

BACHELORARBEIT

im Studiengang Forstwirtschaft

Lehrgebiet: **Geoinformationswesen und Forstplanung**

Thema: **Einrichtung von forstlichen Marteloskopflächen mithilfe von mobilen Laserscanning Verfahren**

vorgelegt von **Justin Thomas Grundmann**

am **15.06.2026**

Erstprüfer/in **Prof. Dr. Paul Magdon**

Zweitprüfer/in **Janine Raatz**

Danksagung

Ein besonderer Dank gilt der FBG Nordthüringen sowie den beteiligten Privatwaldbesitzenden der Bürger-Wald-Invest GmbH & Co. KG für die Bereitstellung der Untersuchungsfläche und die materielle Unterstützung. Zudem richtet sich ein großer Dank an Prof. Dr. Paul Magdon für die fachliche und technische Betreuung sowie die kontinuierliche Unterstützung und Begleitung im Verlauf dieser Arbeit.

Darüber hinaus möchte ich Janine Raatz sowohl für die Übernahme der Zweitkorrektur als auch für die stets gute Kommunikation und hilfreiche Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit danken.

Mein weiterer Dank richtet sich an Johannes Stein, den dualen Studenten Simon Reißig, sowie den Praktikanten Steffen Sander des Forstservice Daniel Keune für ihre tatkräftige Unterstützung im Gelände.

Abschließend möchte ich ebenfalls noch Elisa Schmersträter und Johanna Stein für das Korrekturlesen und die mentale Unterstützung im Prozess der Arbeit danken.

Inhaltsverzeichnis

I.	Abkürzungsverzeichnis.....	III
II.	Abbildungsverzeichnis.....	IV
III.	Tabellenverzeichnis.....	IV
IV.	Formelverzeichnis	V
1	Einleitung	1
2	Material und Methoden.....	5
2.1	Untersuchungsgebiet	5
2.2	Anlage der Marteloskopfläche	6
2.3	Datenerhebung	9
2.3.1	Manuelle Vollaufnahme der Referenzdaten.....	9
2.3.2	Mobiles Laserscanning	10
2.4	Datenverarbeitung	13
2.4.1	Verarbeitung Referenzdaten	13
2.4.2	Verarbeitung der LiDAR-Daten	15
2.5	Auswertung der Daten	20
2.5.1	Datenorganisation und Matching	20
2.5.2	Berechnung der Detektionsrate	20
2.5.3	Berechnung der BHD-Abweichungen	21
2.5.4	Berechnung der Höhenabweichung	21
2.5.5	Berechnung der Positionsabweichungen.....	22
2.6	Statistische Kennwerte.....	23
3	Ergebnisse	24
3.1	Detektionsrate der Baumstämme	24
3.1.1	Gesamtdetektion	24
3.1.2	Auswertbare BHD-Detektionsrate.....	24
3.1.3	Detektionsrate nach Durchmesserklassen	24
3.2	Genauigkeit der BHD-Ableitungen	25
3.3	Genauigkeit der Höhen-Ableitung	27
3.4	Genauigkeit der Baumposition	28
3.4.1	Relative Positionsgenauigkeit anhand von Baumabständen.....	28
3.4.2	Baumindividueller Vergleich der absoluten Lageabweichung	29
3.5	Vergleich der Ergebnisse	31
4	Diskussion	32
5	Zusammenfassung	41
6	Literaturverzeichnis.....	VI
7	Anhang	XI
8	Erklärungen.....	XIV
8.1	Eigenständigkeitserklärung	XIV

8.2	Anlage zur Eigenständigkeitserklärung	XV
-----	---	----

I. Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ALS	Airborne Laserscanning
BHD	Brusthöhendurchmesser
°C	Grad Celsius
CSF	Cloth Simulation Filter
DTM	Digitales Geländemodell
EFI	European Forest Institute
FVZ	Forstliche Vegetationszeit
GNSS	Global Navigation Satellite System
ha	Hektar
HMLS	Handheld Mobile Laserscanning
km	Kilometer
LiDAR	Light Detection and Ranging
m	Meter
m ³	Kubikmeter
Mio	Millionen
MLS	Mobiles Laserscanning
mm	Millimeter
MS	Multi-Scan
NN	Normal-Null
o.J.	Ohne Jahr
Pk	Probekreis
PLS	Personal Laserscanning
RGB	Red-Green-Blue
RT	Real-Time
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SS	Single-Scan
TLS	Terrestrisches Laserscanning

II. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Regionale Lage der Marteloskopfläche bei Neustadt/Harz.....	6
Abbildung 2-2 Aufnahmeeinheit RTK-GNSS-Gerät Emlid Reach RS3.....	7
Abbildung 2-3 Lage und Einteilung der Marteloskopfläche mit Quadranten, Grenzpunkten und Mittelpunkten.....	8
Abbildung 2-4 Beispielhafte Kennzeichnung der Baum-IDs innerhalb des vierten Quadranten.....	9
Abbildung 2-5 Aufnahmeeinheit des Laserscanners GeoSLAM ZEB Horizon RT als Rucksackgetragene Variante am Startpunkt des Scans.....	10
Abbildung 2-6 Beispiel eines der zur Georeferenzierung angedachten Targets.....	11
Abbildung 2-7 Trajektorie des ersten Scanvorgangs ausgehend vom Startpunkt.....	12
Abbildung 2-8 Trajektorie des zweiten Scanvorgangs ausgehend vom Startpunkt.....	13
Abbildung 2-9 Schematischer Workflow der digitalen Datenverarbeitung von den MLS-Rohdaten bis zur Auswertung der abgeleiteten Einzelbaumvariablen.....	15
Abbildung 2-10 Seitliche Darstellung der fusionierten MLS-Punktwolke, eingefärbt nach Höhe.....	16
Abbildung 3-1 Vergleich der Referenz- und Scan-BHDs.....	26
Abbildung 3-2 Häufigkeitsverteilung der BHD-Abweichungen.....	26
Abbildung 3-3 Vergleich der Referenz- und Scan-Höhen.....	27
Abbildung 3-4 Häufigkeitsverteilung der Höhen-Abweichungen.....	28
Abbildung 3-5 Vergleich der Referenz- und Scandistanzen aus den relativen Abweichungen zwischen nächstaufgenommenen Bäumen.....	29
Abbildung 3-6 Häufigkeitsverteilung der Distanzabweichungen zwischen Referenz- und Scandistanzen.....	29
Abbildung 3-7 Boxplot der absoluten horizontalen Lageabweichung zwischen Referenz- und Scanpositionen getrennt nach Probekreisen.....	31
Abbildung 4-1 Beispielhafte Darstellung der 3DFin-Ausgabe beziehungsweise der verarbeiteten Punktwolke mit unvollständig ausgewerteten Randbereichen. Besonders im linken oberen Bereich sind fehlende bzw. nicht weiterverarbeitete Strukturen erkennbar.....	33
Abbildung 4-2 Fehlervektoren der absoluten Lageabweichung zwischen Referenz- und Scanposition innerhalb der Probekreise. Die Pfeile zeigen Richtung und Größe der Abweichung von der Referenzposition zur Scanposition.....	36
Abbildung 7-1 Darstellung der BHD-Ausreißer der durch 3DFin dargestellten Bäume.....	XI
Abbildung 7-2 Beispielhafte Darstellung von Einzelbaum- und Kronenstrukturen in der für die Auswertung aufbereiteten Punktwolke.....	XII
Abbildung 7-3 Weitere Ansicht von Einzelbaum- und Kronenstrukturen in der für die Auswertung aufbereiteten Punktwolke.....	XIII
Abbildung 7-4 Räumliche Verteilung der 3DFin-Baumobjekte mit und ohne BHD-Wert, der nachträglich aufgenommenen Bäume sowie der Referenzierungsbäume.....	XIII

III. Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1 Auswertbare Detektionsrate mit gültigem BHD nach Durchmesserklassen getrennt.....	25
Tabelle 3-2 Statistische Kennwerte der BHD-Abweichungen.....	25
Tabelle 3-3 Statistische Kennwerte der Höhen-Abweichungen.....	27
Tabelle 3-4 Statistische Kennwerte der Abweichungen im relativen Positionsvergleich.....	28
Tabelle 3-5 Statistische Kennwerte zum baumindividuellen Vergleich der absoluten Lageabweichung.....	30
Tabelle 3-6 Kennwerte zum baumindividuellen Vergleich der absoluten Lageabweichung nach Probekreisen getrennt.....	30

IV. Formelverzeichnis

Formel 2-1 Formel zur Berechnung des Rechtswerts	14
Formel 2-2 Formel zur Berechnung des Hochwerts	14
Formel 2-3 Formel zur Berechnung der Detektionsrate in Prozent.....	20
Formel 2-4 Formel zur Berechnung der Abweichung der BHDs.....	21
Formel 2-5 Formel zur Berechnung der absoluten Abweichung.....	21
Formel 2-6 Formel zur Berechnung der quadrierten Abweichung	21
Formel 2-7 Formel zur Berechnung der Abweichung der Höhen	21
Formel 2-8 Formel zur Berechnung der Abweichung der relativen Position	22
Formel 2-9 Formel zur Berechnung der Lageabweichung der Stammposition	22
Formel 2-10 Formel zur Berechnung des Mittelwertes der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen	23
Formel 2-11 Formel zur Berechnung der Standardabweichung einer Stichprobe der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen	23
Formel 2-12 Formel zur Berechnung des RMSE der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen	23

1 Einleitung

Wälder bedecken im Jahr 2022 rund ein Drittel der Landesfläche Deutschlands und stellen damit ein prägendes Element unserer Kulturlandschaft dar (UMWELTBUNDESAMT, 2025). Sie erfüllen zugleich Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen, die im Rahmen einer nachhaltigen Bewirtschaftung miteinander in Einklang gebracht werden müssen (LANDESFORST MECKLENBURG-VORPOMMERN, o.J.). Der Nachhaltigkeitsgedanke ist historisch eng mit der Forstwirtschaft verbunden und wird häufig auf das von Carlowitz verfasste *Sylvicultura oeconomica* aus dem Jahr 1713 zurückgeführt (FLUCHS ET AL., 2022; VON CARLOWITZ, 1713). Während die traditionelle Waldbewirtschaftung stark auf die Holzproduktion ausgerichtet war, erfahren heute Ökosystemdienstleistungen wie Kohlenstoffspeicherung oder Biodiversitätsschutz zunehmende Bedeutung.

Waldbauliche Entscheidungen stehen mehr denn je im Spannungsfeld vielseitiger Zielsetzungen. Entscheidungen über die Förderung, Entnahme oder Erhaltung einzelner Bäume beeinflussen die Struktur, Stabilität und zukünftige Entwicklung eines Bestandes und stellen eine zentrale Grundlage für die nachhaltige und dauerhafte Bewirtschaftung von Waldbeständen dar (GONÇALVES, C. A., 2020). Die Fähigkeit, solche Entscheidungen auf der Grundlage von waldbaulichen Zielsetzungen, Bestandesinformationen und ökologischen Rahmenbedingungen zu treffen und ihre Auswirkungen abschätzen zu können, stellt daher einen wesentlichen Bestandteil des forstlichen Studiums dar (JOA ET AL., 2020). Im Zusammenhang des Studiums erfolgt die Vermittlung der dafür notwendigen Kompetenzen häufig in einem theoretischen Rahmen, welche teilweise durch praktische Übungen im Wald ergänzt werden. Eine zentrale Herausforderung besteht jedoch darin, dass die Auswirkungen waldbaulicher Eingriffe zeitverzögert eintreten und somit nicht unmittelbar erkennbar sind.

Vor diesem Hintergrund stellen Marteloskopflächen ein Instrument dar, um waldbauliche Entscheidungsprozesse praxisnah zu vermitteln. Bei Marteloskopflächen handelt es sich in der Regel um etwa ein Hektar (ha) große, rechteckige Flächen, auf denen jeder Einzelbaum mit einem Brusthöhendurchmesser (BHD) größer 7 cm erfasst wird. Die erfassten Variablen sind dabei Baumart, BHD, Baumhöhe und Baumposition. Zusätzlich wird jedem Baum eine permanent eindeutige Identifikationsnummer zugewiesen, welche der eindeutigen Zuordnung der Variablen dient (JOA ET AL., 2020; SCHUCK ET AL., 2015).

Auf Grundlage dieser Daten lassen sich Waldbestände digital abbilden und waldbauliche Eingriffe virtuell nachvollziehen. Ein Beispiel hierfür ist die I+ Training Software. Diese wurde durch das European Forest Institute (EFI) mitentwickelt und wird mithilfe von mobilen Endgeräten auf den Marteloskopen eingesetzt. Sie ermöglicht es durch eine virtuelle Baumauswahl unmittelbare Auswirkungen der unterschiedlichen Eingriffe darzustellen. Verglichen werden können dabei unter anderem ökonomische Kennwerte,

Biodiversitätsaspekte und Kohlenstoffspeicherung (SCHUCK ET AL., 2024). Marteloskope ermöglichen somit eine enge Verknüpfung von theoretischem Wissen und praktischer Anwendung. Sie tragen dazu bei, waldbauliche Entscheidungen transparent zu vergleichen sowie deren Konsequenzen nachvollziehbar zu diskutieren.

Die Einrichtung solcher Flächen basiert bislang überwiegend auf klassischen Inventurverfahren. Quadrantenweise werden die oben genannten Einzelbaumvariablen manuell erfasst. Dies geschieht mit verschiedenen Messgeräten, welche zu gegebener Zeit erläutert werden (SCHUCK ET AL., 2015). Häufig sind die Aufnahmen mit einem hohen Zeit- und Personalaufwand verbunden und unterliegen zudem potenziellen Messunsicherheiten.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur effizienten Aufnahme von Marteloskopen bietet Light Detection and Ranging (LiDAR). Das in den 1960er entwickelte System wurde in den 1980er Jahren mittels luftgetragener Plattformen zu einem wichtigen forstlichen Fernerkundungssystem (PETIT, P., 2020). Ebenfalls in den 1980er Jahren fand dieses System dann bereits erste Anwendungen in der Einzelbaumvermessung (NELSON, R., 2013).

LiDAR ist ein Verfahren mittels eines aktiven Sensors, welches punktwise die Gesamtheit der Geländefläche sowie auf ihr befindliche Strukturen geometrisch beschreibt. Diese Erfassung erfolgt durch das Senden von Laserimpulsen, welche auf die Oberfläche der Objekte treffen und dort reflektiert werden. Die Ermittlung der Distanz erfolgt über die Laufzeitanalyse des reflektierten Lichtimpulses sowie den Aussende- beziehungsweise Scanwinkels (ALBERTZ, J., 2007).

Das Ergebnis einer LiDAR-Aufnahme ist eine Punktwolke bestehend aus einer großen Anzahl an Punkten mit den dazugehörigen räumlichen Koordinaten x, y und z (ALBERTZ, J., 2007).

Je nach Trägerplattform lassen sich verschiedene LiDAR-Systeme unterscheiden. Beim Airborne Laserscanning (ALS) erfolgt die Datenerfassung mittels eines Sensors, der an einem Flugzeug befestigt ist. Alternativ gibt es als weitere luftgestützte Variante das Laserscanning mittels Drohne, was als uncrewed Laserscanning (ULS) bekannt ist. Neben luftgestützten Verfahren lassen sich bodengestützte Verfahren unterscheiden wie das terrestrische Laserscanning (TLS) und das mobile Laserscanning (MLS). Beim TLS wird der Sensor stationär auf einem Stativ betrieben, wodurch hochgenaue Single Scans (SS) erzeugt werden. Beim MLS wird eine mobile Trägerplattform verwendet, beispielsweise ein Fahrzeug oder ein tragbares System (BAUWENS ET AL., 2016; ZEYBEK, M., VATANDAŞLAR, C., 2021).

Der Aufbau eines MLS besteht aus einer Kombination eines Laserscanners mit einer Inertial Measurement Unit (IMU) und einem Global Navigation Satellite System (GNSS) (RYDING ET AL., 2015).

Bei der Positionsbestimmung im Wald stellt dichte Belaubung und die daraus resultierende niedrige Empfangsqualität von GNSS-Signalen eine Erschwernis dar. Deswegen nutzen

mobile Laserscanningverfahren für die Positionsbestimmung häufig Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Dabei wird die Bewegung des Sensors geschätzt, während gleichzeitig eine Karte der Umgebung aufgebaut wird. Das wird ermöglicht durch die fortlaufende Schätzung der Bewegung, als auch die Lage markanter Objekte in der Umgebung. Dafür ist nicht zwingend eine vorher bekannte Positionierung erforderlich. Es ermöglicht eine Aufnahme von Punktwolken unabhängig von GNSS-Signalen, birgt jedoch das Risiko von zusätzlichen Unsicherheiten, in Form von Driftfehlern in der Punktwolke (DURRANT-WHYTE UND BAILEY, 2006; RYDING ET AL., 2015).

Die genannten Laserscanning-Verfahren unterscheiden sich hinsichtlich Genauigkeit, Aufnahmeaufwand und Flächenleistung. So sind Datenaufnahmen mittels eines TLS meist im Genauigkeitsbereich von Millimetern (mm) (BAUWENS ET AL., 2016). Sie ziehen allerdings den Nachteil mit sich, dass während der Aufnahme von SS die sogenannten Okklusion-Effekte auftreten können. Dieser Effekt beschreibt, dass Objekte durch davorliegende Objekte verdeckt werden, und somit nicht vom Laser erfasst werden. Dies kann durch die Kombination mehrerer registrierter SS aus unterschiedlichen Positionen, die anschließend zu Multiscans (Ms) zusammengeführt werden, reduziert werden. Die Aufnahme von Multiscans erfordert allerdings einige Vorbereitung vor den Scans. Darunter die mehrfache Einrichtung des Plots und das Auslegen von Targets. Dies erhöht den Zeitaufwand und damit die Kosten der Datenerfassung (BAUWENS ET AL., 2016).

MLS ermöglicht im Vergleich zu statischem TLS eine schnellere und flexiblere Datenerfassung, die allerdings eine geringere geometrische Genauigkeit und Punktdichte aufweisen kann (BAUWENS ET AL., 2016). Die Positionsfehler resultieren unter anderem aus der Bewegung des Sensors, einer geringeren Punktdichte sowie Unsicherheiten in der Positionsbestimmung (RYDING ET AL., 2019). Darüber hinaus wird die Genauigkeit durch Faktoren wie Bestandesdichte, Unterwuchs und Scantrajektorie beeinflusst.

