob die Sichtbarkeit des Maschinenstandorts von der gewählten Flughöhe oder von den Licht-Schatten-Verhältnissen abhängt.

Wenn noch weitere Genauigkeitsanalysen erfolgen sollen, ist die Automatisierung der Zuweisung von Detektionen auf Referenzbäume anzustreben. Die händische Zuweisung ist sehr zeitintensiv und kann nicht reproduziert werden. Eine Möglichkeit wäre es, einen Befehl in R zu entwickeln, welcher dies unter Berücksichtigung des Abstandes zum Referenzbaum und Höhenunterschied errechnet.

Weiter wäre interessant, die Genauigkeit der entwickelten Methode auch in Laubholzbeständen zu testen. Damit könnten möglicherweise die überraschenden Resultate bezüglich der Genauigkeit und Hangneigung erklärt werden.

7 Literaturverzeichnis

- Aggeler R, 2009. Seilkrantechnik (3. überarb. Auflage), Bildungszentrum Wald, Codoc, 62 S.
- Ammann P, 2004. Untersuchung der natürlichen Entwicklungsdynamik in Jungwaldbeständen – Biologische Rationalisierung der waldbaulichen Produktion bei Fichte, Esche, Bergahorn und Buche. Dissertation ETH Zürich, 342 S.
- Aschoff T, Spiecker H, 2004. Algorithms for the automatic detection of trees in laser scanner data. Institute for Forest Growth, University Freiburg. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI (8/W2), 71-75.
- Aschoff T, Thies M, Winterhalder D, Kretschmer U, Spiecker H, 2004. Automatische Ableitung von forstlichen Inventurparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. 24. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF, abgerufen am 25.06.2017, http://www.natscan.uni-freiburg.de/suite/pdf/040921_1959_1.pdf
- Baltsavias E. P, 1999a. Airborne laser scanning: basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2), 199-214.
- Baltsavias E. P, 1999b. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54 (2), 164-198.
- Barrile V, Bilotta G, Lamari D, Meduri G. M, 2015. Comparison between Techniques for Generating 3D Models of Cultural Heritage. Recent Advances in Mechanics, Mechatronics and Civil, Chemical and Industrial Engineering. Mathematics and Computers in Science and Engineering Series, 49, 140-145.
- 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, 2013. Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten. Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden, abgerufen am 29.06.2017, http://www.qucosa.de/fileadmin/data/qucosa/documents/11768/Dissertation_Bienert_2013.pdf
- 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.
- Bont L, Heinimann H.R, 2012. Optimum geometric layout of single cable road. European Journal of Forest Research, 131 (5), 1439-1448.
- Bont L, 2013. Entwurf eines optimalen Seillinienlayouts für die Holzernte in steilem Gelände. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen (SZFW), 164 (11), 321-327.
- Brandtberg T, Warner T. A, Landenberger R. E, McGraw J.B, 2003. Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. Remote Sens. Environ., 85, 290-303.
- Breschan J, 2013. Vor lauter Pixeln den Wald sehen. Bündner Wald, 66 / 1, 5-8.
- Bücken A, 2017. Datenauswertung Befliegung Rona. Emails vom 29.09.17 und 20.10.17.
- Chen Q, Baldocchi D, Gong P, Kelly M, 2006. Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72, 923-932.

Chung W, 2002. Optimization of cable logging layout using a heuristic algorithm for network programming. Corvallis: Oregon State University, PhD thesis, 222S.

Colomina I, Molina P, 2014. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

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.

Dorren L, 2014. FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ, 03.09.2014, abgerufen am 11.04.2017, http://www.ecorisq.org/docs/FINT_manual_EN.pdf

Eisenbeiss H, 2009. UAV Photogrammetry. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), PhD thesis, 236 S.

Emde M, Sondermann B, Rossmann J, 2014. A Self-Contained Localization Unit for Terrestrial Applications and Its Use in Space Environments. 24.04.2014, abgerufen am 11.09.2017, http://robotics.estec.esa.int/i-SAIRAS/isairas2014/Data/Poster/SAIRAS_FinalPaper_0017.pdf

Epstein R, Weintraub A, Sapunar P, Nieto E, Sessions J.B, Sessions J, Bustamente F, Musante H, 2006. A combinatorial heuristic approach for solving real-size machinery location and road design problems in forestry planning. Operations Research 54, 1017-1027.

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.

Fischer F, 2011. Extrahierung der 3D-Struktur von Einzelbäumen aus LiDAR-Daten. Remote Sensing Laboratories RSL. Geografisches Institut der Universität Zürich, Masterarbeit, 94 S.

Flood M, 1999. Commercial Development of airborne Laser Altimetry. A Review of the commercial instrument market and its projected growth. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (32 / 3, W 14), 8 S.

Fomea GmbH, 2017. seilkranPROjekt - Anleitung. 2017, abgerufen am 05.06.2017, <http://www.ewi.cc/seilkranprojekt.html>

Frehner M, Wasser B, Schwitter R, 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald (NaiS). Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern, 564 S.

Glanzmann L, 2012. Planung im Schutzwald - Vergleich ausgewählter Informationsgrundlagen am Beispiel des Kantons Appenzell Ausserrhoden, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ), Masterarbeit, 103 S.

Gonzalez J. F, 2011. Die automatische Identifizierung und Erfassung von tropischen Bäumen an Probeflächen in Kolumbien und Ecuador anhand von digitalen Bildinformationen und Oberflächenmodellen. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Heinrich-Heine-Universität, abgerufen am 02.04.2017, <https://docserv.uni-duesseldorf.de/servlets/DerivateServlet/Derivate-20758/JavierGonzalez-Dissertation.pdf>

Haarbrink R, 2011. AUS for geo-information: current status and perspectives. The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 38, 207-212.

Heinimann H.-R, 2003. Holzerntetechnik zur Sicherstellung einer minimalen Schutzwaldpflege. Zürich: ETH Zürich, forstliches Ingenieurwesen, 44 S.

Heinzel J, Weinacker H, Koch B, 2011. Prior knowledge based single tree extraction. *International Journal of Remote Sensing*, 32, 4999–5020.

Heritier S, Cantoni E, Copt S, Victoria-Feser M, 2009. *Linear Regression - Robust Methods in Biostatistics*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 265 S.

Herzog, D, 2016. Vergleich von Sonneneinstrahlungsmodellierungen mit GIS und Fischaugenfotos. Semesterarbeit an der Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften, Forstwirtschaft (HAFL), Zollikofen, 15 S.

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.

Hopkinson C, Chasmer L, Young-Pow C, Treitz P, 2004. Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34, 573-583.

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.

Jakubowski M. K, Li W, Guo Q, Kelly M, 2013. Delineating Individual Trees from Lidar Data: A Comparison of Vector- and Raster-based Segmentation Approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 5 (9), 4163-4186.

Kaartinen H, Hyypä J, 2008. Tree Extraction - Final Report. EuroSDR/ISPRS Project

Kaartinen, H., Hyypä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyypä, H., Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C., Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Næsset, E., Pitkänen, J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B.M., Wu, J.C., 2012. An international comparison of individual tree detection and extraction using airborne laser scanning. *Remote Sensing*, 4, 950-974.

Kersten T. P, 2016. Auf Knopfdruck – Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. HafenCity Universität Hamburg, abgerufen am 07.07.2017, https://www.researchgate.net/publication/295240519_Auf_Knopfdruck_-_Auswertung_und_Resultate_UAV-gestuetzter_Bildflugdaten

Kersten T. P, Lindstaedt M, Mechelke K, Zobel K, 2012. Automatische 3D-Objektkonstruktion aus unstrukturierten digitalen Bilddaten für Anwendungen in Architektur, Denkmalpflege, Archäologie. *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation*, Band 21, 137-148.