Die Anwendung von MLS gewinnt zu forstlichen Inventurzwecken zunehmend an Bedeutung. Bisherige Studien zeigen, dass MLS-Systeme zur Erfassung von Einzelbaumvariablen wie BHD, Baumhöhe, Baumposition eingesetzt werden können (BAUWENS ET AL., 2016; CHEN ET AL., 2019). In Bauwens et al. (2016) wurden handgeführtes mobiles Laserscanning mit Single- und Multi-Scan-TLS verglichen. Aus diesem Vergleich resultierte, dass MLS-Systeme besonders für die Erfassung des BHD geeignet sind. Chen et al. (2019) untersuchten Personal Laserscanning (PLS) unter Verwendung des SLAM-Verfahrens und bewerteten dabei die Erfassung von Baumposition und BHD. Mehrere Studien zeigen, dass die Genauigkeit von MLS-Daten von Aufnahmebedingungen und Auswertungsverfahren beeinflusst wird (BAUWENS ET AL., 2016; CHEN ET AL., 2019). In Kuželka et al. (2022) wurde MLS in einem naturnah strukturiertem Bestand untersucht, und

konnte zeigen, dass Scantrajektorie und Datenfilterung Einfluss auf Detektion und BHD-Schätzung haben (KUŽELKA ET AL., 2022).

Einen besonders engen Bezug zur vorliegenden Arbeit weist die Studie von Balestra et al. (2025) auf. Darin untersuchten die Autoren die Verwendung von MLS zur digitalen Abbildung einer Marteloskopfläche in einem einschichtigen Rotbuchenbestand (*Fagus sylvatica*). Zur Anwendung kamen dabei unter anderem 3DFin und CloudCompare zur Ableitung der Einzelbaumvariablen und digitalen Abbildung. Die Ergebnisse der Ableitung von BHD und Baumhöhe verglichen sie mit traditionell erhobenen Referenzdaten. Damit liegen erste Untersuchungen zur Nutzung von MLS im Zusammenhang mit Marteloskopflächen vor.

Da die erzielten Ergebnisse jedoch von Bestandestyp, Aufnahmebedingungen, Scantrajektorie, Referenzdaten und Auswertungsmethode abhängig sind, ist eine Übertragbarkeit dieser zu überprüfen. Diese Arbeit knüpft somit an bereits vorliegende Studien an.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Eignung des mobilen Laserscanning zur Erfassung von Einzelbaumvariablen im Kontext der Einrichtung von Marteloskopen zu untersuchen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Forschungsfragen bearbeitet:

- Mit welcher Genauigkeit können Einzelbaumposition, Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe mittels MLS im Vergleich zu direkten Messungen erfasst werden?
- Welche Faktoren beeinflussen die Genauigkeit der Erfassung?
- Welche technischen und methodischen Rahmenbedingungen sind erforderlich, um Einzelbaumparameter aus MLS-Punktwolkendaten zuverlässig abzuleiten?

Hierzu wurde ein Rotbuchenbestand mittels eines MLS erfasst und mit manuell erhobenen Referenzdaten verglichen. Die Verarbeitung der erzeugten Punktwolkendaten erfolgte sowohl manuell mit der Software als auch automatisiert mithilfe des Algorithmus 3DFin (LAÍÑO REBOLLIDO ET AL., 2024).

Die Arbeit gliedert sich in mehrere Kapitel. Nach der Einleitung werden zunächst das Untersuchungsgebiet sowie die angewandten Methoden beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt und im darauffolgenden Kapitel diskutiert. Abschließend werden die zentralen Ergebnisse zusammengefasst.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet in der vorliegenden Arbeit ist ein mehrschichtiger Rotbuchenbestand, welcher sich im gemeinschaftlichen Privatbesitz in Form der Bürger-Wald-Invest GmbH & Co. KG befindet. Organisatorisch sind die Privatwaldbesitzenden der FBG Nordthüringen angegliedert, vertreten durch die Geschäftsführung Daniel Keune.

Der aufgenommene Bestand ist eine 0,67 ha große Fläche im Südharz. Sie befindet sich in 1,3 Kilometer (km) Entfernung zum Ortsteil Neustadt/Harz der Landgemeinde Harztor. Zugehörig ist die Landgemeinde dem Landkreis Nordhausen in Thüringen. Siehe dazu die Karte in der Abbildung (Abb.) 2-1.

Die Fläche liegt im Wuchsgebiet „Harz“ und im Wuchsbezirk „Südharz“ (BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG, 2026).

Charakterisieren lässt sich der Bestand als mehrschichtiger Buchenbestand. Nach Forsteinrichtung aus dem Jahr 2021 sind die Buchen zum Stichtag 84 Jahre alt. Zum Zeitpunkt der Aufnahmen lagen sie demnach bei einem Alter von 89 Jahren (RAATZ, J., persönliche schriftliche Mitteilung, 04.06.2026). Da der Bestand zu einer hohen Wahrscheinlichkeit aus Verjüngung stammt, ist von einer Spanne von 90 bis 110 Jahren auszugehen (RAATZ, J., persönliche schriftliche Mitteilung, 04.06.2026).

Die Rotbuche dominiert den Bestand mit einem Mischungsanteil von knapp 89,2 Prozent und einer Grundfläche je Hektar von 28,80 m². Weitere Baumarten verteilen sich auf die verbleibenden 10,8 Prozent mit einer Grundfläche von 3,49 m². Dies sind vor allem gemeine Hainbuche (*Carpinus betulus*), Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*), Echter Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), Sandbirke (*Betula pendula*), Stieleiche (*Quercus robur*), sowie zu kleinen Anteilen aus Waldkiefer (*Pinus sylvestris*), Gemeiner Fichte (*Picea abies*) und Vogelkirsche (*Prunus avium*).

Der Bestand liegt auf einer Höhe von 382-400 Meter über Normal-Null (NN). Demnach ist der Bestand der Höhenstufe submontan einzuordnen (WALENTOWSKI ET AL., 2016). Zur Einschätzung der Klimadaten wurde die nahegelegene Wetterstation in Nordhausen gewählt. Die aufgezeichneten Daten beziehen sich auf einen 30-jährigen Zeitraum von 1991-2021 und beziehen sich auf eine Höhe von 220 m über NN (CLIMATE DATA, 2022). Für die Schätzung dienen die nach Walentowski et al. (2016) angenommenen Werte. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Temperaturen mit der Höhe um ca. 0,6°C/100 m abnehmen. Die Niederschlagswerte erfahren ebenfalls eine korrigierte Schätzung mit der Höhe mit einer Zunahme von 60 mm/100 m im Jahresniederschlag und 20 mm/100 m im Niederschlag der Forstlichen Vegetationszeit (FVZ) (WALENTOWSKI ET AL., 2016).

Die Temperatur liegt geschätzt im Jahresdurchschnitt bei 7,92° Celsius (°C) und einem durchschnittlich geschätzten jährlichen Niederschlag von 864 mm. Die FVZ liegt bei 150 Tagen mit einer durchschnittlichen Temperatur von 14,92°C und einem durchschnittlich geschätzten Niederschlag von 457 mm (CLIMATE DATA, 2022; WALENTOWSKI ET AL., 2016).

Der Buchenbestand steht auf einer geologischen Einheit aus dem Rotliegend. Symbolisiert wird das Gebiet durch das Symbol r2. Diese ist eine Gruppe der geringwertigeren Böden über den Rotliegendsubstraten. Die auftretenden Bodenformen in dem Untersuchungsgebiet stehen unter keinem Einfluss von Grundwasser, zeigen generell eine starke Versauerungstendenz und weisen gegenüber r1 geringere Wasserspeicherkapazität mit zum Teil durchlässigen, austrocknenden Standorten auf. Als Bodenformen sind Bergsandlehm-/Fels-Braunerden und Fels-Ranker Ausprägungen vorzufinden. (THÜRINGER LANDESAMT FÜR UMWELT, BERGBAU UND NATURSCHUTZ, o. J.)

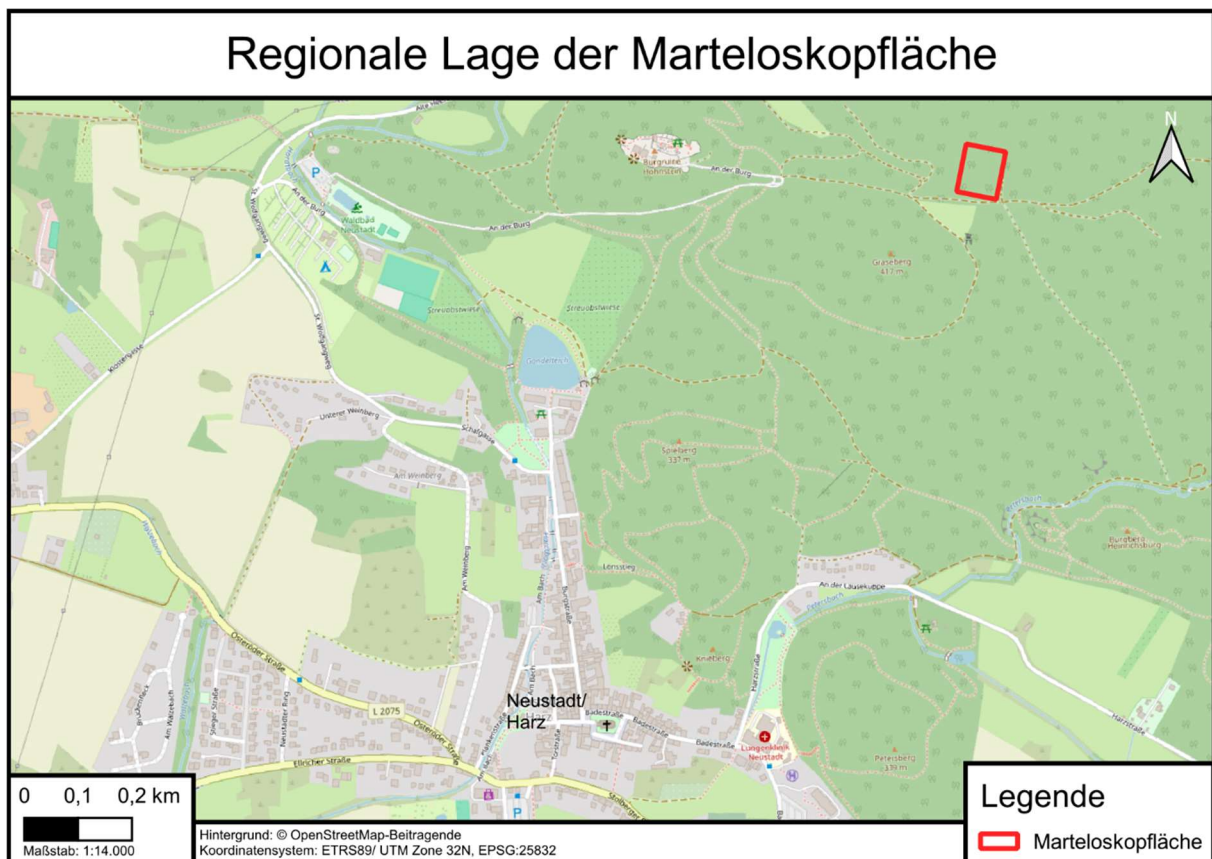


Abbildung 2-1 Regionale Lage der Marteloskopfläche bei Neustadt/Harz

2.2 Anlage der Marteloskopfläche

Die in der Arbeit angelegte Marteloskopfläche liegt im Privatwald Südharz. Für eine genauere Beschreibung der Untersuchungsfläche siehe Kapitel 2.1 „Untersuchungsgebiet“.

Der Wunsch nach der Anlage der Marteloskopfläche wurde durch die Privatwaldbesitzenden geäußert. Durch den Waldeigentümer wurde die grobe Lage bereits vor Beginn der Gespräche festgelegt. In Vorgesprächen zur Flächengröße und -form wurden diese durch das European

Forest Institute (EFI) auf eine Flächengröße von einem ha in einer rechteckigen Form ausgelegt (EUROPEAN FOREST INSTITUTE, o.J.).

Die genauere Abstimmung der Lage folgte in einem Ortsbegang. Dabei wurde sich auf den Aufnahmeort aus der Karte in Abb. 2-3 geeinigt.

Zur besseren Orientierung wurde sich auf bereits vorhandene Strukturelemente geeinigt. Links und rechts der Fläche sind diese in Form von Rückegassen anzutreffen. Unterhalb der Fläche als forstlicher Hauptweg.

Da diese zunächst auch die begrenzenden Faktoren darstellten, wurde zunächst die maximale Breite zwischen den beiden Rückegassen ermittelt. Dies erfolgte im oberen Bereich der Fläche, da dort augenscheinlich der geringste Abstand vorlag. Die Messungen erfolgten mittels auf Ultraschall basierenden Distanz- und Höhenmessgeräten Vertex 5 der Marke Haglöf. Die ermittelte Horizontaldistanz betrug 75 m.

Durch die vorgegebene Form des Rechtecks und der Topografie der Fläche wurde eine Kantenlänge von 90 m gewählt. Als Orientierung für das Rechteck wurde die rechte Rückegasse gewählt und für die Richtung deren Azimut von 10° bestimmt.

Ausgerichtet wurde die Fläche anhand eines gesetzten Ursprungspunktes in der unteren rechten Ecke. Die Einmessung zur digitalen Weiterverarbeitung erfolgte mittels des Reach RS3 der Marke Emlid (Abb. 2-2). Der Real Time Kinematik (RTK) GNSS-Empfänger ist imstande mithilfe von Korrekturdaten eine Genauigkeit von ungefähr 0,15 bis 6,75 Metern (m) im Wald zu erreichen (CĂTEANU ET AL., 2024).

Die Einrichtung von weiteren Grenzpunkten erfolgte vor Ort. Anhand des bestimmten Azimuts und der vorher festgelegten Länge wurde in QGIS (Version 3.40.9) eine Gerade generiert. Anhand der Orientierung zu der Geraden wurde im 90° -Winkel nun zwei weitere Geraden mit einer Länge von 75 m aufgespannt. An jeder der Ecken wurden Punkte gesetzt. Somit war die Form des Rechtecks vorhanden und die

Grenzpunkte konnten gezielt angelaufen werden. Auf der Hälfte der jeweiligen Geraden wurden ebenfalls Punkte gesetzt, anhand derer dann nach ähnlichem Verfahren der Mittelpunkt der Fläche markiert wurde.

Auch diese wurden mithilfe des RTK-GNSS-Empfängers angelaufen und eingemessen.

Markiert wurden die Grenzpunkte und der Mittelpunkt der Fläche durch handelsübliche 1,5 m hohe Vierkantlatten aus Fichte/Tanne, welche einen halben m in den Boden getrieben wurden. Diese wurden zur besseren Erkennbarkeit durch neongelbe und weiße Langzeitfarbe markiert.



Abbildung 2-2
Aufnahmeeinheit RTK-
GNSS-Gerät Emlid
Reach RS3

Durch die gegebenen Begrenzungen wurde sich nach Abstimmung mit der EFI auf eine Flächengröße von 0,675 ha verständigt.

Zur besseren Datenaufnahme empfiehlt die EFI die Fläche in Quadranten einzuteilen. Anhand der Eck- und Mittelpunkte konnte dies eingeteilt werden. Zur Visualisierung ist dafür die Karte in Abb. 2-3 unterhalb des Kapitels eingefügt. Durch die Einteilung in Quadranten konnte jedem Baum innerhalb eines Quadranten eine eindeutige ID zugewiesen werden. Beispielhaft ist dies in Abb. 2-3 dargestellt. Die Nummerierung folgte einer Systematik, bei der die erste Ziffer der ID der jeweiligen Nummer des Quadranten entspricht. Im vierten Quadranten begann die Nummerierung bei 4001 und wurde fortlaufend weitergeführt (Abb. 2-3).

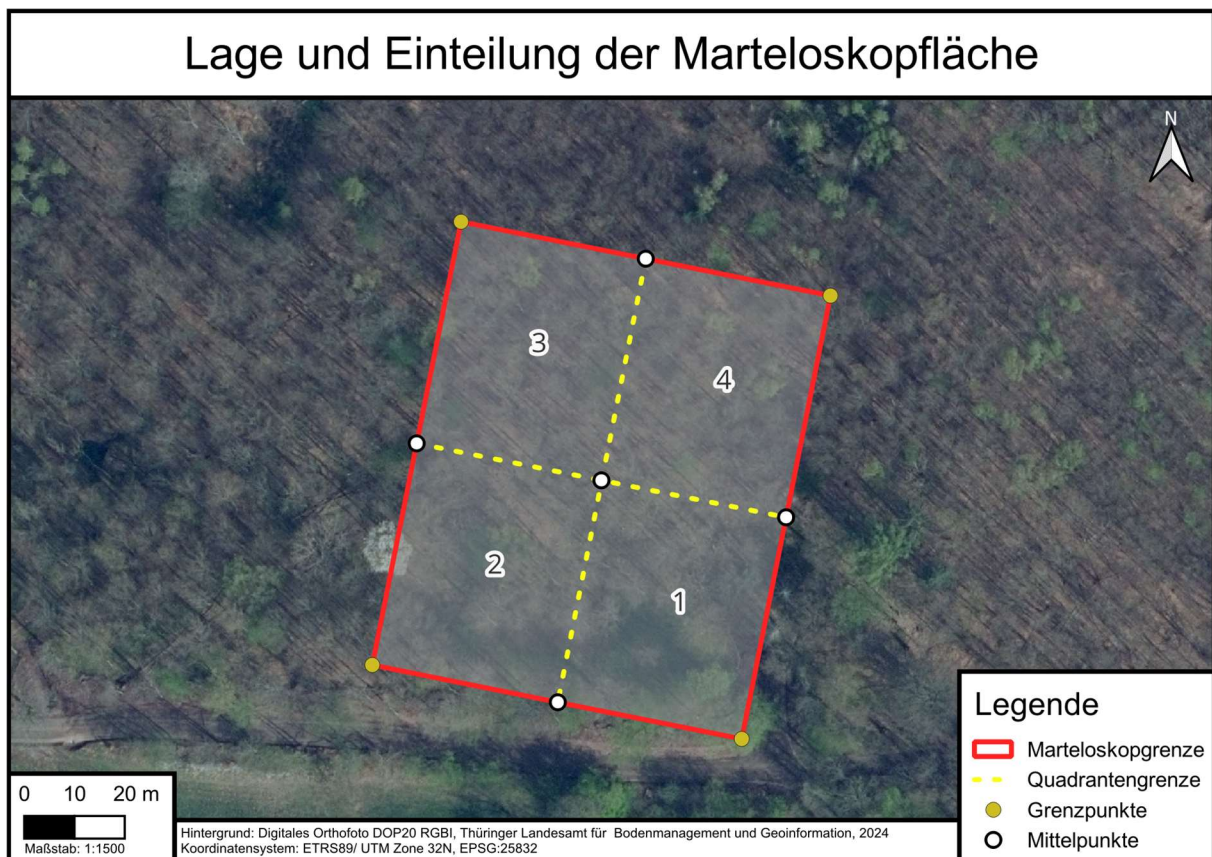


Abbildung 2-3 Lage und Einteilung der Marteloskopfläche mit Quadranten, Grenzpunkten und Mittelpunkten

2.3 Datenerhebung

2.3.1 Manuelle Vollaufnahme der Referenzdaten

Zur Erstellung eines Referenzdatensatzes wurden systematische Geländeaufnahmen durchgeführt.

Die Variablen wurden auf Grundlage verschiedener Probeflächendesigns aufgenommen. Der BHD, wie auch die Sortimentierung der Bäume, wurde für jeden auf der Fläche befindlichen Baum in einer Vollaufnahme erfasst. Die Baumhöhe konnte in der Vollaufnahme aufgrund der Dichte nicht für alle Bäume aufgenommen werden. Die Position der jeweiligen Bäume wurden dagegen innerhalb der Probekreise erhoben. Die Vollaufnahme der Fläche erfolgte strukturiert in Quadranten. Dabei wurde jeder Baum einzeln anhand der ID aufgesucht und die oben genannten Variablen erhoben. Beispielhaft ist das gezeigt in der Abb. 2-4.



Abbildung 2-4 Beispielhafte Kennzeichnung der Baum-IDs innerhalb des vierten Quadranten

Zur Aufnahme der Variablen wurden verschiedene Messinstrumente genutzt. Der durch Kramer und Akça definierte BHD wurde mittels Umfangmaßbänder erhoben. Diese ermöglichen durch Umrechnung des Umfangs in einen direkt ablesbaren Durchmesser (KRAMER und AKÇA, 2008).

Die Baumhöhe wurde als Höhenunterschied zwischen der Baumspitze und den Baumfußpunkt definiert. Sie wurde mittels des Trupulse 360 oder Vertex 5 erhoben. Diese bestimmen die Baumhöhe auf Grundlage von horizontaler Distanz- und Neigungsmessung nach dem trigonometrischen Prinzip (KRAMER und AKÇA, 2008; LASER TECH, 2026).

Die Bestimmung der Baumart und Sortimentierung am Stamm erfolgte durch die jeweils aufnehmende Person. Dabei wurde in die Sortimente A, B, C, D und Brennholz sortiert. Dies erfolgte nach den Kriterien der Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (DFWR & DHWR, 2024). Alles, was nicht einer Qualitätsklasse von A, B, C und D entsprach wurde in das Brennholz Sortiment sortiert.

Die Variable der Position wurde in systematisch angelegten Probekreisen (Pk) erhoben. Aufgrund der Ausdehnung und Struktur der Untersuchungsfläche wurden 6 Pks angelegt. Die Probekreismittelpunkte wurden mithilfe eines systematischen Rasters in QGIS angelegt. Durch die Anzahl der Pks ergab sich ein horizontaler Abstand von 25 m und ein vertikaler Abstand von 22,5 m. Nach Kramer und Akça verliert die Stichprobenaufnahme an Wirksamkeit mit steigender Probeflächengröße und es werden Probeflächen empfohlen mit durchschnittlich 15-20 Bäumen (KRAMER und AKÇA, 2008). Dadurch und durch die zuvor festgestellte Dichte der Untersuchungsfläche wurde ein Probekreisradius von 10 m festgelegt

Einer der Probekreise konnte aufgrund dichter Naturverjüngung und der damit einhergehenden eingeschränkten Sicht sowie Begehrbarkeit nicht aufgenommen werden.

Die Position der Pks wurde mithilfe der Software QField (Version 4.1.3) und einem RTK-GNSS aufgesucht (QFIELD, o.J.). Die RTK-GNSS Aufnahmeeinheit ist abgebildet in der Abbildung 2-2. Nachdem die SOLL-Position ausgsucht wurde, wurde die Aufnahmeeinheit auf dieser Position ausgerichtet und eine Aufnahme der IST-Position gestartet. Die Positionsbestimmung erfolgte am Aufnahmetag überwiegend als Float-Lösung, welche eine geringere Positionsgenauigkeit im Vergleich zu Fix-Lösung aufweist (MARXACT, 2024). Aufgrund dieser Feststellung wurde eine Mittelwertbildung der Position über 10 min zur Minimierung kurzzeitiger Schwankungen durchgeführt. Zusätzlich wurde während der Pk-Aufnahme eine Rinex Aufzeichnung zur nachträglichen Genauigkeitsverbesserung im Post-Processing durchgeführt.

Für die Aufnahme der Probekreise wurden verschiedene Messgeräte genutzt. Um zu kontrollieren, ob Bäume im Probekreis stehen und welchen Abstand diese zum Mittelpunkt haben, wurde das Vertex 5 genutzt. Die Erfassung des Azimuts der Bäume erfolgte mithilfe eines Suunto-Präzisionskompass. Die Bäume wurden damit relativ zum Pk-Mittelpunkt aufgenommen.

2.3.2 Mobiles Laserscanning

Die Aufnahmen der LiDAR-Daten erfolgten mithilfe des Mobilen Laserscanners GeoSLAM ZEB Horizon RT der Firma FARO. Das System kann sowohl als HMLS, als auch rucksackgestützt eingesetzt werden. Die zur Aufnahme des Untersuchungsgebiets genutzte Konfiguration bestand aus dem LiDAR-Scanner als rucksackgestützte Variante (siehe Abb. 2-5).

Der Laserscanner selbst hat dabei laut Herstellerangaben eine Reichweite von bis zu 100 m. Dabei erzeugt dieser eine Punktwolke von bis zu 300.000 Punkte pro Sekunde und erreicht dabei unter optimalen Bedingungen eine relative Genauigkeit von bis zu 6 mm (FARO, 2026).



Abbildung 2-5 Aufnahmeeinheit des Laserscanners GeoSLAM ZEB Horizon RT als Rucksackgetragene Variante am Startpunkt des Scans

Eine Besonderheit des genutzten Systems ist die Visualisierung der aufgenommenen Punktwolken in Real-Time (RT) auf einem Endgerät mit Internetzugang. Zudem kann durch die in der Aufnahmeeinheit angebaute RGB-Kamera ZEB Vision die erzeugte Punktwolke anschließend durch aufgenommene Bilddaten eingefärbt werden. Die Aufnahmen dieser Bilddaten erfolgten parallel zum Scanvorgang.

Die Aufnahmen der Punktwolken mittels mobilen Laserscannern wurden im Januar 2025 durchgeführt. Die Scans wurden an einem Wintertag in kurzem zeitlichem Abstand zur Mittagszeit durchgeführt. Während der Aufnahmen herrschten kühle Temperaturen mit klaren und trocknen Witterungsverhältnissen. Stärkere Windverhältnisse traten nicht auf und Schneebedeckung lag nicht vor. Die Vegetation war aufgrund der Jahreszeit unbelaubt, wodurch eine gute Durchdringung der Bestandesstrukturen ermöglicht wurde. Im Aufnahmebereich befanden sich zudem saisonbedingt einzelne Holzpolter infolge laufender Holzeinschläge.

Zur späteren Georeferenzierung der Punktwolke wurden vor Beginn der Scans Targets im Bestand ausgebracht. Diese wurden mittels eines RTK-GNSS als Fix-Lösungen eingemessen. Als Targets dienten auf Vierkanteleisten gesteckte Tennisbälle (siehe Abb. 2-6).

Zusätzlich zu den Targets wurden als Backup zur alternativen Georeferenzierung drei Baumpositionen eingemessen. Die Lage der zur Referenzierung verwendeten Bäume ist ergänzend im Anhang in Abb. 7-4 dargestellt. Die Baumpositionen wurden ebenfalls mit einem RTK-GNSS eingemessen. Bei der



Abbildung 2-6 Beispiel eines der zur Georeferenzierung angedachten Targets

Auswahl der aufgenommenen Bäume wurde besonders auf die mögliche Wiederauffindbarkeit in der erzeugten Punktwolke geachtet. Bei der Aufnahme wurde weitestgehend auf Fix-Lösungen geachtet.

Die Datenaufnahme wurde auf einem im Bestand aufgesuchten Stubben begonnen. Auf diesem wurde die gesamte Einheit zu Beginn abgestellt und mithilfe der Bussole nach Norden ausgerichtet. Die Ausrichtung dient der initialen Orientierung der Punktwolke. Anschließend wurde der Scanvorgang mit Hilfe des verbundenen Tablets gestartet. Zu Beginn des Scanvorgangs wurde eine etwa einminütige statische Aufnahme durchgeführt, welche der Initialisierung und Kalibrierung des Laserscannerns diente. Darauffolgend wurde das Tragegestell auf Basis eines Rucksacks aufgesetzt und der Scanvorgang fortgeführt. Die Fläche wurde in reduzierter Bewegungsgeschwindigkeit unter Vermeidung von Erschütterungen abgeschritten. Dabei fand die Begehung in einem sternförmigen Muster statt (siehe Abb. 2-7).

Die Auswahl der Form erfolgte auf der Erkenntnis, dass der eingesetzte Laserscanner mit dem bereits in der Einleitung erwähnten SLAM-Verfahren arbeitet. Durch die Form wurden wiederholt zentrale Bereiche der Fläche begangen, um die SLAM-basierte Trajektorien-schätzung zu stabilisieren. Die wiederholten Überlappungen zwischen bereits

erfassten und neu aufgenommenen Bereichen können die räumliche Konsistenz der Punktwolke verbessern und Driftfehler begrenzen (VANDENDAELE ET AL., 2022).

Wenn während des Scans eines der im Vorhinein ausgebrachten Targets passiert wurde, wurde dieses erneut im langsamen Schrittempo in einem geringen Abstand umlaufen. Die Geschwindigkeit des Schrittempo wurde während des Vorgangs zudem an die Strukturen der Fläche angepasst. Nachdem der Begang der gesamten Fläche abgeschlossen war, wurde der rund 25-minütige Scanvorgang abgeschlossen.

Aufgrund dichter Vegetationsstrukturen im südöstlichen Bereich der Fläche wurde ein zusätzlicher Scanvorgang durchgeführt. Dieser dient der Erhöhung der Punktdichte und somit der Datenabdeckung in diesem Bereich.

Der erwähnte zusätzliche Scan-Vorgang wurde gewählt, um die Punktdichte in den struktureicheren und dichteren Bereichen zu erhöhen. Gleichzeitig wurden die einzelnen Scanzeiten begrenzt, da längere SLAM-basierte Aufnahmen zunehmend zu Driftfehlern neigen (KUŽELKA ET AL., 2022).

Dieser wurde nach gleichem Anfangsvorgehen vollzogen. Allerdings wurde von der weiteren Vorgehensweise der vorangegangenen Aufnahme abgewichen. In diesem Fall wurden explizit die struktureicheren Bereiche wiederholt langsamer begangen und die Fläche erneut über den vorhandenen Hauptweg umrundet, um eine ausreichende Datenqualität in den struktureicheren Bereichen zu erreichen. Dieser Vorgang dauerte rund 20 min.

Zur Nachvollziehbarkeit sind unterhalb die Abbildungen 2-7 und 2-8 eingearbeitet, welche die Trajektorien der beiden Scanvorgänge zeigt. Der Ursprung ist jeweils an dem oben erwähnten Baumstubben, welcher durch die Achsen in der Abbildung dargestellt wird.

Der gesamte Prozess der Generierung der Punktwolke konnte während der Aufnahme auf einem mitgeführten Tablet in Echtzeit (RT) verfolgt werden. Gespeichert wurden die erfassten Daten auf dem am Rucksack mitgeführten und angeschlossenen Data-Logger.

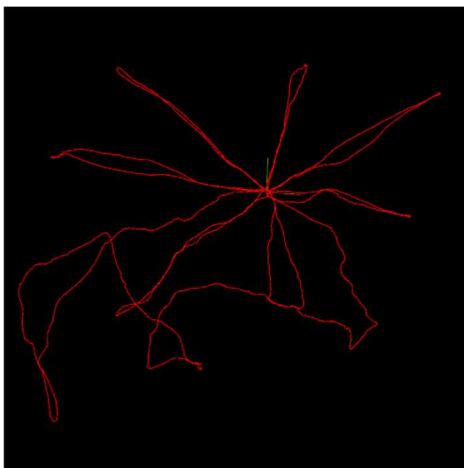


Abbildung 2-7 Trajektorie des ersten Scanvorgangs ausgehend vom Startpunkt

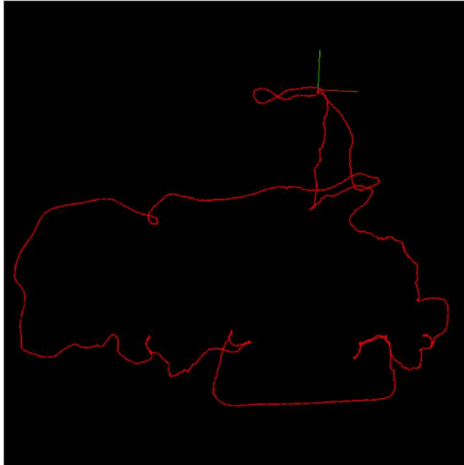


Abbildung 2-8 Trajektorie des zweiten Scanvorgangs ausgehend vom Startpunkt

2.4 Datenverarbeitung

2.4.1 Verarbeitung Referenzdaten

Die Digitalisierung, Organisation und weitere Berechnung der erhobenen Daten erfolgte mit Microsoft Excel für Microsoft 365 MSO (Version 2605, Build 16.0.20026.20140).

Die aufgenommenen Daten wurden vorerst auf einem Feldzettel mit der Baum-ID als Schlüsselvariable erfasst und anschließend in Form eines Excel-Sheets als Urdaten digitalisiert. Diese wurden visuell auf ihre Vollständigkeit überprüft und in ihrer Schreibweise vereinheitlicht.

Nach Erstellung der Urdatentabellen für die Vollaufnahme und die Probekreisaufnahme begann die Gestaltung des Datenaufbaus in einem relationalen Datenmodell mit verknüpften Tabellen. Die Zuordnung erfolgte über die jeweiligen Baum-IDs

Die aufgenommenen Vektordaten der Probekreise wurden der Emlid Software entnommen und lokal abgespeichert. Da diese nicht vollständig als FIX-Lösung aufgenommen werden konnten, wurde ein Post-Processing dieser Daten angestrebt. Die für das Post-Processing notwendigen Rinex-Daten des Rovers wie auch der Referenzstation wurden ebenfalls exportiert und systematisch lokal abgespeichert.

Das Post-Processing wurde mit der Software Emlid Studio (Version 1.9) durchgeführt. Die Probekreismittelpunkte wurden einzeln im Static processing verarbeitet. Dazu wurden die Punkte als Projekt hineingeladen, die Rover und Base Rinex hinzugefügt, sowie die Navigation File aus der Rinex. Nachdem die Punkte prozessiert wurden, folgte eine POS-Datei als Ergebnis.

Das Ergebnis wurde dann erneut per Sichtung überprüft. Dies erfolgte durch die Betrachtung der Parameter Sdn, Sde und Sdu. Dies sind die Standardabweichungen der Nord-, Ost- und Vertikalrichtung die in m, beziehungsweise m/ m angegeben werden (TAKASU, T., 2013). In die Betrachtung flossen neben den Standardabweichungen zudem noch das root mean square value (RMS) und der Ratio Faktor mit ein.

Aus den gesamten POS-Dateien wurden die nötigen Informationen wie Punkt-ID, latitude, longitude und Höhe in einer Excel-Tabelle zusammengefügt. Durch das Zusammentragen in Excel konnte eine CSV-Datei generiert werden, welche dann in QGIS importiert werden konnte. Zudem wurden die relevanten Informationen in ein gesondertes Excel-Sheet importiert, für weiterführende Berechnungen.

Nach der Korrektur konnten die IST-Koordinaten der Probekreismittelpunkte in die Excel eingepflegt werden.

Die Position der Einzelbäume wurde als Polarkoordinate relativ zum jeweiligen Probekreismittelpunkt erfasst. Hierzu wurden Distanz und Azimut jedes Baumes zum Mittelpunkt gemessen. Für die anschließende Transformation der polaren Koordinaten in globale kartesische Koordinaten in dem angestrebten Koordinatensystem UTM32N.

Die dafür nötige Rechnung erfolgt nach Formel 2-1 beziehungsweise Formel 2-2.

Formel 2-1 Formel zur Berechnung des Rechtswerts

$$RW = RW_{pk} + d \cdot \sin(\alpha)$$

RW= Rechtswert

RW_{pk} = Rechtswert des Probekreises

Formel 2-2 Formel zur Berechnung des Hochwerts

$$HW = HW_{pk} + d \cdot \cos(\alpha)$$

HW= Hochwert

HW_{pk} = Hochwert Probekreis

Die anschließenden Ergebnisse der Baumpositionen wurden in QGIS auf ihre Plausibilität überprüft.

2.4.2 Verarbeitung der LiDAR-Daten

Der digitale Verarbeitungsablauf der MLS-Daten ist schematisch in der Abb. 2-9 dargestellt.

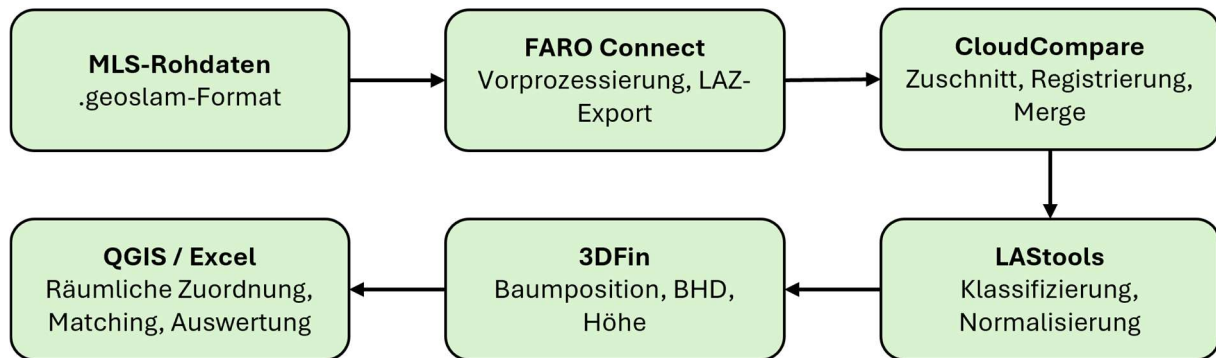


Abbildung 2-9 Schematischer Workflow der digitalen Datenverarbeitung von den MLS-Rohdaten bis zur Auswertung der abgeleiteten Einzelbaumvariablen

Die Verarbeitung der mittels eines mobilen Laserscanners aufgenommenen LiDAR-Daten begann mit der Extraktion der Rohdaten aus dem Datalogger des Scanners. Die zunächst im Datenformat „geoslam“ vorliegenden Daten wurden dann in die hauseigene Software „Faro Connect“ (Version 2023.2.0) der Marke FARO geladen. FARO Connect ist eine Verwaltungs- und Verarbeitungssoftware für Punktwolken und wird bereitgestellt durch die Firma Faro (FARO, 2025).