Kersten T, Lindstaedt M, 2012. Automatic 3D Object Reconstruction from Multiple Images for Architectural, Cultural Heritage and Archaeological Applications Using Open-Source Software and Web Services. *Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation*, 6, 727-740.

Kersten T, Mechelke K, 2013. Fort Al Zubarah in Katar – 3D Modell aus Scanner- und Bilddaten im Vergleich. *AVN – Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 2, 50-58.

Kersten T, Lindstaedt M, 2016. Photogrammetrie auf Knopfdruck - Auswertung und Resultate UAV-gestützter Bildflugdaten. DVW e.V. (Hrsg.). UAV 2016 – Vermessung mit unbemannten Flugsystemen, Wissner-Verlag, Augsburg, 82, 135-158.

Koch B, Heyder U, Weinacker H, 2006. Detection of individual tree crowns in airborne lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72, 357–363.

Konecny G, Lehmann G, 1984. Photogrammetrie (4. überarb. Auflage), de Gruyter, Berlin, 392 S.

Korpela I, Dahlin B, Schäfer H, Bruun E, Haapaniemi F, Honkasalo J, Ilvesniemi S, Kuutti V, Linkosalmi M, Mustonen J, 2007. Single-tree forest inventory using lidar and aerial images for 3D treetop positioning, species recognition, height and crown width estimation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36, 227-233.

Kraft G, 1984. Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben. Hannover, 154 S.

Kraus K, 2004. Photogrammetrie, Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen (7. Auflage), de Gruyter, Berlin, 540 S.

Leckie D, Gougeon F, Hill D, Quinn R, Armstrong L, Shreenan R, 2003. Combined high-density lidar and multispectral imagery for individual tree crown analysis. *Canadian Forest Service Publications*, 29 (5), 633-649.

Liang X, Litkey P, Hyypä J, Kaartinen H, 2011. Automatic plot-wise location mapping using single-scan terrestrial laser scanning. *The Photogrammetric Journal of Finland*, 22 (2), 37-48.

Limbeck-Lilienau B, 2002. Hochmechanisierte Holzernte mit schräger Seiltrasse. Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien, 56 S.

Linder W, 2009. Beispiele für den Einsatz digitaler Photogrammetrie unter erschwerten Bedingungen. In: Chesi / Weinhold (Hrsg.) 12. Internationale Geodätische Woche. Obergurgl, 90-98.

Maas H-G, Bienert A, Scheller S, Keane E, 2008. Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29 (5), 1579-1593.

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.

Meier B, 2014. Stellvertretender Stützpunktleiter Forstliches Bildungszentrum Laubau. Mündliche Mitteilung vom 07.07.2014.

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.

Moll P, 2015. Seilaplan - Seilkran Layout Planer - Plug-In für QGIS. Professorship of Land Use Engineering, ETH Zürich. Abgerufen am 06.06.2017, <https://doi.org/10.5905/ethz-1007-30>

NEWFor, 2014. The Interreg Alpine Space project NEWFOR: results and recommendations. Abgerufen am 06.07.2017, www.newfor.net/wp-content/uploads/2015/02/Newfor_Results_Recommendations.pdf

Nex F, Remondino F, 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6 (1), 1-15.

Neitzel F, Klonowski J, Siebert S, Dasbach J. P, 2011. Mobile 3D Mapping mit einem low-cost UAV-System am Beispiel der Deponievermessung. Abgerufen am 11.07.2017, https://i3mainz.hs-mainz.de/sites/default/files/public/data/klonowski_neitzel_uav_AVN_10.2011.pdf

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.

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.

Picard N, Saint-André L, 2012. Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction. Food and Agricultural Organization of the United Nations and Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement, 207 S.

Popescu S. C, Wynne R. H, Nelson R. F, 2002. Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with canopy-height based variable window size. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 71-95.

Porwal M. K, Udeechya N, 2013. LiDAR Technology and Applications. *International Journal of Research in Computer Engineering & Electronics*, 2 (3), 1-5.

Przybilla H-J, Reuber C, Bäumker M, Gerke M, 2015. Untersuchungen zur Genauigkeitssteigerung von UAV-Bildflügen. Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation, DGPF Tagungsband 24 / 2015, 10 S.

Püschel P, 2013. The influence of scanner parameters on the extraction of tree metrics from FARO Photon 120 terrestrial laser scans. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 78, 58- 68.

Püschel P, Newnham G, Rock G, Udelhoven T, Werner W, Hill J, 2013. The influence of scan mode and circle fitting on tree stem detection, stem diameter and volume extraction from terrestrial laser scans. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77, 44-56.

Pyysalo U, Hyypä H, 2002. Reconstructing tree crowns from laser scanner data for feature extraction. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34, 218-221.

Remondino F, Barazzetti L, Nex F, Scaioni M, Sarazzi D, 2011. UAV photogrammetry for mapping and 3D modelling - current status and future perspectives. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 38, 25-31.

Richards F-J, 1959. A flexible growth function for empirical use. *Journal of experimental Botany*, 10 (2), 290-301.

Rössler J, 2000. Höhenmessverfahren auf Dauerversuchsflächen. Methods of tree height assessment on permanent observation plots. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, Österreich, <http://bfw.ac.at/100/1232.html>

RWTH Aachen, 2017. Automatisierte Baumerfassung (Zollikofen) – Ergebnisse. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen), Auswertung vom 31.03.2017, 3S., unveröffentlicht.

Schöning J, Heidemann G, 2015. Evaluation of Multi-view 3D Reconstruction Software. In: Azzopardi G, Petkov N (Hrsg.). *Computer Analysis of images and Patterns*. Springer, Cham, 450-461.

Schreck M, 2014. Bestimmung der Bestandesdichte in Fichtenforsten aus diskreten flugzeuggestützten und terrestrischen Laserscanning-Daten. Universität Trier, Fachbereich VI Umweltfernerkundung und Geoinformatik, Masterarbeit, 156 S.

Schütz J-P, 2003. Die Prinzipien der Waldnutzung und der Waldbehandlung. Skript zur Vorlesung Waldbau, ETH Zürich, 218 S.

Schwidefsky K, Ackermann F, 1976. *Photogrammetrie*. Teubner Verlag, Stuttgart, 384 S.

Simonse M, Aschoff T, Spiecker H, Thies M, 2003. Automatic determination of forest inventory parameters using terrestrial laser scanning. Institute of Forest Growth Freiburg, abgerufen am 29.06.2017, http://www.natscan.uni-freiburg.de/suite/pdf/030916_1642_1.pdf

Softree, 2017. Softree – Engineering an Easier Way – Product Overview. Ohne Datum, abgerufen am 08.06.2017, <https://www.softree.com/products/overview>

Soille P, 2003. Morphological image analysis: Principles and applications. Springer, Berlin, 392 S.

Solberg S, Naesset E, Bollandsas O. M, 2006. Single tree segmentation using airborne laser scanner data in structurally heterogeneous spruce forest. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 72, 1369-1378.

Sondermann B, Rossmann J, 2016. Semantic Environment Perception and Modeling for Automated SLAM. In: International Journal of Simulation Systems, Science & Technology (IJSSST) 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.

Sperlich M, Kattenborn T, Koch B, Kattenborn G, 2014. Potential of Unmanned Aerial Vehicle Based Photogrammetric Point Clouds for Automatic Single Tree Detection. Gemeinsame Tagung der DGfK, GfGI und des GiN, DGPF Tagungsband 23, 2014, 7 S.

Stampfer K, 2002. Optimierung von Holzerntesystemen im Gebirge. Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien, Habilitationsschrift, 96 S.

Daxner P, 1998. Ein Produktivitätsmodell für ein selbstfahrendes Seilgerät Typ „Woodliner“. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 4, 249-260.

Stampfer K, Limbeck-Lilieu B, Kanzian C, Viertler K, 2003. Baumverfahren im Seilgelände – Verfahrensbeispiele. Univ Bodenkultur, Institut alpine Naturgefahren forstliches Ingenieurwesen (BOKU), Wien, 27 S.