Durch die Anwendung des Workflows „Registration“ konnte dann die Punktwolke prozessiert werden. Dadurch werden sowohl die Punktwolke als auch die Trajektorie der Punktwolke visualisiert. Dazu siehe auch Abb. 2-7 und 2-8. Die beiden Prozessierten Punktwolken konnten dann in das komprimierte binäre Format zur Speicherung von Laserdaten LAZ überführt werden. Das Ergebnis waren die beiden Dateien „Aufnahme_Punktwolke_FBG_Scan1.LAZ“ und „Aufnahme_Punktwolke_FBG_Scan2.LAZ“.

Die LAZs konnten dann zur weiteren Verarbeitung in der Open-Source-Software CloudCompare (Version 2.13.2) geladen werden. CloudCompare bietet die Möglichkeit 3D-Punktwolken durch viele fortgeschrittene Algorithmen zu prozessieren und zu bearbeiten (CLOUDCOMPARE, 2026).

In einem ersten Vorgang wurden zunächst die beiden vorhandenen Punktwolken zugeschnitten, um bereits bekannte nicht relevante Bereiche der späteren Prozessierung auszuschließen. Im Anschluss wurden die Punktwolken subsampled auf eine Dichte von 2 cm um die Punktdichte zu reduzieren.

Nach der Reduzierung der Punktdichte wurden die Punktwolken manuell zueinander auf der X-Achse transformiert, um die bisherige Abweichung der beiden Punktwolken zu reduzieren.

Darauffolgend wurde eine Registrierung der Punktwolken vorgenommen, um erneut eine genauere Ausrichtung zueinander zu erreichen. Dabei wurde ein random sampling limit (RSL) von 200.000 mit einem final overlap von 50 % gewählt.

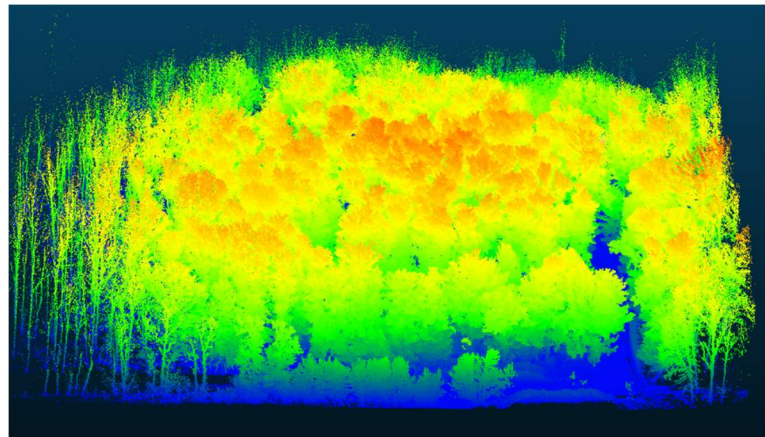
Abschließend der vorläufigen Prozessierung in CloudCompare wurden die Punktwolken noch mit der Funktion Merge zusammengefügt, um alle Bereiche der Fläche möglichst genau abzudecken.

Das Endergebnis, mit welchem dann weitergearbeitet wurde, war eine fusionierte Punktwolke, welche annähernd auf die letztendliche Größe zugeschnitten ist (Abb. 2-10).

Die LAZ wurde dann mithilfe von LAS-Tools (Version 1.2.4) weiterbearbeitet.

LAS-Tools ist ein Werkzeug zur schnellen Prozessierung von LiDAR-Daten-Dateien, entwickelt durch die Firma Rapidlasso GmbH

(RAPIDLASSO GMBH, 2026).



Mithilfe von LAS-Tools konnte die Punktwolke dann klassifiziert

Abbildung 2-10 Seitliche Darstellung der fusionierten MLS-Punktwolke, eingefärbt nach Höhe

werden. Dabei wurde sie in Boden- und Nicht-Bodenpunkte unterteilt. Die Klassifizierung erfolgte über die Kommandozeile unter Verwendung des Parameters -nature, welcher sich nach mehreren Testläufen für den vorliegenden Bestand als geeignet erwies. Nach Abschluss der Klassifizierung wurde die Punktwolke visuell überprüft. Da hierbei keine auffälligen fehlerklassifizierten Punkte festgestellt wurden, wurde die Punktwolke im weiteren Verlauf normalisiert.

Auch die Normalisierung wurde mithilfe von LAS-Tools durchgeführt. Dort wurde ebenfalls der Dateipfad der klassifizierten Punktwolke angegeben und über die richtigen Commands die Normalisierung gestartet.

Die aufgestellten Targets konnten in den vorhandenen Scans zwar vereinzelt in Faro Connect wiedergefunden werden, waren allerdings für eine Georeferenzierung über Point Picking in CloudCompare aufgrund ihrer Größe nicht ausreichend. Daher wurde auf eine alternative Vorgehensweise zur räumlichen Referenzierung zurückgegriffen.

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wurde für die automatisierte Ableitung der Einzelbaumvariablen die Open-Source-Software 3DFin (Version 0.6.0) verwendet. Dieser Algorithmus wurde gewählt, da dieser speziell für die Verarbeitung von Punktwolken forstlicher

Natur entwickelt wurde und eine automatisierte Ableitung der für die Arbeit relevanten Einzelbaumvariablen ermöglicht (CABO ET AL., 2023). Zudem bietet sie durch die automatisierte Ableitung von Einzelbauparametern aus TLS- bzw. MLS-Punktwolken eine praxisorientierte Auswertung der aufgenommenen LiDAR-Daten.

Die Open-Source-Software ist in verschiedenen Ausführungen als Standalone-Version, Python-Paket, QGIS-Plugin oder CloudCompare-Plugin nutzbar. Letzteres findet Anwendung in dieser Arbeit. Dabei wird es vor allem als benutzerfreundlicher Algorithmus beschrieben, welcher an die Besonderheiten der aufgenommenen Daten angepasst werden kann (CABO ET AL., 2023)

Für die automatisierte Ableitung von Einzelbaumvariablen wurde für 3DFin die registrierte und fusionierte LAZ der Punktwolken als Input gewählt sowie ein Speicherort als Output, für die Ergebnisablage gewählt.

Zu Beginn im Schritt Null normalisiert 3DFin die Punktwolke. Dabei wird ein Cloth Simulation Filter (CSF) beschrieben nach Zhang et al. (2016) genutzt, um in der Folge ein digitales Geländemodell (DTM) zu erzeugen. Der verwendete CSF nach Zhang et al. legt dabei eine Art von virtuellem, starrem Tuch über die Punktwolke, welches sich im begrenzten Maße an die Geländeform anpasst. Punkte, welche von dem Tuch zuerst berührt werden, werden dann als Bodenpunkte, alle übrigen als Nicht-Bodenpunkte klassifiziert (ZHANG ET AL., 2016). Durch diese Klassifikation wird dann ein DTM generiert.

Die Normalisierung erfolgt durch die Berechnung der normalisierten Höhen jedes Punktes durch die Bildung der Differenz zwischen ihrem z-Wert und der Höhe des DTM an ihrer vertikalen Projektion.

Zudem bietet 3DFin ebenfalls die Möglichkeit durch einen weiteren Schritt ein Rauschen (Noise) unter dem DTM zu bereinigen.

Im Schritt 1 findet die Identifikation der Bäume anhand ihrer Stämme entlang eines vom Nutzer definierten horizontalen Streifens statt. Der Algorithmus beschneidet dabei die Punktwolke auf einen vom Nutzer definierten unteren und oberen Höhebereich, in dem ausschließlich Baumstämme erwartet werden. Diese Höhen sollten im Idealfall astfreie Stämme abdecken. Dadurch, dass sich dies in der praktischen Umsetzung als nicht immer gegeben erweist, verfügt 3DFin über die Funktion des Zurückschneidens (Pruning), welches störende Elemente wie beispielsweise tiefliegende Äste versucht zu bereinigen. Die Intensität dieser Funktion lässt sich mithilfe der Pruning Intensity individuell anpassen. Diese stufenweise Intensität reicht von 0 bis 5, wobei in der Stufe 0 das Pruning übersprungen wird und in der Stufe 5 besonders aggressiv vorgeht (CABO ET AL., 2023).

Angegeben werden nach Cabo et al. die Stufen 0 bis 2 für besonders saubere Waldbestände bzw. wenig verrauschte Punktwolken. Im Rahmen der Auswertung der Punktwolken wurde die

Streifenspannweite auf 0,7 m bis 3,5 m auf den Standardeinstellungen belassen. Als Pruning-Intensität wurde aufgrund des teilweisen Strukturreichtums des Bestandes und der leicht rauschigen Punktwolke die 3. Stufe gewählt.

Die vorhandenen Punkte innerhalb des Streifens werden dann voxelisiert. Die Punktwolke wird dabei in Voxel, also Pixel mit würfelartiger Form mit einer Kantenlänge von 0,02 - 0,06 m unterteilt. Für jeden dieser vorhandenen Voxel wird dann ein Vertikalitätswert berechnet. Der Vertikalitätswert berechnet sich anhand von Nachbarschaften mit einem festen Radius. Dabei wird davon ausgegangen, dass Voxel eines Stammausschnittes vielfach übereinander liegen, und somit jeder einzelne Voxel einen hohen Vertikalitätswert aufweist. Anschließend findet ein Filterprozess basierend auf ihren Vertikalitätswerten statt. Dabei wird angenommen, dass die Punktstruktur eines gescannten Baumstammes einen hohen Vertikalitätswert aufweist, während andere Strukturen einen niedrigen aufweisen. Die verbleibenden Punkte mit hohen Vertikalitätswerten werden mithilfe eines DBSCAN-Algorithmus nach Ester et al. (1996) gruppiert. Voxel mit einem niedrigen Vertikalitätswert, ebenso wie Cluster unterhalb einer bestimmten Mindestgröße, werden herausgefiltert. Die potenziellen Stämme werden auch als „Voxelgruppen“ bezeichnet. (LAÍÑO REBOLLIDO ET AL., 2024).

In dem folgenden Schritt 2 wird dann die Individualisierung einzelner Bäume durchgeführt. Sobald nun also die Basen der Stämme innerhalb des horizontalen Streifens identifiziert wurden, werden diese isoliert und nummeriert. Anschließend werden die initialen Stammachsen berechnet und die Punkte der gesamten Punktwolke anhand ihres Abstands zu diesen Achsen klassifiziert wie auch jeweils einem Baum zugeordnet. Erneut werden die Punkte jedes Baumes voxelisiert und mithilfe des DBSCAN-Algorithmus gruppiert. Kleinste Bündel werden anschließend verworfen.

Aus verbleibenden Voxeln jenes Clusters, welche einen Baum umschließen, wird ein Bereich von Voxeln um die Stammachse ausgewählt. Der höchste dieser Voxel wird bestimmt und bildet mit seinem Z-Wert die anschließend betrachtete Baumhöhe. Punkte, die zu weit vom Stamm entfernt liegen und potenziell anderen Bäumen oder Rauschen zugeordnet werden können, werden automatisch bei der Schätzung der Gesamthöhe ausgeschlossen (LAÍÑO REBOLLIDO ET AL., 2024).

Der letzte Schritt berechnet dann die Stammdurchmesser in unterschiedlichen Höhenabschnitten. Nachdem jeder Punkt der Punktwolke einer der Achsen zugeordnet ist, extrahiert der Algorithmus die vollständigen Stämme. Zudem werden die Äste in einem erneuten „Entastungsprozess“ entfernt. Nach Abschluss dieser Schritte werden in mehreren verschiedenen Höhen Kreise an die Stämme angepasst. Diese Höhen verteilen sich gleichmäßig entlang der Stämme, wobei die Abstände zwischen den Schnitthöhen vom Nutzer

definiert werden können. Im Zuge dieser Arbeit wurden die Abstände auf Standardeinstellungen belassen.

Um nun die Stammdurchmesser in verschiedenen Querschnitten entlang der Baumachsen zu messen, wird die Methode der kleinsten Quadrate angewandt. Dazu wird in jeder Schnitthöhe eine Punkscheibe ausgewählt, an die mit dieser Methode ein Kreis angepasst wird. Die Absicherung der Genauigkeit des Kreises erfolgt in einer vierstufigen Überprüfung (LAÍÑO REBOLLIDO ET AL., 2024; CABO ET AL., 2023).

Begonnen wird die Überprüfung mit der Platzierung eines weiteren kleineren Kreises innerhalb des vorhandenen Kreises. Der innere Kreis dient dazu, die Verteilung der vorhandenen Punkte innerhalb des Querschnittes zu analysieren. Es wird angenommen, dass ein Großteil der Punkte außerhalb des inneren Kreises liegen, da diese die aufgenommene Stammoberfläche repräsentieren. In Abhängigkeit der genutzten Technologie, können ebenfalls in geringer Anzahl, Punkte innerhalb des Kreises durch Rauschen vorkommen. Befinden sich jedoch eine größere Anzahl an Punkten innerhalb des inneren Kreises, welche nicht auf ein Rauschen zurückzuführen sind, ist davon auszugehen, dass die Kreisanpassung um den Stamm wahrscheinlich fehlerhaft ist. In dem darauffolgenden Schritt wird der Querschnitt sektioniert, um eine Überprüfung durchzuführen, ob diese Punkte enthalten. Werden nicht genügend Sektoren mit Punkten belegt, besteht der Querschnitt den Test nicht. Ist dies der Fall, wird davon ausgegangen, dass die Punktverteilung auf eine unerwünschte Struktur hinweist oder der angepasste Durchmesser möglicherweise fehlerhaft ist. Sind die beiden Schritte abgeschlossen folgt die Überprüfung des Durchmessers. Dabei wird betrachtet, ob der Durchmesser des angepassten Kreises innerhalb eines definierten Wertebereiches liegt, um Anomalien durch fehlerhafte Erfassung der Kreise auszuschließen. Im letzten Schritt wird dann ein Indikatorwert berechnet, um festzustellen, ob Abweichungen bestehen. Überprüft wird, ob eine vertikale Abweichung zur Stammachse besteht. Der Indikatorwert leitet sich aus dem Vergleich des Neigungswinkels jedes Querschnitts zu allen anderen Querschnitten ab. Dabei werden lokale Ausreißer in der Neigung identifiziert. Dieses Verfahren bietet den Vorteil, dass dieses auch für geneigte Stämme geeignet ist.

Nach Abschluss sämtlicher Prozessierungsschritte exportiert 3DFin verschiedene LAS-Dateien zur Visualisierung der Ergebnisse als auch eine tabellarische Ergebnisdatei. Diese enthält unter anderem die jeweiligen Baumpositionen, Baumhöhen sowie die BHDs.

Zur Herstellung eines räumlichen Bezuges wurde die unreferenzierte Punktwolke in QGIS importiert und über im Feld aufgenommene Bäume erst räumlich transformiert und anschließend orientiert. Die angewendete Methode wurde anschließend durch verschiedene Vergleiche auf ihre Genauigkeit betrachtet. Durch einen Vergleich in QGIS, von eingemessenen Bäumen als Fix-Lösungen, mit den Punktdaten von 3DFin sowie durch

manuelle Messungen konnte dies mit geringen Abweichungen als ausreichend betrachtet werden.

2.5 Auswertung der Daten

2.5.1 Datenorganisation und Matching

Die Auswertung der Daten erfolgte mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel. In Excel wurde ein relationales Datenmodell aufgebaut, welches die verschiedenen Tabellenblätter miteinander verknüpft.

Nachdem die Punkte wie zuvor beschrieben räumlich zugeordnet wurden, erfolgte ein Matching der Referenz- und Scanwerte in Excel. Die Zuordnung erfolgte mithilfe der XVERWEIS-Funktion. Dabei wurden die Referenzwerte der Brusthöhendurchmesser und Baumhöhen anhand der jeweiligen Baumnummer den Scanwerten zugeordnet.

2.5.2 Berechnung der Detektionsrate

Nach Abschluss des Verknüpfens erfolgte zunächst die Berechnung der Detektionsrate für die Gesamtfläche. Diese erfolgte in zwei Varianten. In der ersten Variante wurden Bäume als detektiert gewertet, denen ein durch 3DFin erkannter Baum eindeutig zugeordnet werden konnte und für die ein BHD-Wert (Diameter at Breast Height, DBH) vorlag. Durch diese Variante wird somit beschrieben, wie hoch der Anteil der Bäume ist, die für eine weitere BHD-Analyse vollständig nutzbar sind. Grundlage der Berechnung bildeten die gültigen Referenzbäume der Vollaufnahme sowie die Anzahl der durch 3DFin detektierten Bäume (vgl. Formel 2-3).

Formel 2-3 Formel zur Berechnung der Detektionsrate in Prozent

$$Detektionsrate_{\%} = \left(\frac{n_{detektiert}}{n_{Referenz}} \right) * 100$$

Einzelbäume, welche nicht eindeutig zugeordnet werden konnten, wurden von den weiteren paarweisen Genauigkeitsanalysen ausgeschlossen.

In der zweiten Variante wurde eine Gesamtdetektion errechnet. Es wurden alle eindeutig zuordbaren Objekte des Scans berücksichtigt, unabhängig davon, ob für diese ein BHD-Wert vorlag. Die Auswertung beschreibt somit den Anteil der Bäume, die durch den Auswertungsworkflow grundsätzlich erkannt wurden.

Zusätzlich zu den Varianten wurde eine Detektionsrate nach Durchmesserklassen berechnet. Als detektiert galten Bäume wie in der Variante eins bereits definiert. Eine Zuordnung der Bäume in die jeweiligen Durchmesserklassen erfolgte anhand des BHDs. Dabei wurde jeweils die Anzahl jeder Durchmesserklasse der eindeutig zugeordneten Scanbäume der Anzahl an Referenzbäumen derselben Klasse gegenübergestellt.

2.5.3 Berechnung der BHD-Abweichungen

Die Analyse der BHD-Genauigkeit erfolgte auf Grundlage der gematchten Referenz- und Scanwerte.

Für die BHD-Analyse wurden alle eindeutig zuordenbaren Bäume der Matching-Tabelle verwendet. Die Abweichung wurde als Differenz zwischen dem abgeleiteten BHD und dem Referenz-BHD des jeweiligen Baumes berechnet (vgl. Formel 2-4)

Formel 2-4 Formel zur Berechnung der Abweichung der BHDs

$$Abweichung_{BHD} = (BHD_{Scan} * 100) - BHD_{Referenz}$$

Da der 3DFin-Algorithmus die BHD-Werte in m ausgibt, erfolgte zur Vergleichbarkeit eine Umrechnung in Zentimeter.

Zusätzlich wurden die absoluten sowie die quadrierten Abweichungen berechnet. Die absolute Abweichung wurde zur Bewertung der reinen Fehlergröße berechnet, unabhängig von Über- oder Unterschätzung. Die quadrierten Abweichungen bildeten die Grundlage zur einfachen Berechnung des RMSE. Auf Grundlage dieser Werte wurden weitere statistische Kennwerte bestimmt.

Formel 2-5 Formel zur Berechnung der absoluten Abweichung

$$|Abweichung| = |Scanwert - Referenzwert|$$

Formel 2-6 Formel zur Berechnung der quadrierten Abweichung

$$Abweichung^2 = (Scanwert - Referenzwert)^2$$

2.5.4 Berechnung der Höhenabweichung

Die Analyse der Höhenwerte erfolgte analog zur BHD-Auswertung auf Grundlage der gematchten Werte. Für die Höhenanalyse wurden ausschließlich Bäume verwendet, denen eine eindeutige Baumnummer zugeordnet werden konnte und für die zusätzlich die Referenzmessung vorlag. Die Gründe für fehlende Referenzmessungen wurden zuvor in Kapitel 2.3.1 erläutert.

Die Höhenabweichung wurde als Differenz zwischen Scan- und Referenzhöhe berechnet (vgl. Formel 2-7). Zusätzlich wurden die absoluten sowie die quadrierten Abweichungen bestimmt. Auf Grundlage dieser Werte wurden weitere statistische Kennwerte berechnet.

Formel 2-7 Formel zur Berechnung der Abweichung der Höhen

$$Abweichung_{Höhe} = Höhe_{Scan} - Höhe_{Referenz}$$

2.5.5 Berechnung der Positionsabweichungen

Die Auswertung der Positionen wurde in zwei verschiedene Teilanalysen untergliedert. Zum einen wurden die relativen Lagegenauigkeiten anhand der Distanzen zu benachbarten Bäumen innerhalb eines Probekreises berechnet. Zum anderen wurde die absolute Lagegenauigkeit durch den Vergleich der georeferenzierten Scanner-Baumposition mit den Referenzpositionen der jeweiligen Einzelbäume bestimmt. Während die relative Lagegenauigkeit die innere geometrische Konsistenz der Baumpositionen zueinander beschreibt, bewertet die absolute Lagegenauigkeit die Übereinstimmung der Baumpositionen im übergeordneten Koordinatensystem.

2.5.5.1 Distanzvergleich benachbarter Bäume

Die Analyse der relativen Positionsgenauigkeit erfolgte anhand von Abständen benachbarter Bäume innerhalb der Probekreise. Als benachbarte Bäume wurden dazu jeweils aufeinanderfolgend aufgenommene Bäume innerhalb eines Probekreises betrachtet.

Dazu wurden innerhalb der Probekreise die Abstände zwischen jeweils benachbarten Bäumen der Referenz- und Scanwerte verglichen. Bäume, für welche durch den Scan keine Positionsdaten vorlagen, wurden aus den Berechnungen entfernt.

Formel 2-8 Formel zur Berechnung der Abweichung der relativen Position

$$Abweichung_{Distanz} = Distanz_{Scan} - Distanz_{Referenz}$$

2.5.5.2 Vergleich der Stammposition

Ergänzend zur Analyse der Distanz benachbarter Bäume, wurde ein direkter Vergleich der Stammposition durchgeführt. Hierzu wurden die eindeutigen Koordinaten der erfassten Referenzbäume mit den entsprechenden Bäumen aus dem Scan mit räumlichem Bezug verglichen. Die Abweichungen wurden getrennt für den Rechts- und Hochwert der jeweiligen Bäume berechnet. Aus beiden Koordinatenabweichungen konnte dann die zweidimensionale Abweichung der Lage bestimmt werden.

Formel 2-9 Formel zur Berechnung der Lageabweichung der Stammposition

$$Lageabweichung = \sqrt{(X_{Scan} - X_{Referenz})^2 + (Y_{Scan} - Y_{Referenz})^2}$$

2.6 Statistische Kennwerte

Zur statistischen Auswertung wurden verschiedene Kennwerte bestimmt. Hierzu zählen unter anderem die Minimal- und Maximalwerte der jeweiligen Abweichungen. Diese wurden aus den Abweichungen berechnet.

Zusätzlich wurden der Mittelwert (vgl. Formel 2-10) und der Median der jeweiligen Abweichungen berechnet.

Abschließend wurden die Standardabweichung sowie der Root Mean Square Error (RMSE) für die Abweichungen der BHD-, Höhen- und Positionswerte berechnet. Die Standardabweichung beschreibt die Streuung der jeweiligen Abweichung (vgl. Formel 2-11). Der RMSE wurde aus der Wurzel des Mittelwertes der quadrierten Abweichungen berechnet (vgl. Formel 2-12). Mittelwert und Median wurden zur Bewertung direkt aus den Abweichungen berechnet, um eine Tendenz feststellen zu können. Der RMSE wurde aus den quadrierten Abweichungen berechnet und beschreibt eine direkte Fehlergröße.

Formel 2-10 Formel zur Berechnung des Mittelwertes der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Formel 2-11 Formel zur Berechnung der Standardabweichung einer Stichprobe der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Formel 2-12 Formel zur Berechnung des RMSE der BHD-, Höhen-, und Distanzabweichungen

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Abweichung^2}$$

Zur grafischen Darstellung der Ergebnisse wurden zusätzlich Streudiagramme, Histogramme sowie Boxplots erstellt. Streudiagramme dienen dem Vergleich zwischen den Referenz- und Scan-Werten verwendet. Ergänzend wurden für die erstellten Streudiagramme lineare Trendlinien sowie das Bestimmtheitsmaß R^2 dargestellt, um Zusammenhänge zwischen den Werten beschreiben zu können. Die Histogramme wurden zur Darstellung der Verteilung der berechneten Abweichungen genutzt.

3 Ergebnisse

Nachdem das Matching der beiden Datensätze durchgeführt wurde, erfolgte die Analyse der Referenz- und Scanwerte. Dabei wurden die aus der Vollaufnahme beziehungsweise den Probekreisaufnahmen erhobenen Referenzdaten mit den aus der Punktwolke extrahierten Baumvariablen verglichen.

Die Auswertung umfasste die Analyse der Baumhöhe, der Bruthöhendurchmesser und der Baumposition, durch den Vergleich der relativen räumlichen Genauigkeit anhand von Abständen benachbarter Bäume innerhalb der Probekreise. Zusätzlich wurde noch die Detektionsrate der Software innerhalb des Versuchsbestandes untersucht.

Zur Bewertung der Abweichungen wurden statistische Kennwerte wie Mittelwert, Median, Standardabweichung sowie der RMSE herangezogen und ergänzend grafisch dargestellt.

3.1 Detektionsrate der Baumstämme

3.1.1 Gesamtdetektion

Die Gesamtdetektion ist eine der Varianten der berechneten Detektionsraten in der vorliegenden Arbeit. Als detektiert galten dabei alle im Scan erkannten Baumobjekte, denen eine eindeutige Baum-ID in der Vollaufnahme zugeordnet werden konnte.

In der Vollaufnahme wurden 327 Bäume mit einem BHD über der Derbholzgrenze aufgenommen. Im Scan konnten davon 310 Bäume detektiert werden, womit sich eine Gesamtdetektion von 94,80 % ergibt. Diese Kennzahl beschreibt damit die reine Auffindbarkeit von abgeleiteten Bäumen durch den Algorithmus aus dem Scan. Diese Auswertung erfolgt losgelöst von der Ausgabe eines gültigen BHD-Werts. Die räumliche Verteilung der 3DFin-Baumobjekte mit und ohne BHD sowie der nachträglich aufgenommenen Bäume ist ergänzend im Anhang dargestellt (vgl. Abb. 7-4).

3.1.2 Auswertbare BHD-Detektionsrate

Aus der Ableitung der durch den Scan detektierten Bäume ergaben sich 171 von 327 Bäumen mit BHD, die per Baumnummer zuordbar waren.

Daraus folgt eine berechnete Detektionsrate für Bäume mit zugeordnetem BHD-Wert von 52,29 %. Diese Teilmenge bildet die Grundlage für die anschließenden Berechnungen zur Analyse der BHD-Abweichungen.

3.1.3 Detektionsrate nach Durchmesserklassen

Ergänzend zur Detektionsrate mit gültigem BHD, wurde die Erfassung noch differenziert nach Durchmesserklassen betrachtet. Die Klassenzuordnung erfolgte, abgesehen von der ersten Klasse mit einer Breite von 3 cm, in 10 cm Klassen. Die Tabelle 3-1 zeigt die Detektionsraten sowie deren Variation zwischen den Durchmesserklassen.

Tabelle 3-1 Auswertbare Detektionsrate mit gültigem BHD nach Durchmesserklassen getrennt

Durchmesserklasse (cm)	Untergrenze (cm)	Obergrenze (cm)	Anzahl Vollaufnahme	Anzahl Scan mit BHD	Detektionsrate
7-<10	7	10	27	0	0%
10-<20	10	20	104	28	27%
20-<30	20	30	59	43	73%
30-<40	30	40	70	59	84%
40-<50	40	50	59	38	64%
50-<60	50	60	7	3	43%
60-<70	60	70	1	0	0%

Die Detektionsrate unterschied sich deutlich zwischen den verschiedenen Durchmesserklassen. In der kleinsten Klasse wurde kein Baum mit gültigem BHD-Wert ausgewertet. In den folgenden Klassen stieg die Detektionsrate deutlich an und erreichte im Klassenbereich von 30 bis kleiner 40 ihre höchste Rate. Mit zunehmender Stärke nahm die Detektionsrate dann wieder ab.

3.2 Genauigkeit der BHD-Ableitungen

Wie bereits in der Einleitung beschrieben, wurden für die Beschreibung der Genauigkeit zu BHD-Abweichungen die statistischen Kennwerte Standardabweichung, Mittelwert, Median, RMSE genutzt.

Die Abweichung wurde dabei als Unterschied zwischen dem abgeleiteten Wert minus dem wahren Wert definiert. Als wahrer Wert gelten die Messwerte aus der Vollaufnahme, wohingegen der abgeleitete Wert, der durch 3DFin ermittelte BHD ist.

Bei n= 171 ergaben sich folgende Kennwerte in cm.

Tabelle 3-2 Statistische Kennwerte der BHD-Abweichungen

Maximum (cm)	Minimum (cm)	Median (cm)	Mittelwert (cm)	Standardabweichung (cm)	RMSE (cm)
24,170	-25,075	-0,714	-0,455	3,488	3,507

Die mittlere Abweichung lag mit dem oben gezeigten Wert nahe bei null. Der Median von -0,714 cm zeigt, dass ein überwiegender Teil der BHD-Abweichungen gering ausfiel. Der RMSE von 3,507 cm sowie ein Maximalwert von 24,170 cm weisen jedoch auf einzelne starke Abweichungen hin.

Der Vergleich der Referenz- und Scan-BHDs ist grafisch in einem Streudiagramm dargestellt (vgl. Abb. 3-1).

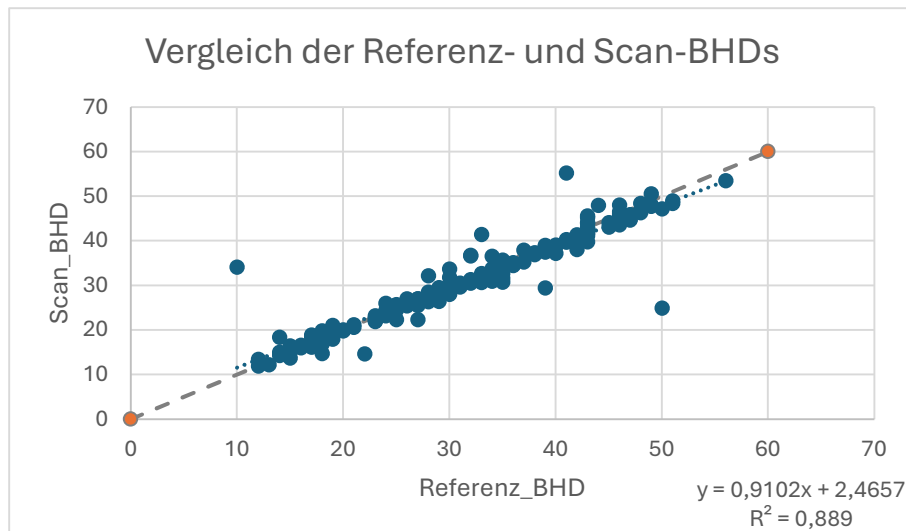


Abbildung 3-1 Vergleich der Referenz- und Scan-BHDs

Abb. 3-1 zeigt den Referenz-BHD auf der X-Achse und den Scan-BHD auf der Y-Achse. Die Punkte des Streudiagramms liegen zu einem großen Teil nahe der 1:1-Linie. Dies untermauert zudem erneut das Bestimmtheitsmaß von $R^2=0,889$. Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass zwischen den aufgenommenen BHD-Werten des Referenzdatensatzes und den abgeleiteten BHD-Werten durch den 3DFin-Algorithmus ein hoher linearer Zusammenhang besteht. Dies bedeutet, dass bei Detektion und ausreichender Punktdichte um den Stamm 3DFin in der Lage ist, den BHD gut abzuleiten. In dem Streudiagramm sind auch einzelne Ausreißer zu erkennen. Eine Fehlerverteilung wurde zusätzlich mithilfe eines Histogramms dargestellt.

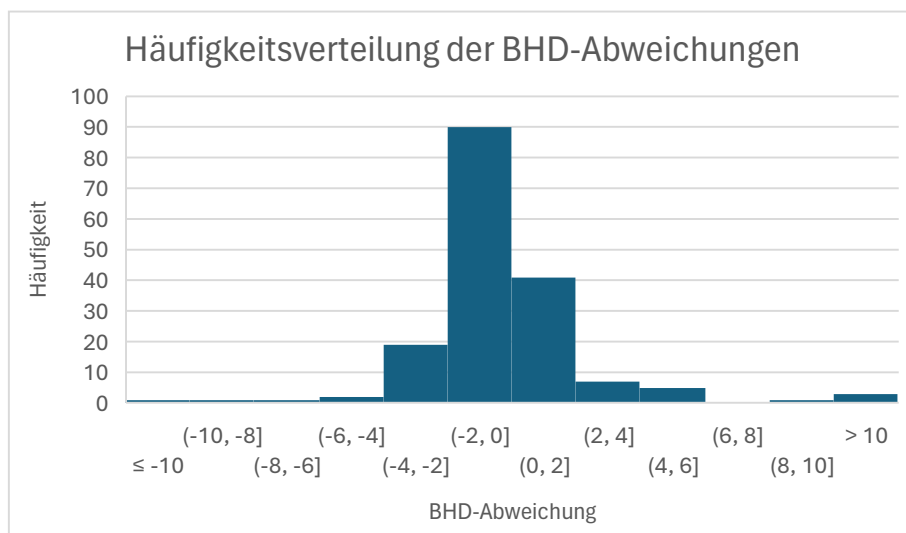


Abbildung 3-2 Häufigkeitsverteilung der BHD-Abweichungen

Das Histogramm zeigt eine Häufung von Fehlern im Bereich geringer Abweichungen. Zudem werden die einzelnen größeren positiven und auch negativen Abweichungen sichtbar gemacht, welche bereits auf dem Streudiagramm als Ausreißer aufgetreten sind. Dabei zeigen insbesondere die Bäume T45/2012, T153/3051 und T58/1007 diese Abweichungen. Die

einzelnen auffälligen Abweichungen wurden visuell in der Punktwolke betrachtet und kontrolliert.

3.3 Genauigkeit der Höhen-Ableitung

Ebenfalls in der Beschreibung zur Genauigkeit der Höhenableitung wurden die in der BHD-Genauigkeit verwendeten statistischen Kennwerte herangezogen.

Bei einem $n = 128$ ergaben sich dabei folgende Kennwerte in m.

Tabelle 3-3 Statistische Kennwerte der Höhen-Abweichungen

Maximum (m)	Minimum (m)	Median (m)	Mittelwert (m)	Standardabweichung (m)	RMSE (m)
22,733	-5,682	3,920	5,670	6,445	8,565

Das Streudiagramm zeigt die bereits durch die statistischen Kennwerte vermittelten Überschätzungen des Verfahrens.

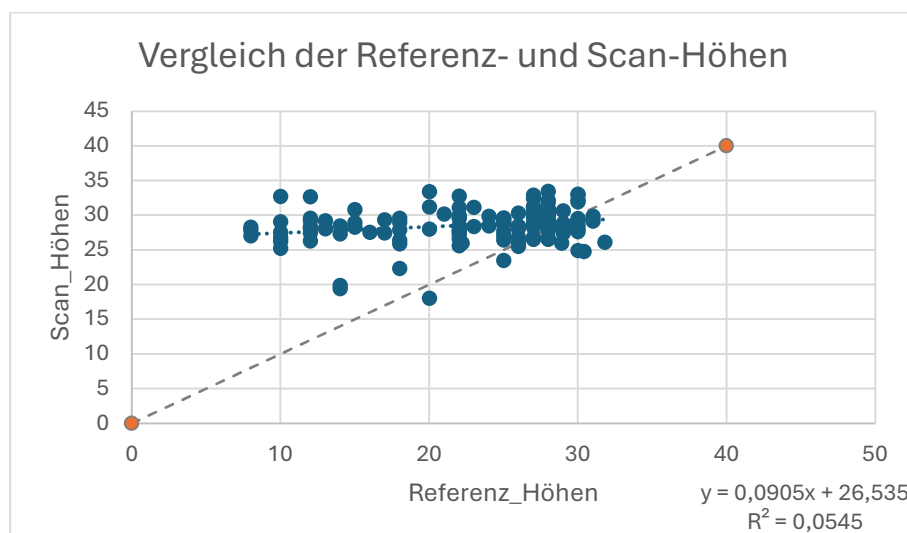


Abbildung 3-3 Vergleich der Referenz- und Scan-Höhen

Das Streudiagramm zeigt den Vergleich zwischen den Scan-Höhen auf der Y-Achse und den Referenzhöhen auf der X-Achse. Sichtbar wird dabei ein geringer linearer Zusammenhang zwischen den beiden Werten. Außerdem zeigt sich eine starke Streuung mit einer systematischen Überschätzung der Werte. Auch gut erkennbar ist in dem Diagramm, dass viele der Scan-Höhen in einem ähnlichen Wertebereich liegen.