Stampfer K, Visser R, Kanzian C, 2006. Cable corridor installation times for European yarders. International Journal of Forest Engineering, 17, 71-77.

Straub B. M, 2003. Automatische Extraktion von Bäumen aus Fernerkundungsdaten. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen, Universität Hannover, Nr. 249.

Straub C, Dees M, Weinacker H, Koch B, 2009. Using Airborne Laser Scanner Data and CIR Orthophotos to Estimate the Stem Volume of Forest Stands. Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 3, 277 – 287.

Swisstopo, 2015. swissALTI^{3D}- Ausgabebericht 2015. Bundesamt für Landestopografie swisstopo, Wabern, 5 S.

Thiel C, Schmulius C, 2016. Derivation of Forest Parameters from Stereographic UAV Data - A Comparison with Airborne LiDAR Data. Department for Earth Observation Friedrich-Schiller University Jena, abgerufen am 02.08.2017, <http://lps16.esa.int/posterfiles/paper0158/158thiel.pdf>

Thies M, Spiecker H, 2004. Evaluation and future prospects of terrestrial laser scanning for standardized forest inventories. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVI – 8 (W2), 192 - 197.

USDA (United States Department of Agriculture), 2017a. Programs and Software – Skyline analysis. 24.02.2017, abgerufen am 06.06.2017, https://www.fs.usda.gov/detail/r6/landmanagement/resourcemanagement/?cid=fsbdev2_027048

USDA (United States Department of Agriculture), 2017b. Program Areas – Logger PC Software Update Project. 2017, abgerufen am 06.06.2017, https://www.fs.fed.us/t-d/programs/forest_mgmt/saleprep/loggerpc.shtml

Vauhkonen J, Ene L, Gupta S, Heinzel J, Holmgren J, Pitkänen J, Solberg S, Wang Y, Weinacker H, Marius Hauglin K, Lien V, Packalén P, Gobakken T, Koch B, Naesset E, Tokola T, Maltamo M, 2011. Comparative testing of single-tree detection algorithms under different types of forest. *Forestry An International Journal of Forest Research*, 85, 27-40.

Wallace L, Lucieer A, Watson C. S, 2014. Evaluating Tree Detection and Segmentation Routines on Very High Resolution UAV LiDAR Data. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52, 7619 - 7628.

Watt P-J, Donoghue D-N-M, Dunford R-W, 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 26 (7), 1437 - 1446.

Weber R, Frutig F, Gloor M, 2004. Mechanisierte Holzernte in Steil- und Gebirgslagen. *Wald und Holz*, 2 / 04, 33 - 37.

Weiner J, Thomas S-C, 1992. Competition and Allometry in Three Species of Annual Plants. *Ecology*, 73 (2), 648 - 656.

Wever C, Lindenberger J, 1999. Experience of 10 years laser scanning. *Photogrammetrische Woche*, 99, 125-132.

Wezyk P, Koziol K, Glista M, Pierzchalski M, 2007. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory first results from the polish forests. *ISPRS Workshop on Laser Scanning*, 424 - 429

Yu X, Hyypä J, Kaartinen H, Maltamo M, 2004. Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, 90 (4), 451-462.

Zeide B, 1993. Analysis of growth equations. *Forest science*, 39 (3), 594-616.

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

Zürcher S, Glanzmann L, Rosset C, 2015. Betriebsplanung im Gebirgswald – Neue Ansätze des Betriebes Klosters GR, Projekt IBW – HAFL, laufendes Projekt.

Dank

Zum Gelingen des Projektes haben verschiedene Partner einen wichtigen Beitrag geleistet. Den Forstbetrieben Sigriswil (Hans Stauffer, Björn Weber) und der Abteilung Wald des lawa (Erwin Meier, Bruno Duss) wird für die Bereitstellung der Flächen, die grosszügige Auskunft bei Fragen und die Begleitung des Projektes gedankt.

Ebenfalls gedankt wird der Firma TerraData AG (Stefan Kälin) für die Teilnahme an der ersten Projektsitzung und das Einbringen von projektrelevanter Praxiserfahrung.

Ein besonderer Dank geht an die RWTH Aachen (Dr. Arno Bücken, Dr. Michael Schluse, Björn Sondermann), welche die Arbeit durch terrestrische Erhebungen und umfangreiche Auswertungen der terrestrischen und drohnenbasierten Daten unterstützte. Durch diesen Beitrag war es möglich, das Projekt um zusätzliche Methoden und Aussagen zu erweitern.

Anhang

Anhang A: Flugplanung Williwald.....	87
Anhang B: Abgeleitete Regressionskurven und allometrische Gleichungen für die Marteloskop- und Versuchsflächen.....	88
Anhang C: Eignungsanalyse von Softwareprogrammierungssoftwares.....	91
Anhang D: Skizze Planungssperimeter Buhütte.....	92
Anhang E: nDOM Fint vor Hiebssmassnahme.....	95
Anhang F: Ergänzung zum Vorgehen der händischen Zuweisung von Detektionen auf die terrestrischen Referenzbäume.....	96
Anhang G: Besonders kritische Verjüngungsöffnung vor und nach Eingriff.....	97

Anhang A: Flugplanung Williwald

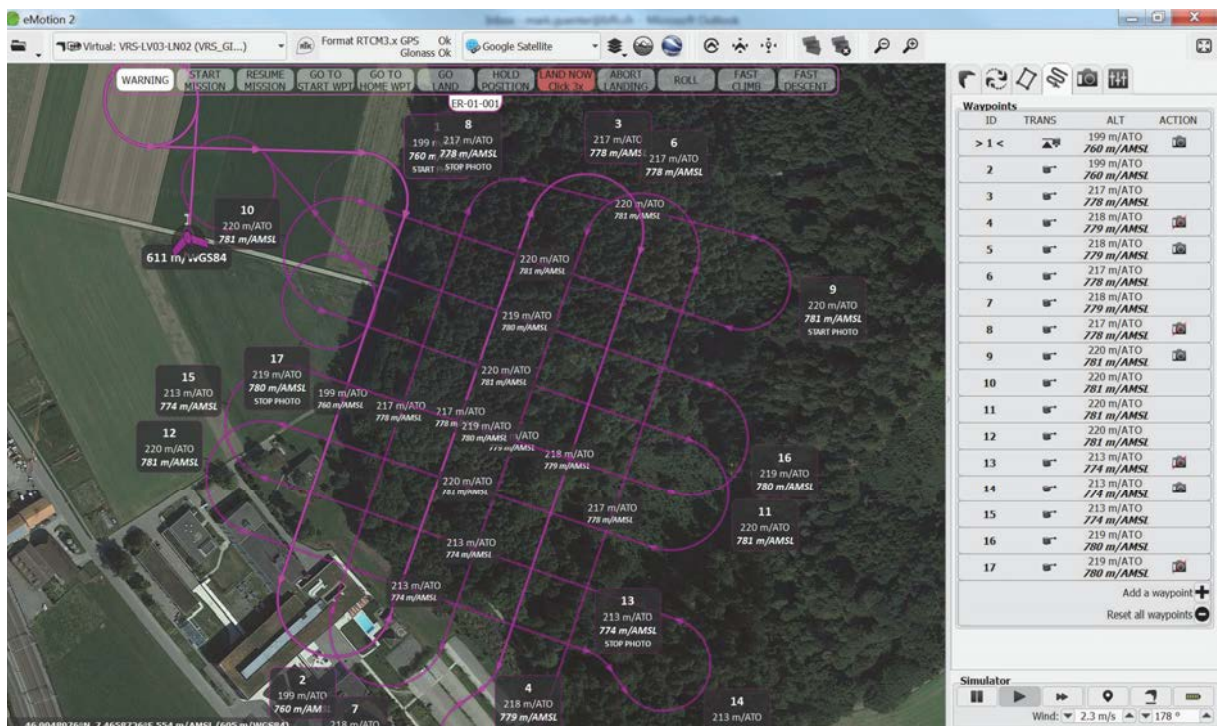
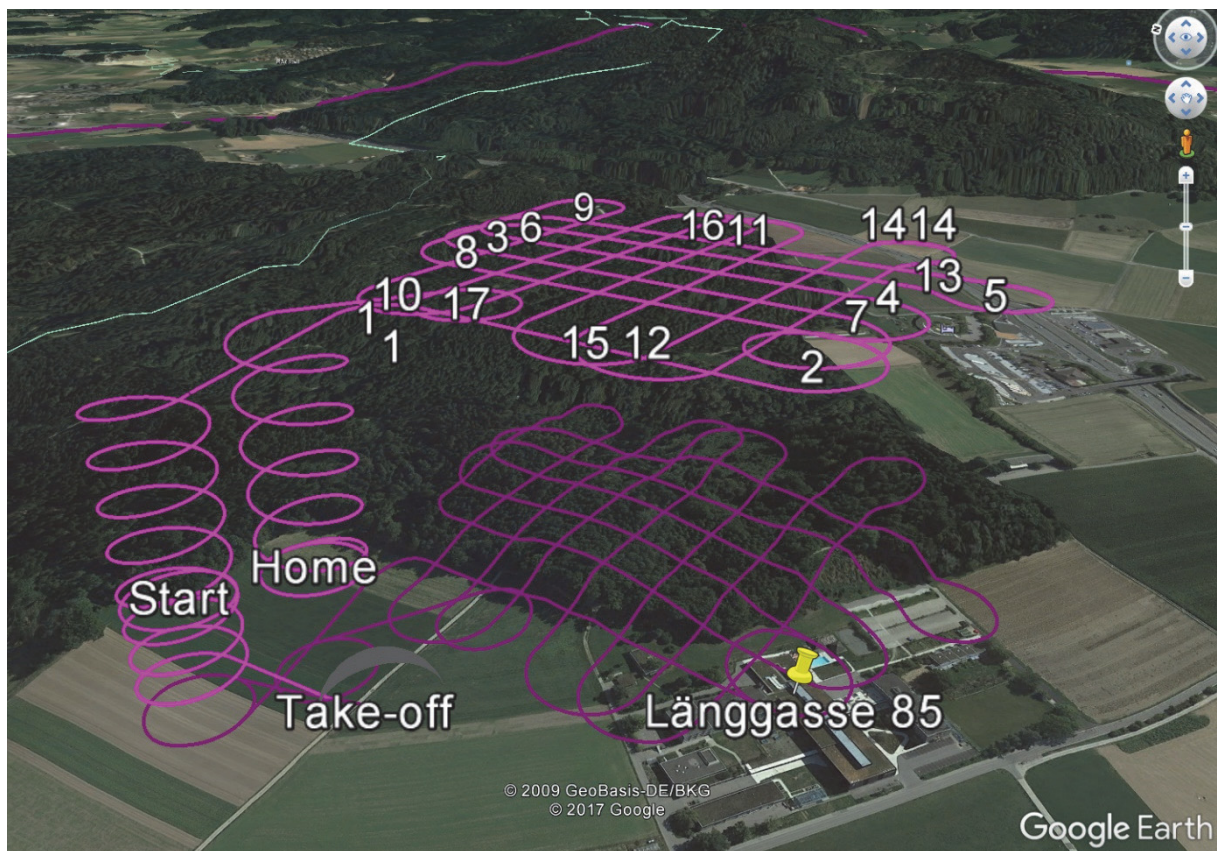


Abbildung 1: Flugplanung mit eMotion für die Fläche Williwald aus der Seitenansicht und Vogelperspektive

Anhang B: Abgeleitete Regressionskurven und allometrische Gleichungen für die Marteloskop- und Versuchsflächen

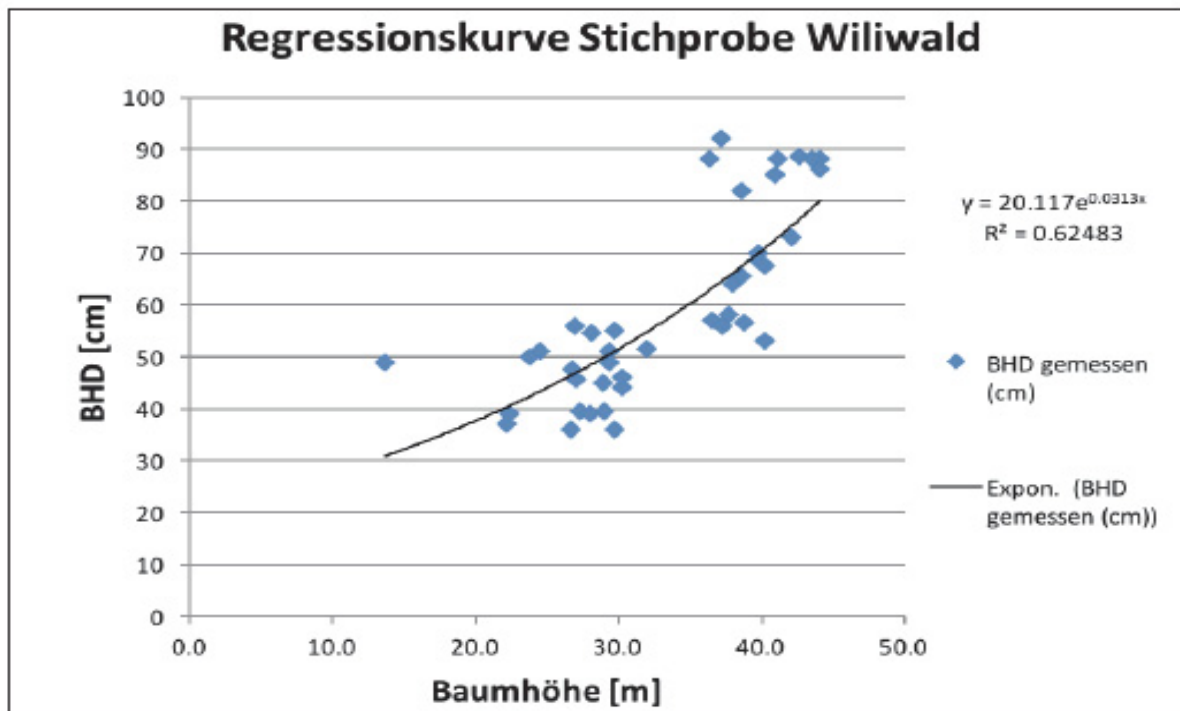


Abbildung 2: Anhand der Stichprobe abgeleitete Regressionskurve und allometrische Gleichung für die Marteloskopfläche Willwald (n=60)