Dies wird auch in der erstellten Fehlerverteilung deutlich.

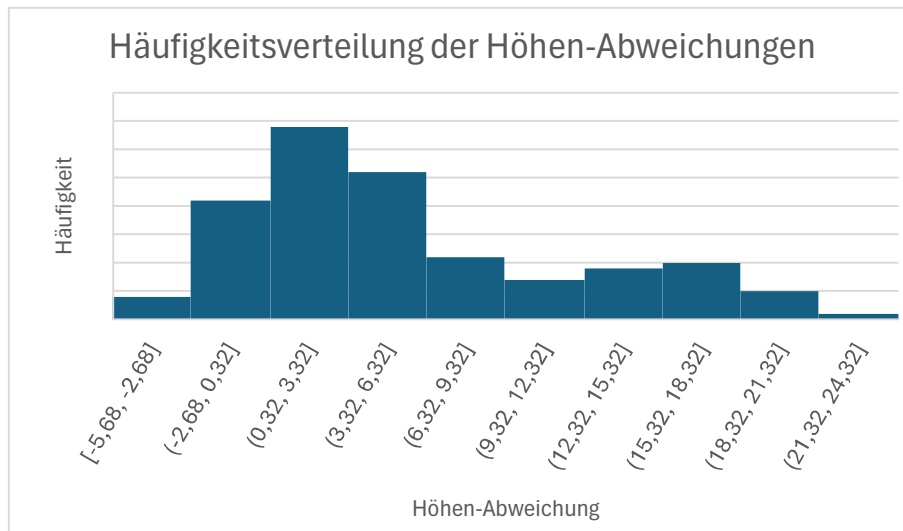


Abbildung 3-4 Häufigkeitsverteilung der Höhen-Abweichungen

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenabweichung zeigt die Streuung der Werte dabei deutlicher. Zudem werden durch die Verteilung der Fehler die positive Verschiebung der Abweichungen erkennbar. Viele der analysierten Abweichungen liegen in einem deutlichen Bereich über Null. Dies ist im Vergleich der BHD-Abweichungen gegensätzlich, welche zum großen Teil eine Konzentration um null zeigten.

3.4 Genauigkeit der Baumposition

3.4.1 Relative Positionsgenauigkeit anhand von Baumabständen

Das Ergebnis wird ebenfalls durch die statistischen Kennwerte repräsentiert. Von den ursprünglich 78 aufgenommenen Bäumen der Probekreise, wurde für $n = 71$ Bäume die Position verglichen. Die sieben nicht verglichenen Bäume wurden aufgrund der fehlenden X- und Y-Koordinaten aus den Berechnungen ausgeschlossen.

Die statistischen Kennwerte des Positionsvergleichs sehen dabei wie folgt aus:

Tabelle 3-4 Statistische Kennwerte der Abweichungen im relativen Positionsvergleich

Maximum (m)	Minimum (m)	Median (m)	Mittelwert (m)	Standardabweichung (m)	RMSE (m)
2,432	-0,851	-0,105	-0,095	0,357	0,367

In anderer Art wird der Zusammenhang der beiden Distanzen im Streudiagramm dargestellt.

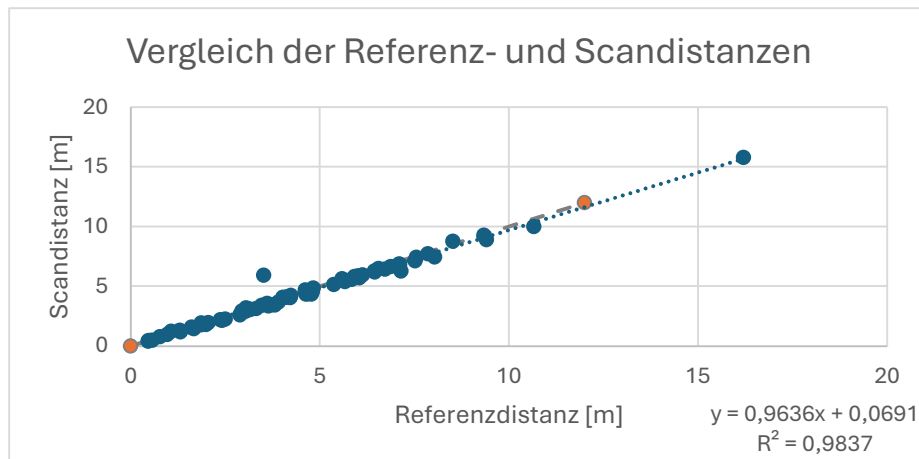


Abbildung 3-5 Vergleich der Referenz- und Scandistanzen aus den relativen Abweichungen zwischen nächstaufgenommenen Bäumen

Die beiden verglichenen Variablen der Scan-Distanzen auf der Y-Achse und den Referenz-Distanzen auf der X-Achse zeigen einen nahezu linearen Zusammenhang. Die Punkte liegen weitgehend nahe an der 1:1-Linie. Der hohe R^2 -Wert von 0,983 zeigt einen starken Zusammenhang zwischen den beiden Distanzen. Die relativen Positionen beziehungsweise Distanzen der Bäume wurden deutlich genauer abgebildet als die Höhen.

Die Häufigkeitsverteilung zeigt ebenfalls eine Konzentration der Distanzfehler im Bereich geringer negativer bis nahe der Null liegender Abweichungen.

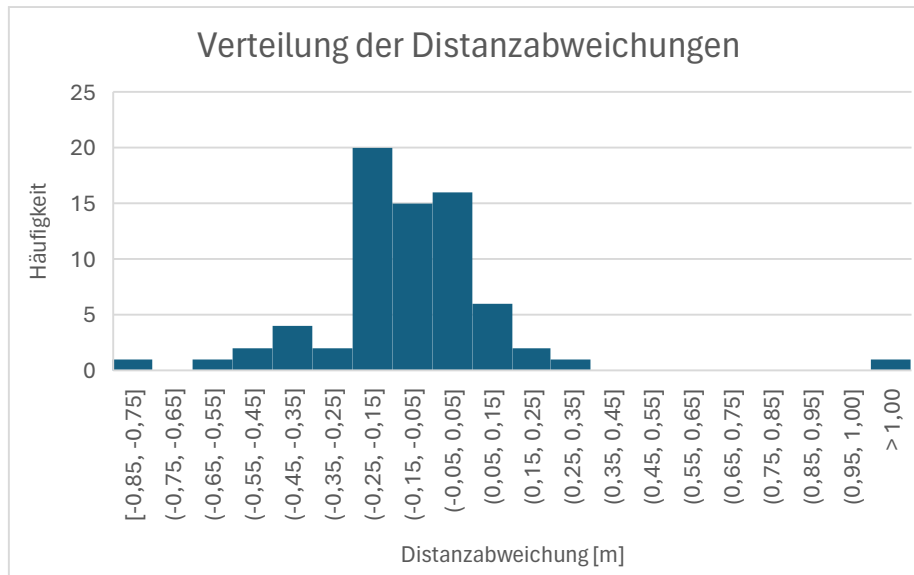


Abbildung 3-6 Häufigkeitsverteilung der Distanzabweichungen zwischen Referenz- und Scandistanzen

3.4.2 Baumindividueller Vergleich der absoluten Lageabweichung

Neben dem Vergleich der relativen Positionsgenauigkeit anhand von Baumabständen wurde ebenfalls ein Vergleich der absoluten Lage nach der Georeferenzierung durchgeführt.

Die statistischen Auswertungen konnten bei einem $n = 71$ eindeutig zugeordneten Bäumen erzielt werden (siehe Tab. 3-5).

Tabelle 3-5 Statistische Kennwerte zum baumindividuellen Vergleich der absoluten Lageabweichung

Maximum (m)	Minimum (m)	Median (m)	Mittelwert (m)	Standardabweichung (m)	RMSE (m)
3,153	0,02572	0,677	0,992	0,734	1,231

Da auch hier die Position mit den aufgenommenen Positionen der in den Probekreisen aufgenommenen Bäume verglichen wurde, können die statistischen Werte auch getrennt für diese dargestellt werden (siehe Tab. 3-6).

Tabelle 3-6 Kennwerte zum baumindividuellen Vergleich der absoluten Lageabweichung nach Probekreisen getrennt

Pk	n	Minimum (m)	Maximum (m)	Mittelwert (m)	Median (m)	RMSE (m)
1	17	0,026	0,676	0,358	0,373	0,402
2	18	0,285	0,977	0,606	0,583	0,642
3	14	1,805	2,469	2,114	2,107	2,121
4	12	0,961	3,153	1,505	1,410	1,602
5	10	0,221	0,897	0,581	0,582	0,606

In der Betrachtung der Probekreise liegen für den dritten und vierten Probekreis die Abweichungen deutlich höher als die der Probekreise eins, zwei und fünf. Besonders der Probekreis 3 zeigt mit einem Median von 2,11 m eine nahezu durchgängige erhöhte Positionsabweichung.

Grafisch lässt sich der Vergleich der Probekreise mithilfe von Boxplots besser vermitteln (Abb. 3-7).

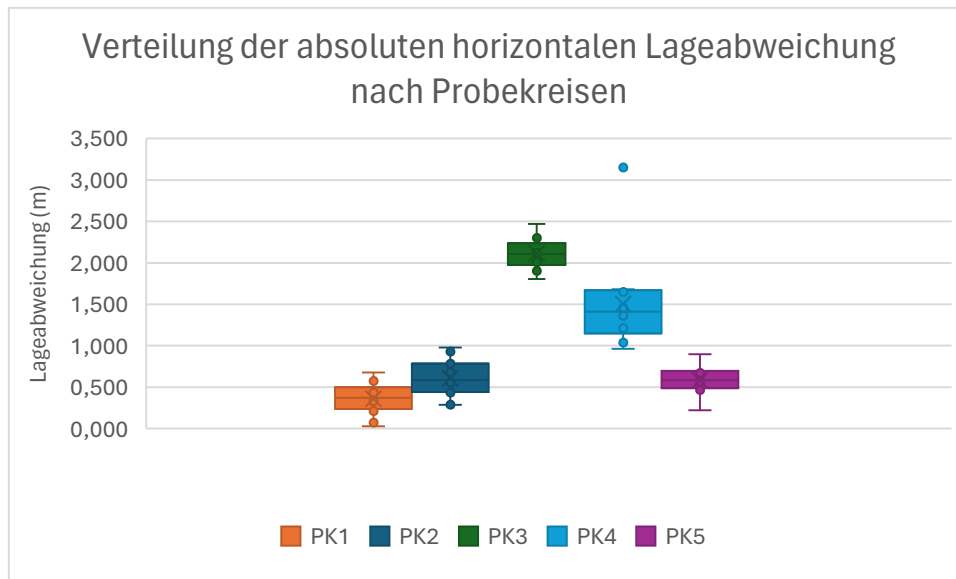


Abbildung 3-7 Boxplot der absoluten horizontalen Lageabweichung zwischen Referenz- und Scanpositionen getrennt nach Probekreisen

3.5 Vergleich der Ergebnisse

Im Vergleich der Ergebnisse lässt sich ein klarer Trend feststellen. Die Abweichungen der relativen Baumpositionen zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung. Ähnlich sieht es im Bereich der Analyse der BHD-Abweichungen aus. Hier konnten gute Übereinstimmungen zu den Referenz-BHDs erzielt werden, die lediglich durch einzelne Ausreißer geschmälert werden.

Geschmälert werden die Ergebnisse durch die deutlich geringere Genauigkeit der Höhenableitung gegenüber den aufgenommenen Referenzdaten, die zugleich auch von einer starken Streuung der Werte begleitet werden.

In dem Zusammenhang muss zudem die deutlich reduzierte Detektionsrate von nur 52,29 % erwähnt werden, welche nur für einen Teil der Bäume einen DBH zum Vergleich ableitbar machte.

4 Diskussion

Im Rahmen der vorliegenden Diskussion werden die erzielten Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit eingeordnet. Ziel der Arbeit war es, zu untersuchen, inwieweit MLS-Daten mithilfe des Algorithmus 3DFin zur Ableitung von Einzelbaumvariablen für die Anlage von Marteloskopflächen geeignet sind. Die Ergebnisse zeigen, dass der eingesetzte MLS- und Verarbeitungs-Workflow unter den vorliegenden Bedingungen grundsätzlich zur Ableitung von Einzelbaumvariablen eingesetzt werden kann. Die Aussagekraft hängt jedoch stark von der jeweiligen Zielgröße ab. Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Detektionsrate, zum BHD, zur Baumhöhe und zur Baumposition eingeordnet sowie hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Anlage von Marteloskopflächen bewertet.

Für Marteloskopflächen wird eine vollständige Erfassung des Baumkollektivs vorausgesetzt. Die erzielten Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen unter den beschriebenen Aufnahmeverfahren ein differenziertes Bild. Mit einer Gesamtdetektionsrate von 94 % konnte ein Großteil der in der Vollaufnahme erfassten Bäume wiedergefunden und zugeordnet werden. Die Detektionsrate der auswertbaren BHDs lag mit 52,29 % deutlich niedriger. Damit stand nur für rund die Hälfte der erfassten Referenzbäume ein eindeutig zuordbarer und somit gültiger BHD-Wert für die weiteren Analysen zur Verfügung.

Im Vergleich zu anderen Untersuchungen fällt die Detektionsrate der BHDs dieser Arbeit eher gering aus. Kuželka et al. (2022) zeigen, dass in einem strukturierten Bestand eine deutlich höhere Detektionsleistung mithilfe von mobilem Laserscanning erzielt werden konnte. Gleichzeitig zeigt diese Studie auch, dass eng stehende Bäume, kleine Bäume, die Scantrajektorie sowie Unterwuchs die Detektion beeinflussen. Damit sind Überschneidungen in den Einflussfaktoren aufgezeigt, welche auch in der vorliegenden Arbeit eine mögliche Ursache der geringen Detektionsrate sein könnten.

Besonders problematisch waren vor allem Randbereiche, Baumgruppen, Naturverjüngung sowie kleine Bäume. Das unterstützt die Ergebnisse aus der Berechnung der Detektionsraten nach den Durchmesserklassen. Insbesondere im niedrigen Durchmesserbereich zwischen 7 bis und kleiner 10 cm hat der Algorithmus unter den Aufnahmebedingungen Probleme, diese Bäume zu detektieren. Auch in der folgenden Durchmesserklasse von 10 bis kleiner 20 cm liegt die Detektionsrate mit 27 % deutlich niedriger als in den mittleren Durchmesserklassen. Gerade in Randbereichen kann es zu geringeren Überlappungen aus mehreren Scanrichtungen kommen. Dadurch werden Bäume teilweise nur einseitig erfasst und erfahren eine unvollständige Abbildung. Infolgedessen stehen dem Algorithmus dann weniger Stammquerschnitte zur Verfügung und es kann zu unvollständiger Ableitung des BHD-Wertes kommen beziehungsweise diese erschweren (Abb. 4-1).

Für eine Anlage von Marteloskopflächen ist diese Einschränkung wesentlich. Der Workflow konnte somit die Vollaufnahme unter den gegebenen Bedingungen nicht vollständig ersetzen. Die hohe Gesamtdetektion zeigt jedoch, dass der Workflow als unterstützendes Verfahren geeignet sein könnte, etwa zur räumlichen Darstellung oder zur Ableitung einzelner Variablen.

Die Ableitung der BHD-Werte aus MLS-Daten stellt in der vorliegenden Arbeit die zuverlässigste Einzelbaumvariable dar. Für Bäume, welche eindeutig detektiert und zugeordnet werden konnten, zeigte sich eine hohe Übereinstimmung zwischen Referenz- und Scanwerten. Die Ergebnisse der Arbeit stimmen dahingehend grundsätzlich mit bisher bekannten Studien überein. Auch in diesen wird der BHD als eine der zuverlässigsten ableitbaren Einzelbaumvariablen beschrieben (BAUWENS ET AL., 2016; CHEN ET AL., 2019).

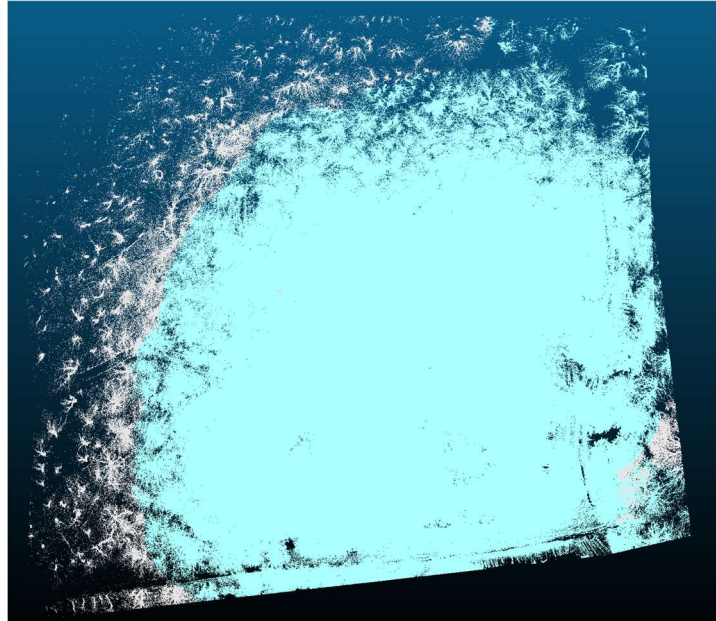


Abbildung 4-1 Beispielhafte Darstellung der 3DFin-Ausgabe beziehungsweise der verarbeiteten Punktwolke mit unvollständig ausgewerteten Randbereichen. Besonders im linken oberen Bereich sind fehlende bzw. nicht weiterverarbeitete Strukturen erkennbar

Die hohe Übereinstimmung der BHD-Werte bezieht sich ausschließlich auf die erfolgreich detektierten und gematchten Bäume. Für nicht erkannte Bäume oder Bäume, die nicht eindeutig zugeordnet werden konnten, kann keine Aussage getroffen werden. Damit zeigt sich die zentrale Bedeutung der Detektionsrate für die Bewertung des gesamten Workflows.