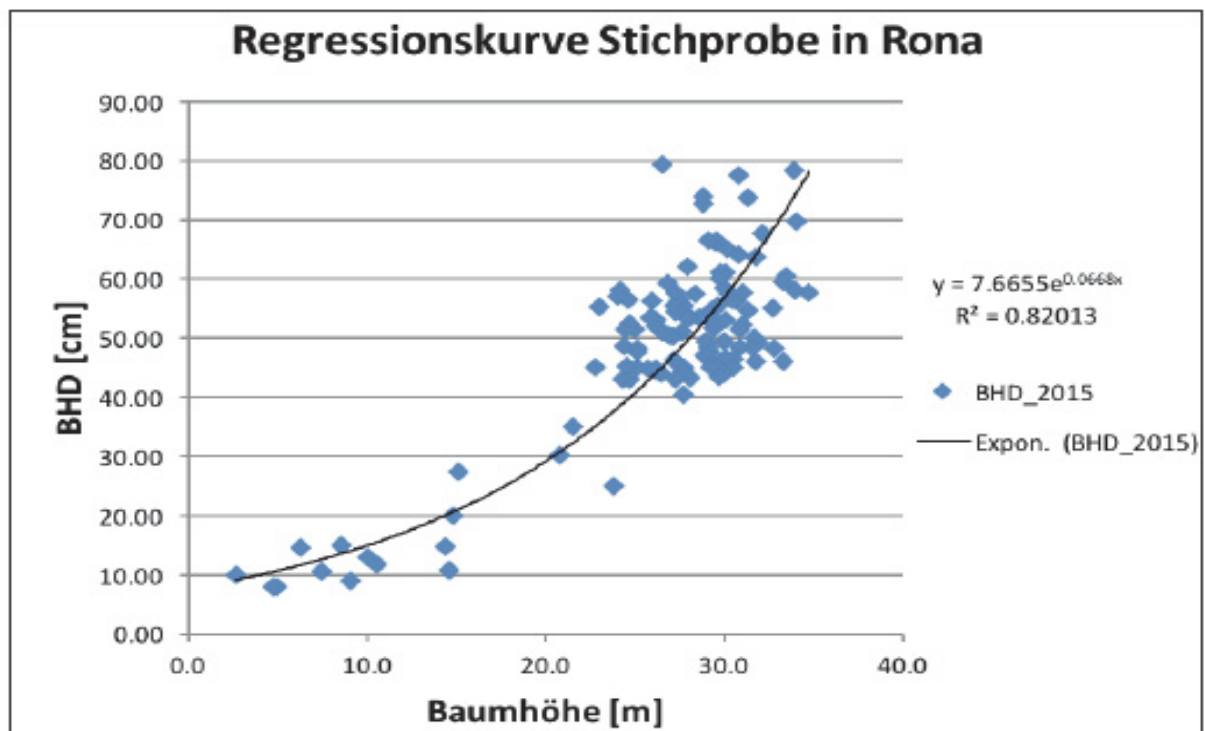



Abbildung 3: Anhand der Stichprobe abgeleitete Regressionskurve und allometrische Gleichung für die Marteloskopfläche Rona (n=80)

 FINT - Find Individual Trees

ecorisQ [About FINT](#)

Output directory: [Browse](#)

Input model(s):

☒ Digital Elevation and Surface Models ☐ Normalized Surface Model

NSM file: [Browse](#)

If the altitude is required for calculating the DBH, a Digital Elevation Model (DEM) needs to be provided below

DEM file: [Browse](#)

Minimum tree Height: m

Function for Diameter at Breast Height (cm):

☒ DBH = $H^{1.25}$

☐ Custom DBH = [?](#)

☒ Randomize calculated DBH values +/- %

[Run](#)

Starting processing...
Existing output files will be overridden
Saved treefile.txt
Saved Ind_trees.csv
Saved schema.ini
Done.

Abbildung 4: Verwendete Standardfunktion von Fint zur Ableitung der BHD aufgrund der Höhe für die Fläche Buhütte

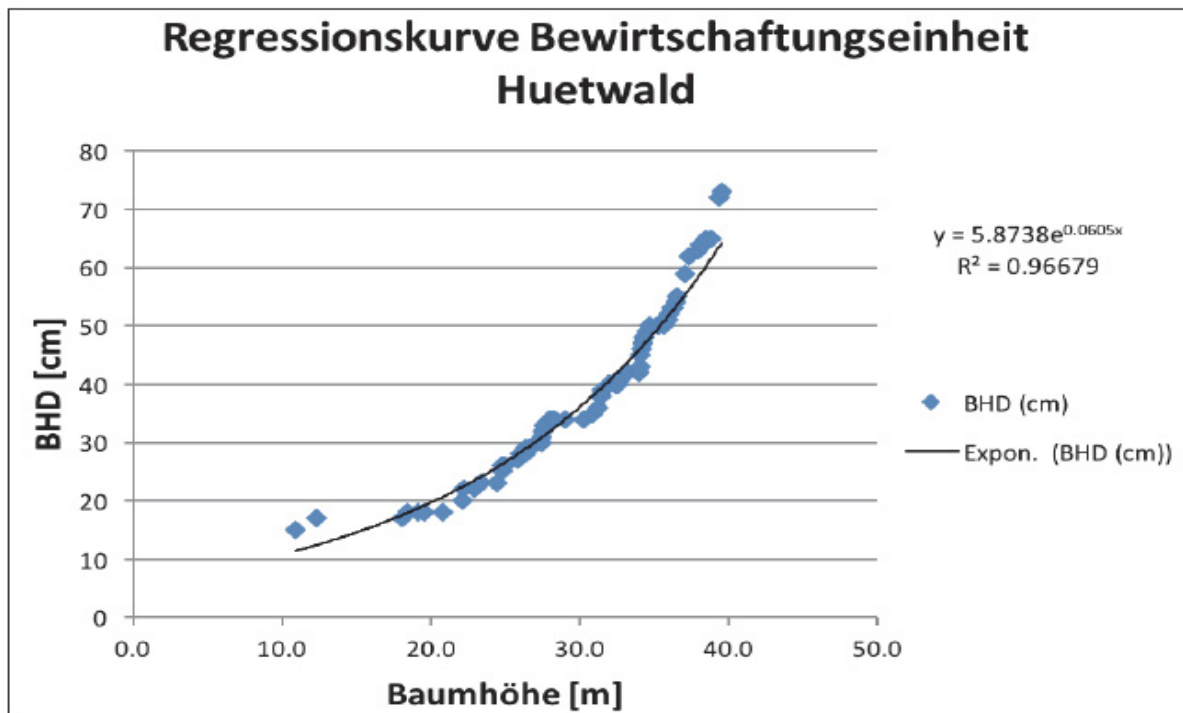


Abbildung 5: Anhand der Stichprobe abgeleitete Regressionskurve und allometrische Gleichung für die Testfläche Huetgraben (n=106)