Bauwens et al. (2016) zeigten für handgeführte mobile Laserscanner nur geringe BHD-Abweichungen. Diese führten sie unter anderem auf die gute Erfassung der Stammquerschnitte auf Brusthöhe zurück. Auch Chen et al. (2019) und Kuželka et al. (2022) berichten von vergleichsweise geringen Fehlern bei der BHD-Schätzung von mobilen beziehungsweise persönlichen Laserscannern. Die Abweichungen der vorliegenden Arbeit fallen im Vergleich dazu höher aus, was auf die vorzufindenden Aufnahme- und Bestandesbedingungen sowie auf die gewählte Verarbeitung durch 3DFin zurückgeführt werden kann.

Die vorhandenen Ausreißer der BHD-Werte lassen sich nach einer visuellen Betrachtung überwiegend auf lokal auftretende Einschränkungen in der Qualität der Punktwolke erklären. Beim Baum T45 mit der Nummer 2012 war der Stammbereich auf Brusthöhe rauschig abgebildet, wodurch die Anpassung des Stammquerschnitts in seiner Stabilität eingeschränkt

gewesen sein dürfte. Auch der Baum T153 mit der Nummer 3051 zeigt eine stark rauschige Punktverteilung. Für den Baum T59 mit der Nummer 1007 war zusätzlich ein unvollständig erfasster Wurzelanlauf erkennbar. Das lag vermutlich an der Lage hinter einem flacheren Holzpolter und der daraus resultierenden Sichtbarkeit des Stammbereiches.

Die Ausreißer im BHD-Bereich weisen damit eher nicht auf eine grundsätzlich ungeeignete BHD-Ableitung hin, sondern eher auf die hohe Bedeutung einer vollständigen und störungsfreien Erfassung des Stammbereiches. Gleichzeitig zeigt der korrigierte Fall von Baum T79 bzw. Nummer 1014, dass auch Übertragungs- und Zuordnungsfehler eine Quelle von Unsicherheit darstellen können. Nach der Korrektur des Fehlers zeigte sich, dass der Algorithmus den Baum trotz eines gerissenen Zwiesels im Bereich des BHD-Bereichs plausibel abbilden konnte.

Insgesamt bestätigen die Ausreißer damit die vorherige Einordnung des BHDs als zuverlässigste Variable. Zugleich zeigt sich jedoch auch, dass die Zuverlässigkeit der Ableitung stark von der Qualität der Punktwolke, der möglichst vollständigen Abbildung des Stammquerschnitts sowie einer korrekten Datenübertragung abhängt.

Die Ableitung der Baumhöhen durch den Algorithmus zeigt deutlich größere Abweichungen als die Ableitung des BHDs. Wie in den Ergebnissen zu erkennen ist, wird eine überwiegend positive Abweichung sichtbar. Die durch 3DFin abgeleiteten Höhen überschätzen im Mittel die Referenzhöhen. Eine mögliche Ursache der Abweichung liegt in der bodengebundenen Aufnahme des mobilen Laserscanners. Während die Stammbereiche in Brusthöhe häufig aus mehreren Richtungen erfasst werden, nimmt die Punktdichte in oberen Kronenbereichen meist ab. Dies kann zu einer Unter- bzw. Überschätzung der Baumhöhe führen. Wie oben bereits erwähnt beschreibt Bauwens et al. (2016), dass MLS zuverlässige Ergebnisse für die Erfassung des BHD liefern kann, während eine Beschreibung oberer Kronenbereiche stärker von der Aufnahmekonfiguration abhängt.

Die vorhandene Struktur des Bestandes erschwerte die Höhenableitung zusätzlich. Der mehrschichtig aufgebaute Bestand mit teilweise dicht stehenden Buchen weist ineinandergreifende Kronen auf. Dadurch kann es in dem Workflow des Algorithmus zu fehlerhaften Zuordnungen von Kronenpunkten benachbarter Bäume kommen. Da 3DFin die Baumhöhe anhand der einem Baum zugeordneten Punkte ableitet, ist es möglich, dass solche Fehlzuordnungen zu einer Überschätzung von Baumhöhen führen. Gerade bei dichter Kronenüberlagerung, unterständigen Bäumen und eng stehenden Baumgruppen ist daher mit höheren Unsicherheiten zu rechnen.

Nach visueller Betrachtung der Punktwolke wurde dies überwiegend bestätigt. Die Höhenableitung liefert in Randbereichen, von freistehenderen Bäumen oder weniger stark überlagerten Bäumen in Einzelfällen teilweise plausible Ergebnisse. In Bereichen, in denen

Kronen stark ineinandergriffen und sich Kronenbereiche der einzelnen Bäume nur schwer voneinander abgrenzen ließen, traten Schwierigkeiten auf. Die angehängten Abbildungen 7-2 und 7-3 zeigen, dass grundsätzlich die Erfassung höherer Bereiche nicht das alleinige Problem sind. Die Abbildungen zeigen, dass der MLS grundsätzlich in der Lage ist, unbelaubte Kronen im Winterzustand auch in höheren Bereichen zu erfassen. Vor allem das Problem der eindeutigen Zuordnung der Kronenpunkte scheint problematisch zu sein. Diese Erfassung konnte die beschriebenen Probleme der Kronenüberlagerung dennoch nicht vollständig ausgleichen.

In der Interpretation der Ergebnisse zur Höhenabweichung sollte zudem berücksichtigt werden, dass auch die Referenzmessungen der Baumhöhen mit Unsicherheiten behaftet sein können. Auf diese methodische Grenze wird im späteren Verlauf vertiefend eingegangen.

Bei der Positionsauswertung ist zwischen der relativen und der absoluten Genauigkeit zu unterscheiden. Die relative Positionsgenauigkeit beschreibt die Untersuchung der Abweichung zwischen benachbarten Bäumen innerhalb eines Probekreises. Die absolute Lagegenauigkeit dahingegen wurde als Vergleich der georeferenzierten Baumpositionen aus Scan und Referenz der jeweiligen Bäume bewertet.

Die relative Struktur der Punktwolke weist dabei ein weitgehend plausibles Ergebnis auf. Vorhandene Abweichungen zwischen den Baumständen sind begrenzt, woraus sich ableiten lässt, dass die interne Geometrie der Punktwolke in den Probekreisen grundsätzlich erhalten geblieben ist. Beim baumindividuellen Vergleich mit Koordinaten, zeigen sich allerdings größere Abweichungen. Besonders in den Probekreisen drei und vier sind diese unerwartet hoch.

Die auftretende erhöhte Lageabweichung der beiden Probekreise konnte im Rahmen der Arbeit nicht abschließend geklärt werden. Die grafische Betrachtung der Fehlervektoren stellt jedoch dar, dass die Abweichungen im überwiegenden Teil gleichgerichtet auftreten (vgl. Abb. 4-2). Das lässt vermutlich weniger auf Einzelbaumfehler, sondern auf eine systematische Verschiebung oder Unsicherheit in der Georeferenzierung der Probekreise schließen. Auffällig ist, dass die Richtung der Abweichung zwischen Probekreis drei und vier variiert. Dies lässt vermutlich nicht auf eine einheitliche Verschiebung der gesamten Punktwolke schließen. Dadurch sind lokale Ungenauigkeiten möglich. Die insgesamt geringe Abweichung der relativen Positionsgenauigkeit spricht jedoch dafür, dass die interne Baumstruktur weitgehend erhalten blieb. Die Hauptunsicherheit liegt vor allem in der absoluten Lagegenauigkeit.

Dies verdeutlicht bereits anschaulich, dass eine gute relative Übereinstimmung nicht automatisch eine gute Georeferenzierung bedeutet. Ein wesentlicher Einflussfaktor ist hierbei die manuelle Georeferenzierung. Diese Methode beruht auf wenigen Bezugspunkten, was

dazu führt, dass sich bereits geringe Verschiebungen oder Drehungen unmittelbar auf die Koordinaten und somit die Abweichung auswirken. Auch lokale SLAM-bedingte Verzerrungen können Abweichungen bewirkt haben. Dies scheint aufgrund der geringen relativen Abweichung jedoch weniger wahrscheinlich. Dementsprechend kann festgehalten werden, dass die räumliche Darstellung des Bestandes zwar grundsätzlich möglich ist, allerdings die exakten Baumkoordinaten wie sie für die Einrichtung eines Marteloskopes erforderlich sind, nur eingeschränkt ableitbar sind.

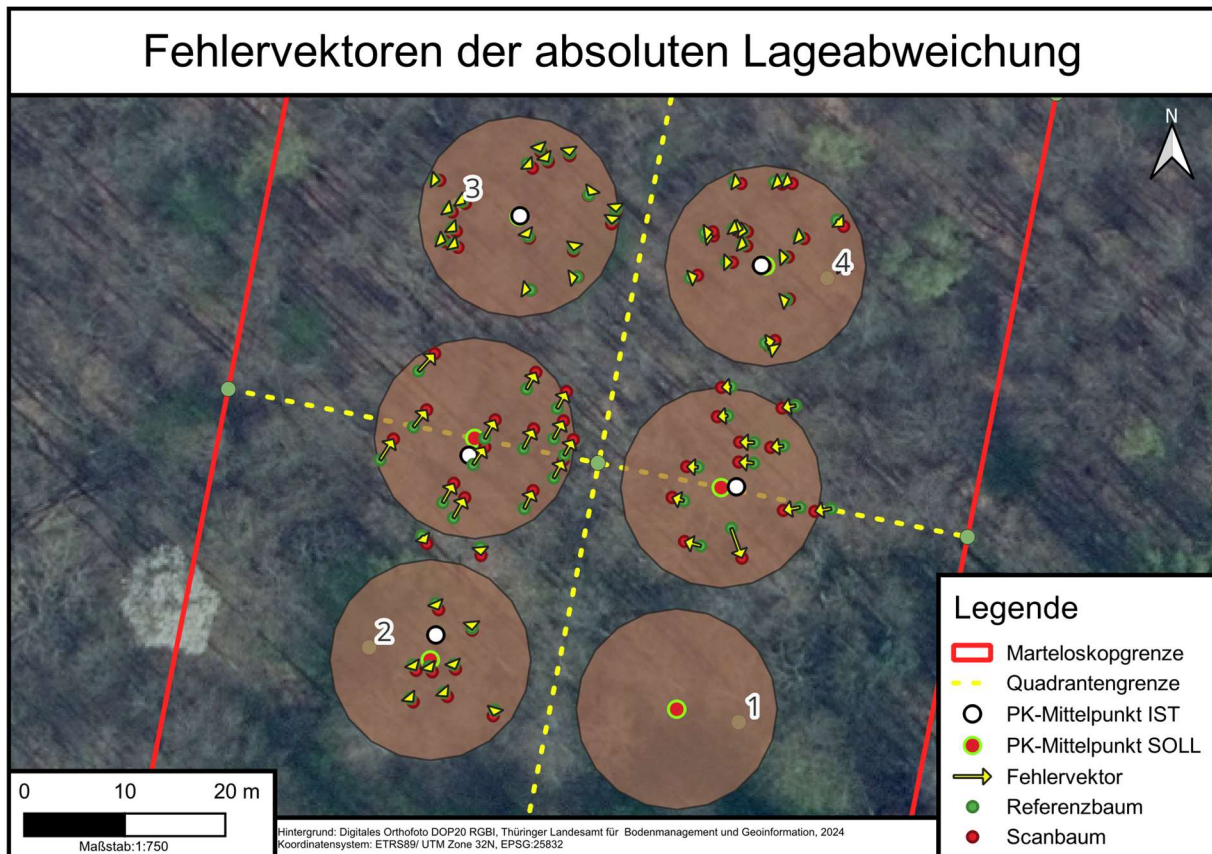


Abbildung 4-2 Fehlervektoren der absoluten Lageabweichung zwischen Referenz- und Scanposition innerhalb der Probekreise. Die Pfeile zeigen Richtung und Größe der Abweichung von der Referenzposition zur Scanposition.

Die Bestandesstruktur hatte einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Datenerhebung und Ableitung der Einzelbaumvariablen. Der untersuchte mehrschichtige Buchenbestand mit teilweise ineinandergreifenden Kronen stellt keine idealen Bedingungen für die automatisierte Einzelbaumerfassung dar. Diese Struktur erschwerte sowohl die Aufnahme der Referenzdaten als auch die Erfassung durch den Laserscanner und anschließende Ableitung durch 3DFin.

Insbesondere die Naturverjüngung, eng stehenden Baumgruppen und teilweise verdeckte Stammabschnitte können die Detektion und die Punktdichte einzelner Bäume beeinflusst haben. Gleichzeitig konnte auch festgestellt werden, dass Naturverjüngung in der vorliegenden Arbeit nicht grundsätzlich die Detektion von darinstehenden Bäumen verhinderte. Diese führte vielmehr teilweise zu einer Detektion zusätzlicher Objekte, die nicht Teil der eigentlichen Auswertung waren.

Die Topografie des Bestandes kam als weiterer erschwerender Faktor hinzu. Durch das geneigte Gelände sowie kleinräumige Geländeformen kann es zu Unterschieden in der Punktdichte und damit auch der Detektion kommen. Gerade in Bereichen mit stärkeren kuhlenartigen Senken kann die Sichtbarkeit einzelner Stammbereiche eingeschränkt gewesen sein. Dies tritt insbesondere in den höheren Randbereichen der Fläche auf. Dadurch könnte die Qualität der Punktwolke als auch die spätere Ableitung der Einzelbaumvariablen beeinflusst worden sein.

Neben den natürlichen Gegebenheiten der Fläche erschwerten zusätzlich einzelne Holzpolter infolge der vorangegangenen Holzeinschläge die Aufnahmebedingungen. Diese stellten vermutlich keinen ausschlaggebenden Einflussfaktor auf das Gesamtergebnis dar, waren jedoch lokal als Störstruktur relevant. Positiv zu bewerten ist, dass die Aufnahmen im unbelaubten Zustand unter winterlichen Bedingungen durchgeführt wurden. Dadurch war die Durchdringung des Bestandes durch den Laser gegenüber belaubten Bedingungen begünstigt. Dies zeigte sich dadurch, dass in der Punktwolke auch höhere Kronenbereiche teilweise erfasst wurden (vgl. Abb. 7-2, 7-3). Als vollständige Kompensation der Einschränkungen dienten die günstigen Aufnahmebedingungen jedoch nicht.

Die Ergebnisse der Arbeit sind zudem unter Berücksichtigung verschiedener methodischer Grenzen zu interpretieren. Zentral ist dabei, dass die Untersuchung lediglich anhand eines einzelnen Bestandes durchgeführt wurde. Die Ergebnisse erlauben daher keine allgemein anwendbaren Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Ableitung von Einzelbaumvariablen durch 3DFin aus MLS-Aufnahmen. Die Aussagen beziehen sich auf den untersuchten Bestand, die Aufnahmekonfiguration und den gewählten Workflow.

Eine weitere methodische Unsicherheit ergibt sich aus den Referenzdaten. Diese sind ebenfalls mit einer Unsicherheit behaftet, auch wenn diese als Vergleichsgrundlage dienten. Sowohl bei der Aufnahme des BHD als auch der Baumhöhe und der Baumposition können Messabweichungen durch die aufnehmenden Personen, die eingesetzten Messgeräte oder durch Übertragungs- und Zuordnungsfehler entstanden sein. Durch Plausibilitätsprüfungen und visuelle Kontrolle wurde versucht, solche Fehler möglichst zu vermeiden. Vollständig ausschließen lassen sie sich jedoch nicht.

Gerade die Baumhöhenmessung ist in dichten Laubholzbeständen mit Unsicherheiten verbunden. Die eindeutige Ansprache der Baumspitze und des Stammfußes können durch Überlagerungen und eingeschränkte Sicht erschwert werden. Auch die Positionsdaten der Referenzaufnahmen können mit Unsicherheiten behaftet sein. GNSS-Aufnahmen können trotz vorhandener FIX-Lösungen Lageabweichungen aufweisen. Da sich solche Lageabweichungen direkt auf den Vergleich zwischen georeferenzierten Scan- und Referenzposition der Bäume auswirken, betreffen diese Unsicherheit die Bewertung der

absoluten Lagegenauigkeit. Die relative Positionsauswertung bleibt von der Georeferenzierung unabhängig. Diese kann jedoch von Fehlern bei der Probekreisaufnahme, insbesondere also bei der Aufnahme von Distanz und Azimut sowie der Baumzuordnung betroffen sein.

Eine weitere relevante Grenze der Methodik stellt die Georeferenzierung der Punktwolkendaten dar. Die ursprünglich angedachte Georeferenzierung über im Bestand ausgebrachte Targets konnte nicht wie geplant umgesetzt werden. Um dennoch einen räumlichen Bezug herzustellen, musste auf eine alternative manuelle Vorgehensweise zurückgegriffen werden. Diese Methode ermöglichte zwar eine räumliche Zuordnung der Scandaten, kann jedoch zu Unsicherheiten in der absoluten Lage geführt haben. Die Unterschiede zwischen der relativen und absoluten Genauigkeit deuten darauf hin, dass die interne räumliche Struktur der Punktwolke teilweise plausibel abgebildet wurde, die Lage im Koordinatensystem jedoch eine wesentliche Unsicherheitsquelle darstellt.

Auch die Einstellungen der Verarbeitung durch 3DFin beeinflussen die Ergebnisse. Die Auswertung erfolgte mit dem beschriebenen Workflow und gewählten Parametern. Die Einstellungen wie Höhenbereich zur Stammidentifikation oder die Pruning Intensity können wesentlich beeinflussen, welche Stammstrukturen erkannt werden und wie stark störende Strukturen bereinigt werden. Die gewählten Parameter wurden aufgrund des bisherigen Wissensstands und der Einschätzung des Bestandes gewählt. Da in dem Rahmen dieser Arbeit allerdings kein systematischer Vergleich unterschiedlicher Parametereinstellungen durchgeführt wurde, kann nicht abschließend beurteilt werden, ob alternative Einstellungen zu einem besseren Ergebnis geführt hätten. Besonders bei stark strukturierten Beständen mit tiefen Kronenansätzen und ineinandergreifenden Kronen könnte eine Anpassung der Parameter sinnvoll sein. Gleichzeitig muss berücksichtigt werden, dass eine stärkere Bereinigung nicht zwingend zu besseren Ergebnissen führen muss, da auch relevante Baumstrukturen durch die Verarbeitung beeinflusst werden können.