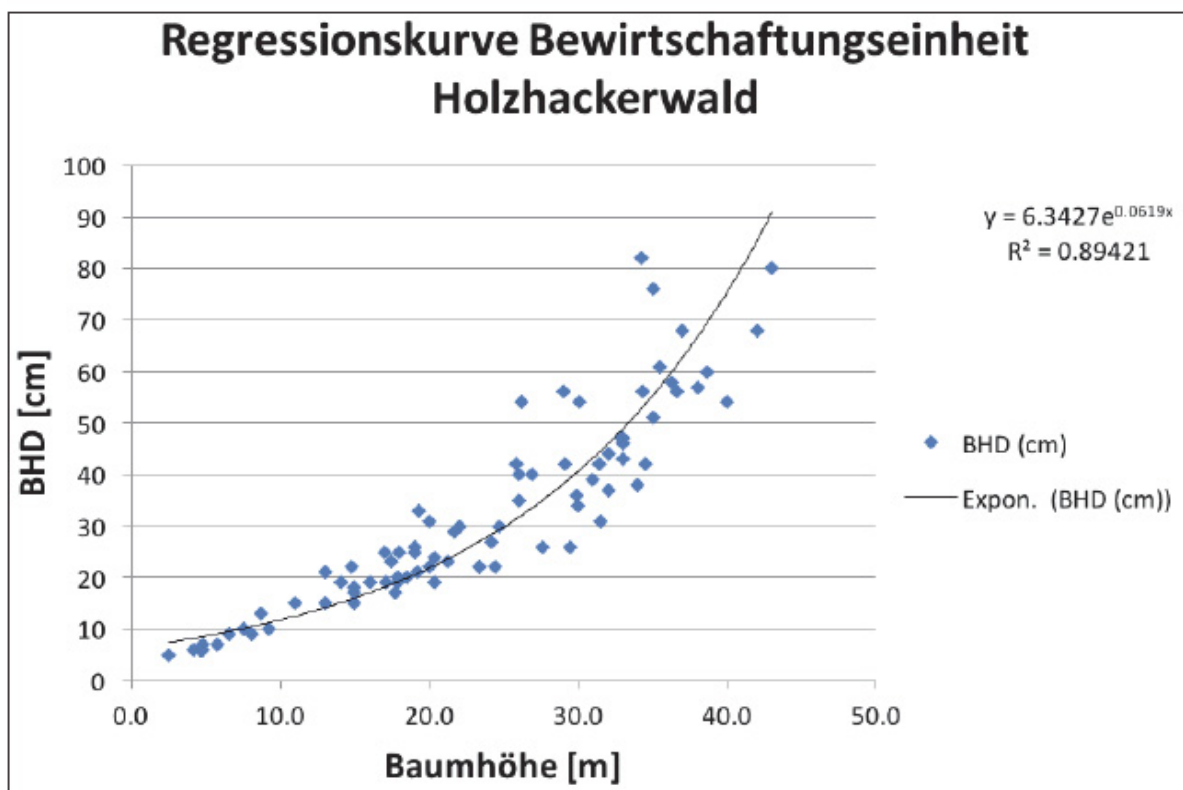


Abbildung 6: Anhand der Stichprobe abgeleitete Regressionskurve und allometrische Gleichung für die Testfläche Holzhackerwald (n=80)

Anhang C: Eignungsanalyse von Softwareprogrammierungssoftwares

Bei der Auswahl der Projektierungsprogramme wurden zuerst alle Programme / Lösungsansätze ausgeschlossen, welche keine grafische Darstellung der Seillinien erlaubten.

LoggerPC / SkylineXL wurde nicht verwendet, weil der vom Programm verwendete Sicherheitsfaktor nicht ersichtlich ist und damit nicht sichergestellt werden kann, dass die gesetzlich geforderten Rahmenbedingungen (Faktor 3) eingehalten werden können. Zudem ist das Programm lediglich in Englisch verfügbar und deswegen für potenzielle Anwender in Forstbetrieben möglicherweise weniger geeignet. Das Plug-In für ArcGIS wäre jedoch ein vielversprechender Ansatz.

Seilaplan wurde zuerst als geeignet beurteilt, weil es über eine Systemerweiterung direkt in QGIS verwendet werden kann und verständlich aufgebaut ist. Dadurch würde der Datenimport und –export entfallen. Bei der Anwendung auf der Fläche Buhütte hat sich jedoch gezeigt, dass die Stabilität der Anwendung nicht gegeben ist.

SeilkranPROjekt überzeugte durch eine gesetzliche Kurzdokumentation über den Betrieb von Seillinien mit den entsprechenden Rahmenbedingungen für die Länder Schweiz, Österreich und Italien. Die selbsterklärende Bedienung des Programms und die Möglichkeit die Seillinien iterativ zu bearbeiten und in Echtzeit die Anpassungen zu beobachten waren ausschlaggebend für die weitere Verwendung des Programmes. Zudem wird die technische Machbarkeit der Seillinie überprüft und verschiedene Anker- und Stützentypen unterschieden. Über eine Schnittstelle ist das Programm mit GIS kompatibel und läuft stabil.

Anhang D: Skizze Planungsperimeter Buhütte

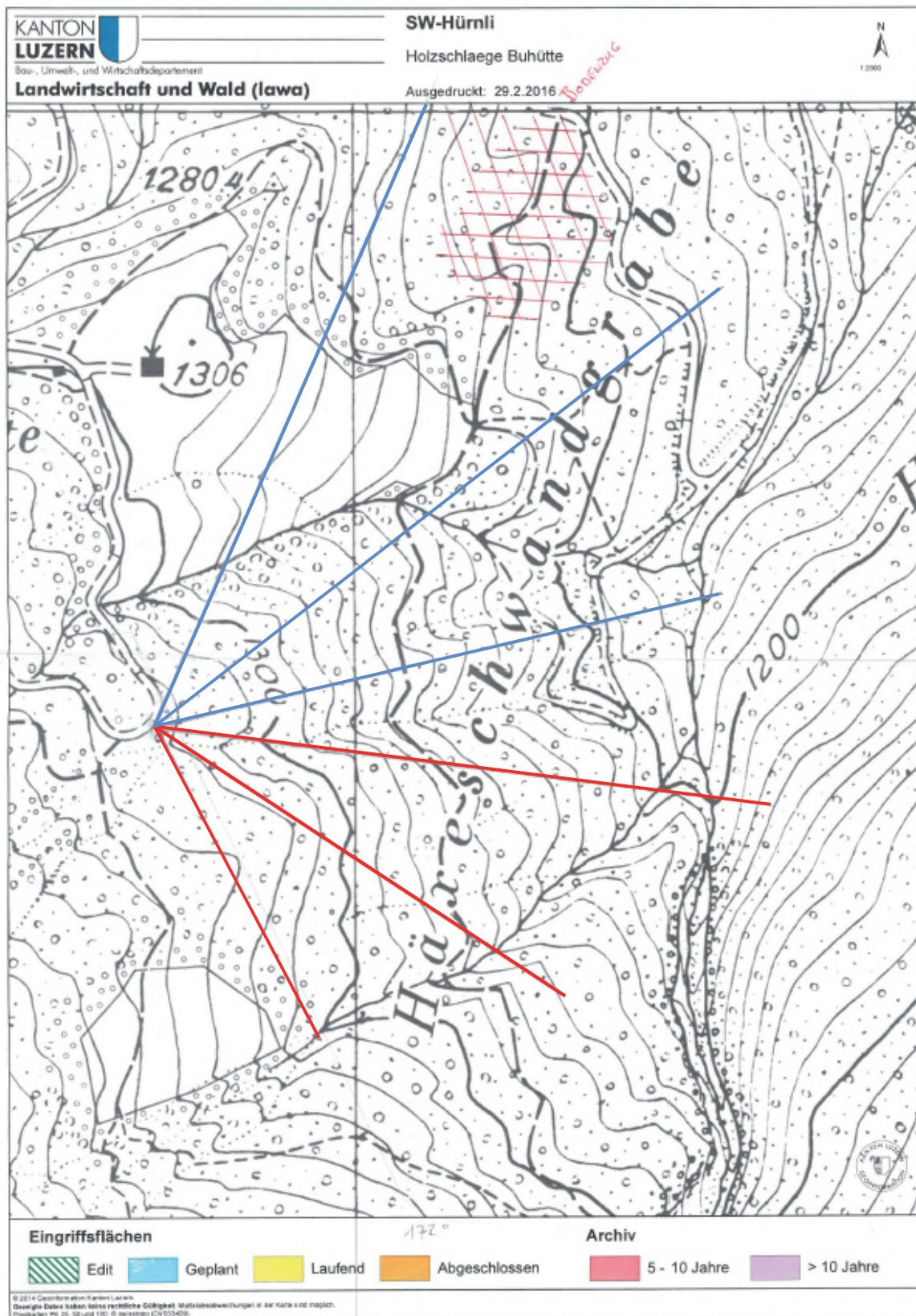


Abbildung 7: Geplanter Eingriff in der Bewirtschaftungseinheit Buhütte, Skizze des zuständigen Försters Erwin Meier, verändert (rot = mit Seilaplan auf Basis der Drohnendaten geplante Linien, blau = konventionell geplant)

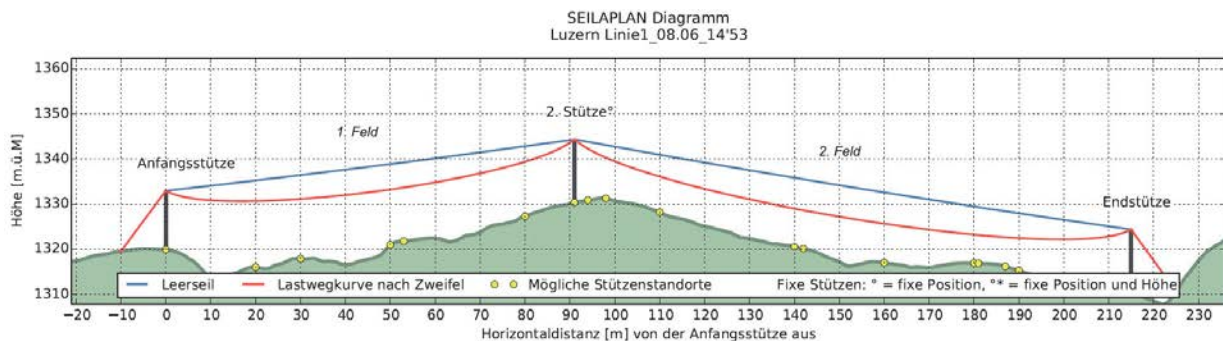


Abbildung 8: Mit Seilaplan erstellte Seiltrasse 1 mit unter Berücksichtigung des Orthophotos ausgewählten Stützen auf hinterlegtem DGM

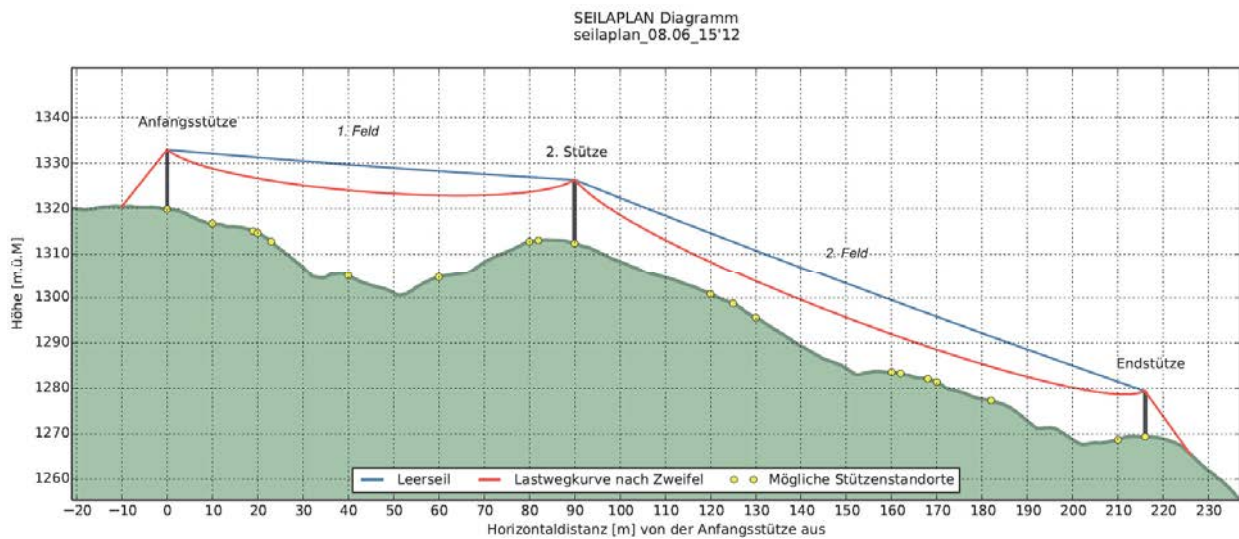


Abbildung 9: Mit Seilaplan erstellte Seiltrasse 2 mit unter Berücksichtigung des Orthophotos ausgewählten Stützen auf hinterlegtem DGM

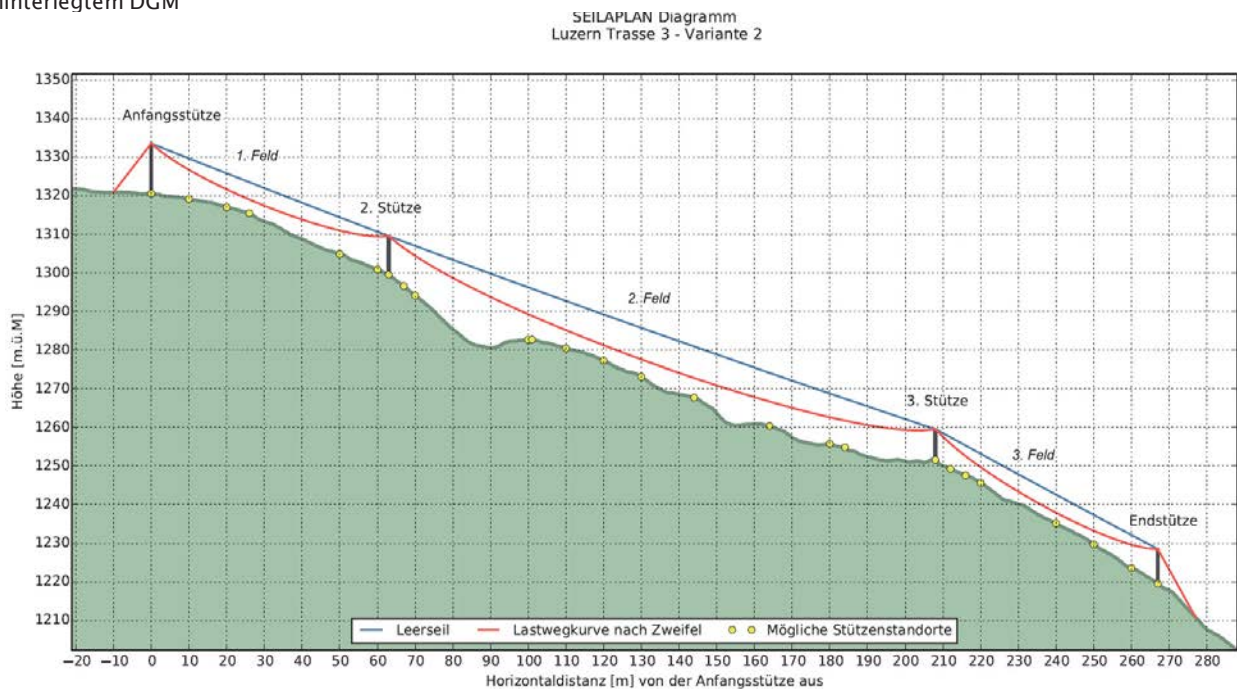


Abbildung 10: Mit Seilaplan erstellte Seiltrasse 3 mit unter Berücksichtigung des Orthophotos ausgewählten Stützen auf hinterlegtem DGM

Eigenschaften der Seillinie

Vordefiniertes Tragesystem: Mounty 3000, 18.5mm (F30 T8)

Tragesystem #1 Tragesystem #2 Verankerung Zwischenstützen

Mechanische Eigenschaften

Gewicht der Last inkl. Laufwagen	<input type="text" value="34"/>	kN
Gewicht Tragseil	<input type="text" value="0.0168"/>	kN/m
Querschnittsfläche Tragseil	<input type="text" value="268.67"/>	mm ²
Elastizitätsmodul Tragseil	<input type="text" value="100"/>	kN/mm ²
Maximal zulässige Seilzugkraft	<input type="text" value="148"/>	kN
Minimal zulässige Seilzugkraft	<input type="text" value="50"/>	kN
Gewicht des Zugseils links	<input type="text" value="0.0059"/>	kN/m
Gewicht des Zugseils rechts	<input type="text" value="0"/>	kN/m

Abbildung 11: Verwendete Eingangsdaten für Seilaplan (Angaben durch zuständigen Förster übermittelt)

Anhang E: nDOM Fint vor Hiebsmassnahme für die Fläche Buhütte

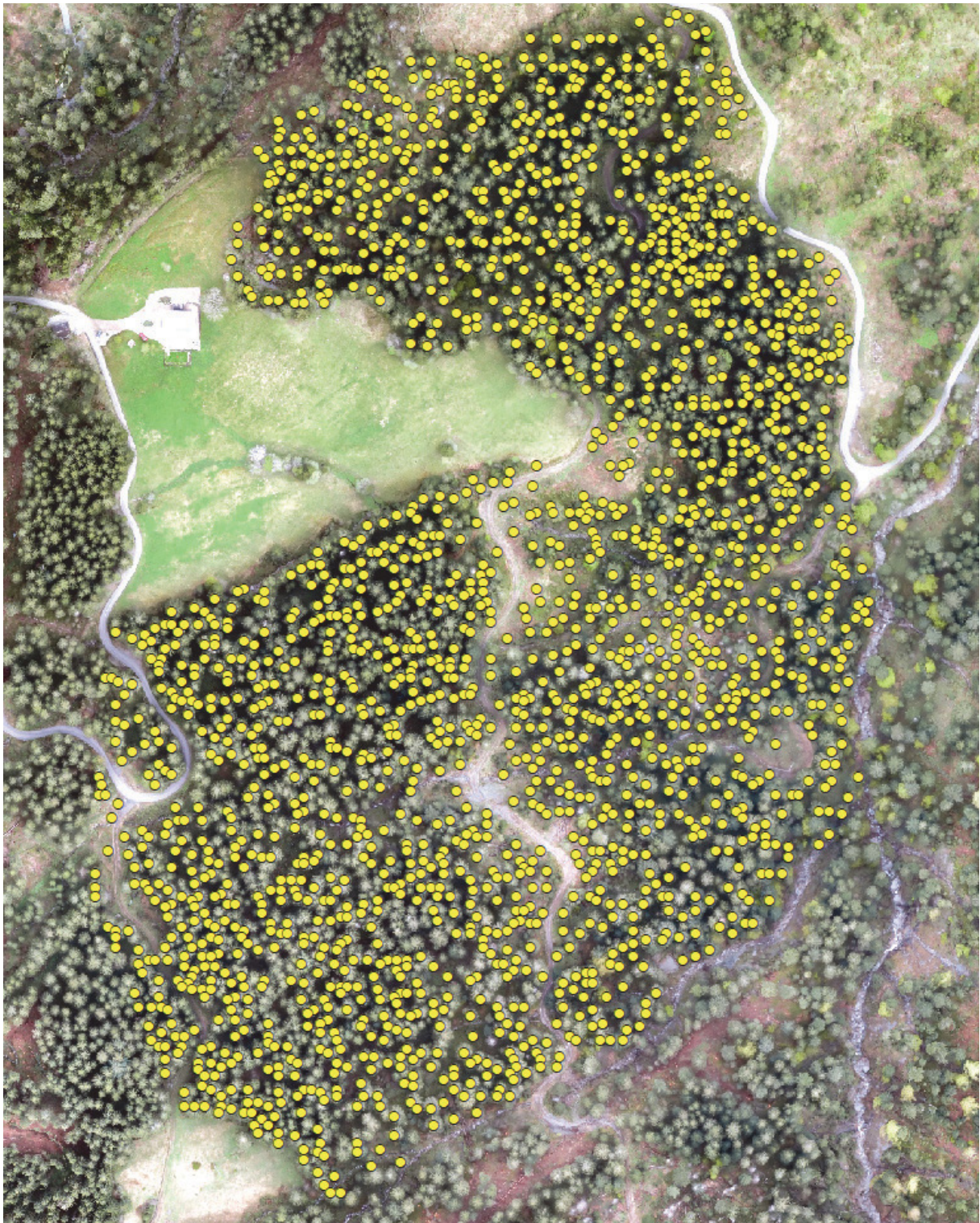
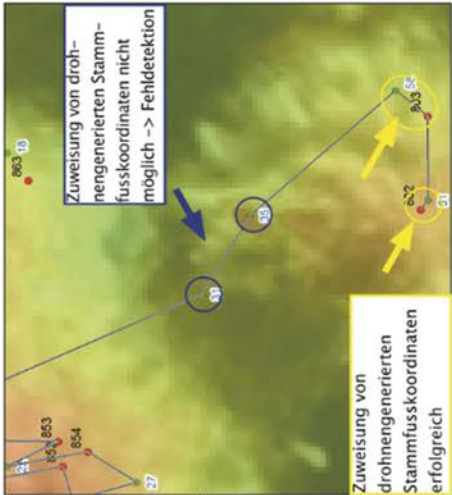
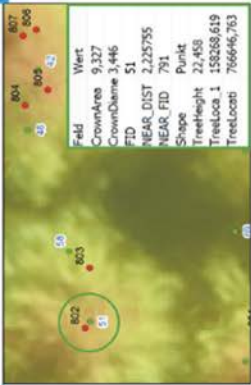


Abbildung 12: nDOM Buhütte mit Detektionen von Fint vor der Hiebsmassnahme (Anzahl Detektionen (gelbe Punkte) = 2055)

Anhang F: Ergänzung zum Vorgehen der händischen Zuweisung von Detektionen auf die terrestrischen Referenzbäume

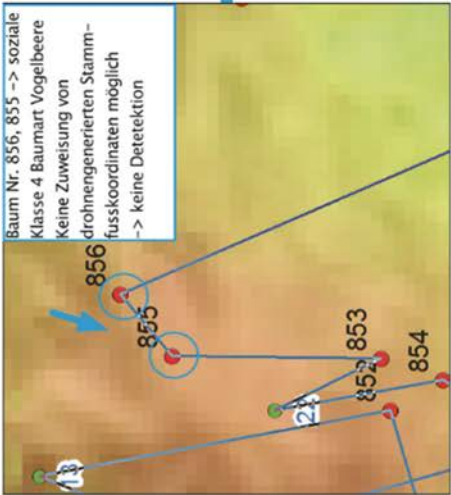
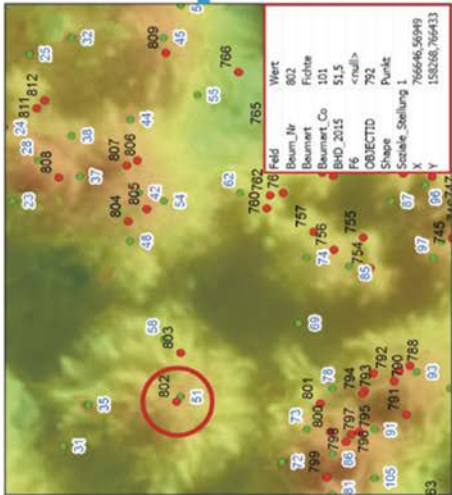


- 1. Überprüfung mögliche Kandidaten für Baum Nr. 802 (51, 35, 31, 58 mögliche Kandidaten)
- 2. Auswahl (hier Nr. 51 und Messung der Horizontalabstand zum Baum Nr. 802



- 3. Zuweisung und Abweichung (HD), Fehldetektion und Nichtdetektion werden in Exceltabelle hinterlegt

Program		Abweichung Stammsfusskoordinaten [m]				Fehldetektionen	
Baumnr.	Fint ID	A b w e i - chung [m]	B H D Fint	L i F o r e s t I D	A b w e i - chung [m]	B H D L i F o r e s t	L i F o r e s t I D
802	45	0.79	3.47	1.5	1.29	0.8162563	23
803	34	0.19	1.44	0.6338	0.53	0.3337908	23
856	-	-	-	-	-	-	31
855	-	-	-	-	-	-	35



Anhang G: Besonders kritische Verjüngungsöffnung vor und nach Eingriff



Abbildung 13: Besonders kritische, süd-westlich exponierter Teil der Eingriffsfläche vor und nach dem Eingriff am Beispiel Buhütte. Anhand des Beispiels zeigt sich klar, dass die Lückengröße nicht lediglich anhand eines Fotos beurteilt werden kann. Es braucht zur Beurteilung, ob die Lichtverhältnisse für die Verjüngung ausreichend sind weiterhin eine Feldbegehung.