Abschließend ist das Matching von Referenz- und Scandaten als methodische Grenze zu nennen. Die Genauigkeitsanalysen konnten nur auf Bäume bezogen werden, die eindeutig zwischen den beiden Datensätzen zugeordnet werden konnten. Auch wenn nach mehrfacher visueller Betrachtung keine Fehler aufgefunden werden konnten, beziehen sich die Genauigkeitskennwerte ausschließlich auf den erfolgreich detektierten und gematchten Teil der Bäume und nicht auf den gesamten Bestand.

Insgesamt zeigt sich durch die Ergebnisse, dass nicht die reine Wiederauffindbarkeit von Bäumen das alleinige begrenzende Element darstellt. Die BHD-Ableitung ist bei detektierten Bäumen und eindeutig zugeordneten Bäumen nutzbar. Sie bleibt jedoch abhängig von der Qualität der Punktwolke, Stammabdeckung und korrekter Zuordnung. Die Höhe ist allgemein

abseits der methodischen Probleme nur in einem eingeschränkten Maße ableitbar. Gleiches gilt für die absolute Baumposition. Die Georeferenzierung ist dabei der hervortretende begrenzende Faktor. Auch die Ableitung weiterer für Marteloskope relevanter Variablen, welche nicht untersucht wurden, wie Baumart, Qualität und ID-Zuordnung müssten in weiterführenden Untersuchungen geprüft werden.

Daher kann festgehalten werden, dass das MLS-Verfahren beziehungsweise die Ableitung durch 3DFin für Bestände ähnlicher Art nicht als alleinige Methode ausreichend ist. Eine terrestrische Kontrolle bleibt zum jetzigen Stand weiterhin notwendig.

Die Forschungsfragen lassen sich auf Grundlage der Ergebnisse zusammenfassend beantworten. Die erste Forschungsfrage bezog sich auf die Genauigkeit der Erfassung von Einzelbaumvariablen. Betrachtet wurden dafür Baumposition, BHD und Baumhöhe mittels MLS aufgenommen im Vergleich zu direkten Messungen. Der BHD zeigt dabei, dass dieser bei erfolgreich erkannten und zugeordneten Bäumen zuverlässig abgeleitet werden konnte. Die Baumhöhe war hingegen deutlich unsicherer und wurde im Mittel überschätzt. Bei den Baumpositionen war die relative Struktur innerhalb der Punktwolke weitgehend plausibel, während die absolute Lagegenauigkeit durch die Georeferenzierung eingeschränkt war.

Die zweite Forschungsfrage betraf Faktoren, welche Einfluss auf die Genauigkeit der Erfassung nehmen. Wesentliche Faktoren zeigten sich in der Bestandesstruktur, insbesondere in eng stehenden Baumgruppen, Naturverjüngung, Kronenüberlagerung, Randbereiche sowie Hanglage und lokale Geländeformen. Zusätzlich beeinflussen noch methodische Faktoren die Genauigkeit. Darunter fallen Punktdichte, Scantrajektorie, Georeferenzierung, Referenzdaten und Matching, die die Qualität des Ergebnisses beeinflussen. Die Genauigkeit hängt daher nicht allein von dem Laserscanner oder dem gewählten Algorithmus ab, sie entsteht aus dem Zusammenspiel von Bestand, Aufnahmebedingungen und Datenverarbeitung.

Die dritte Forschungsfrage bezog sich auf die technisch-methodischen Rahmenbedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass für eine zuverlässige Ableitung eine ausreichende Scanabdeckung aus mehreren Richtungen und die damit einhergehende Planung der Scantrajektorie notwendig sind. Zudem ist eine stabile Georeferenzierung wie auch die dafür nötigen gut erkennbaren Bezugspunkte essenzielle Bestandteile, die die weitere Verarbeitung erheblich erleichtern kann. Die sorgfältige Normalisierung und Verarbeitung der Punktwolke tragen ebenso zum Erlangen eines zufriedenstellenden Ergebnisses bei. Zusätzlich sollte auch immer eine Kontrolle der 3DFin-Parameter und eine anschließende Plausibilitätsprüfung der Einzelbaumdaten durchgeführt werden, da diese weiterhin erforderlich bleiben. Unter schwierigen Bestandesbedingungen kann das MLS die terrestrische Aufnahme daher wie bereits festgestellt nicht vollständig ersetzen, aber sinnvoll ergänzen.

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit lassen sich sowohl praktische als auch methodische Implikationen für die zukünftige Einrichtung von Marteloskopflächen ableiten. Der angewendete Workflow aus den MLS-Aufnahmen, Punktwolkenverarbeitung und Ableitung von Einzelbaumvariablen kann die Anlage von Marteloskopen unterstützen. Die klassische Vollaufnahme kann unter den vorliegenden Bedingungen jedoch nicht vollständig ersetzt werden. Es bestehen weiterhin Einschränkungen bei der Vollständigkeit der auswertbaren Daten, der Höhenableitung und der absoluten Lagegenauigkeit.

Für zukünftige Anwendungen zeigt sich vor allem, dass die Planung der Aufnahme eine zentrale Rolle im Aufnahmeprozess einnimmt. Dazu gehören gut erkennbare und ausreichend große Targets für die Georeferenzierung, eine geeignete, an die Fläche angepasste Scantrajektorie mit möglichst hoher Stammabdeckung aus mehreren Richtungen. Durch die Berücksichtigung dieser Aspekte kann der Workflow stabiler gestaltet und die Weiterverarbeitung der Punktwolke verbessert werden.

Weitere Untersuchungen könnten an die Ergebnisse der Arbeit anknüpfen. Sie könnten verschiedene Bestände und Bestandesstrukturen mit vergleichbaren oder angepassten Workflows untersuchen. Ein zusätzlicher Vergleich unterschiedlicher Aufnahmeverfahren wäre sinnvoll. Dabei könnte unter anderem eine Kombination aus MLS- und ULS-Daten untersucht werden, um eine Verbesserung der Höhenableitung zu erreichen. Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwiefern weitere für Marteloskope relevanten Variablen abgeleitet werden könnten. Dazu zählen vor allem die Baumart, die Stammqualität sowie Habitat- oder Biotopmerkmale.

5 Zusammenfassung

Ziel in dieser Arbeit war es, zu prüfen, ob MLS-Verfahren zur Einrichtung von Marteloskopflächen in einem Rotbuchenbestand im Südharz geeignet sind. Dazu wurde ein Vergleich von MLS-Daten mit manuell erhobenen Referenzdaten durchgeführt. Die Betrachtung lag auf den Einzelbaumvariablen BHD, Baumhöhe, Baumposition und Detektionsrate.

Hierfür wurde die Untersuchungsfläche manuell aufgenommen. Anschließend erfolgte die Erfassung der Fläche unter Verwendung des MLS GeoSLAM ZEB Horizon RT der Firma FARO. Die erhobenen MLS-Daten wurden mithilfe von Software wie CloudCompare, LAStools, 3DFin, QGIS und Excel verarbeitet und ausgewertet.

In der Vollaufnahme der Fläche wurden 327 Bäume mit einem BHD oberhalb der Derbholzgrenze erfasst. Detektiert wurden eine Anzahl von 171 Bäumen mit BHD-Wert. Dies entspricht einer auswertbaren BHD-Detektionsrate von 52,29 %. Dabei zeigt die Ableitung des BHD in der Auswertung gute Übereinstimmungen mit den Referenzwerten. Verdeutlicht wird dies durch einen RMSE von 3,507 cm und einem R^2 von ca. 0,889. Die Baumhöhe konnte dagegen deutlich weniger zuverlässig abgeleitet werden. Diese Scanwerte zeigen eine systematische Überschätzung und wiesen einen RMSE von 8,565 m auf.

Die Positionsgenauigkeit wurde in zwei verschiedenen Varianten untersucht. Der Vergleich der relativen Abweichung von nacheinander aufgenommenen Bäumen zeigte sehr gute Ergebnisse. Damit weist die Punktwolke eine hohe innere Lagegenauigkeit auf. Die absolute Lagegenauigkeit war hingegen nur eingeschränkt bewertbar. Dies zeigt sich unter anderem durch einen Median der horizontalen Lageabweichung von 0,677 m mit einem RMSE von 1,231 m.

Die Ableitung des BHDs bei detektierten Bäumen funktioniert am zuverlässigsten und ist grundsätzlich verwertbar. Die Höhenableitung erwies sich unter den untersuchten Bedingungen als problematisch und ist für die Einrichtung eines Marteloskopes stark eingeschränkt nutzbar. Probleme zeigten sich insbesondere in der Detektion von durchmesserschwachen Bäumen, Randbäumen sowie dicht stehenden Bäumen. Die Probleme sind vor allem auf die strukturreiche Ausprägung des Bestandes zurückzuführen.

Die absolute Position hingegen wurde in dieser Arbeit stark durch das methodische Vorgehen beeinflusst und kann daher nicht abschließend bewertet werden. Dennoch konnten einzelne Abweichungen durch Auftreten von SLAM beziehungsweise Driftfehlern identifiziert werden. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass MLS zur Aufnahme solcher strukturstarker Bestände durchaus in der Einrichtung von Marteloskopflächen unterstützend wirken kann. Ein vollständiger Ersatz der manuellen Aufnahme ist unter den untersuchten Bedingungen nicht ohne weiteres möglich.

6 Literaturverzeichnis

ALBERTZ, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft

BALESTRA, M., TONELLI, E., LIZZI, L., PIERDICCA, R., URBINATI, C., VITALI, A. (2025): A Digital Replica of a Marteloscope: A Technical and Educational Tool for Smart Forestry Management. https://www.researchgate.net/publication/391744010_A_Digital_Replica_of_a_Marteloscope_A_Technical_and_Educational_Tool_for_Smart_Forestry_Management. Zugriff: 20.05.2026

BAUWENS, S., BARTHOLOMEUS, H., CALDERS, K., LEJEUNE, P. (2016): Forest Inventory with Terrestrial LiDAR: A Comparison of Static and Hand-Held Mobile Laser Scanning. <https://www.mdpi.com/1999-4907/7/6/127> Zugriff: 21.04.2026

BUNDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT UND ERNÄHRUNG (2026): Wuchsgebiete und Wuchsbezirke. <https://fgrdeu.genres.de/nationales-inventar/wuchsbezirke>, Zugriff: 27.04.2026

CABO, C., LAÍÑO REBOLLIDO, D., PRENDES, C., SANTÍN, C., DOERR, S., ORDÓÑEZ, C., NIKONOVAS, T. (2023): 3DFin: 3D Forest Inventory – Dokumentation Version date: 05 May 2023. Centre of Wildfire Research of Swansea University, UK, 29

CĂTEANU, M., MOROIANU, M. A. (2024): Performance Evaluation of Real-Time Kinematic Global Navigation Satellite System with Survey-Grade Receivers and Short Observation Times in Forested Areas.

https://www.researchgate.net/publication/384564156_Performance_Evaluation_of_Real-Time_Kinematic_Global_Navigation_Satellite_System_with_Survey-Grade_Receivers_and_Short_Observation_Times_in_Forested_Areas. Zugriff: 15.05.2026

CHEN, S., LIU, H., FENG, Z., SHEN, C. (2019): Applicability of personal laser scanning in forestry inventory.

https://www.researchgate.net/publication/331389645_Applicability_of_personal_laser_scanning_in_forestry_inventory. Zugriff: 29.04.2026

CLIMATE DATA (2022): Klima Nordhausen (Deutschland) – Daten und Graphen zum Klima und Wetter in Nordhausen. <https://de.climate-data.org/europa/deutschland/thueringen/nordhausen-22792/#climate-table>. Zugriff: 11.05.2026

CLOUDCOMPARE (2026): Presentation – CloudCompare 3D point cloud and mesh processing software Open-Source Projekt. <https://www.cloudcompare.org/>, Zugriff: 31.03.2026

- DEUTSCHER FORSTWIRTSCHAFTSRAT E.V. (DFWR), DEUTSCHER HOLZWIRTSCHAFTSRAT E.V. (DHWR) (2024): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR). 6., aktualisierte Auflage, Stand: 16. Dezember. https://rvr-deutschland.de/wp-content/uploads/2024/12/RVR_Gesamtdokument_6._aktualisierte_Auflage_2024.12.16.pdf Zugriff: 08.05.2026
- DURRANT-WHYTE, H., BAILEY, T., (2006): Simultaneous localization and mapping: Part I. In IEEE Robotics & Automation Magazine, vol 13, no. 2, pp. 99-110. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1638022> Zugriff: 15.05.2026
- EMLID TECH (2026): Emlid Reach RS3. <https://emlid.com/reachrs3/>, Zugriff: 15.05.2026
- ESTER, M., KRIEGEL, H.-P., SANDER, J., XU, X. (1996): A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. <https://dl.acm.org/doi/10.5555/3001460.3001507>. Zugriff: 20.05.2026
- EUROPEAN FOREST INSTITUTE (o.J.): Marteloscopes and Data. <http://iplus.efi.int/marteloscopes-data.html>. Zugriff: 11.05.2026
- FARO (2025): Faro Connect Software- Die ultimative Software für die Verwaltung von 3D-Punktwolken- und Bilddaten, <https://www.faro.com/de-DE/Products/Software/FARO-Connect-Software>, Zugriff: 15.05.2026
- FARO (2026): GeoSLAM ZEB Horizon RT Mobile Scanner – A versatile tool to capture, process and understand the world around you – with real-time feedback. <https://www.faro.com/en/Products/Hardware/GeoSLAM-ZEB-Horizon-RT>, Zugriff: 15.05.2026
- FLUCHS, S., FRITSCH, M., SCHLEICHER, C., BENITA, Z., (2022): Ökonomische Betrachtung des Waldes – Die Bedeutung deutscher Wälder für den Klimawandel. https://www.iwkoeln.de/fileadmin/user_upload/Studien/Gutachten/PDF/2022/IW-Gutachten_2022-O%CC%88konomische-Betrachtung-des-Waldes.pdf, Zugriff: 25.04.2026
- GONÇALVES, A. C. (2020): Thinning: An Overview. https://www.researchgate.net/publication/343887455_Thinning_An_Overview Zugriff: 05.05.2026
- JOA, B., PAULUS, A., MIKOLEIT, R., WINKEL, G. (2020): Decision – making in tree selection – Contemplating conflicting goals via Marteloscope exercises. https://www.researchgate.net/publication/342752682_Decision_Making_in_Tree_Selection_-_Contemplating_Conflicting_Goals_via_Marteloscope_Exercises. Zugriff: 09.05.2026
- KRAMER, H., AKÇA, A. (2008): Leitfaden zur Waldmesslehre, 5. Überarbeitete Auflage, Frankfurt am Main, Deutschland: J.D. Sauerländer's Verlag
- KUŽELKA, K., MARUŠÁK, R., SUROVY, P. (2022): Inventory of close-to-nature forest stands using terrestrial mobile laser scanning.

https://www.researchgate.net/publication/365516185_Inventory_of_close-to-nature_forest_stands_using_terrestrial_mobile_laser_scanning. Zugriff: 29.04.2026

LAÍÑO REBOLLIDO, D., CABO, C., PRENDES PÉREZ, C., JANVIER, R., ORDÓÑEZ, C., NIKONOVAS, T., DOERR, S., SANTÍN, C. (2024): 3DFin: a software for automated 3D forest inventories from terrestrial point Clouds. https://www.researchgate.net/publication/380827112_3DFin_a_software_for_automated_3D_forest_inventories_from_terrestrial_point_clouds/citation/download Zugriff: 29.04.2026

LANDESFORST MECKLENBURG-VORPOMMERN (o.J.): Waldwissen - Die Aufgaben des Waldes. <https://www.wald-mv.de/waldwissen/aufgaben-des-waldes/>, Zugriff: 25.04.2026

LASER TECH (2026): Trupulse 360 – Next-Generation Version of the Trupulse 360° und 360°R. <https://lasertech.com/product/trupulse-360i/>, Zugriff: 15.05.2026

MARXACT (2024): Was ist der Unterschied zwischen RTK, FIX und RTK Float? <https://de.support.marxact.com/article/85-what-is-the-difference-between-rtk-fix-and-rtk-float> Zugriff: 08.05.2026

MICROSOFT 365 (2026): Microsoft 365. <https://www.office.com/> Zugriff: 15.05.2026

NELSON, R., (2013): How did we get here? An early history of forestry lidar. (PDF) How did we get here? An early history of forestry lidar 1, Zugriff: 28.04.2026

PETIT, F. (2020): The History of LiDAR: A Journey Through Time. <https://www.blickfeld.com/blog/history-of-lidar/>, Zugriff: 25.04.2026

QFIELD (o.J.): QField - Efficient field work built for QGIS. <https://qfield.org/>, Zugriff: 15.05.2026

QGIS (o.J.): Spatial without Compromise – Spatial visualization and decision-making tools for everyone. <https://qgis.org/>, Zugriff: 15.05.2026

RAATZ, J., (2026): persönlich schriftliche Mitteilung zum Bestandesalter der Untersuchungsfläche. WhatsApp-Nachricht vom 04.06.2026

RAPIDLASSO GMBH (2026): LAsTools Software Suite. <https://rapidlasso.de/product-overview/> Zugriff: 20.05.2026

RYDING, J., WILLIAMS, E., SMITH, M. J., EICHHORN, M. P. (2015): Assessing Handheld Mobile Laser Scanners for Forest Surveys. Remote Sensing, 7, 1095-1111 https://www.researchgate.net/publication/271073431_Assessing_Handheld_Mobile_Laser_Scanners_for_Forest_Surveys Zugriff: 04.05.2026

SCHUCK, A., KRAUS, D., KRUMM, F., SCHMITT, H. (2015): Integrate+ Marteloscopes - Calibrating silvicultural decision making. Integrate+ Technical Paper No 1. 12 p. https://www.researchgate.net/publication/312474755_Integrate_Marteloscopes_-_Calibrating_silvicultural_decision_making Zugriff: 14.05.2026

5g-1781266981-1.0.1.1-maZp7.h_fKXMtMW5GbrvpnMpAK.RoFEdeV6jJGFiSkM, Zugriff:
15.05.2026

ZHANG, W., QI, J., WAN, P., WANG, H., XIE, D., WANG, X., YAN, G. (2016): An Easy-to-Use
Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation.
[https://www.researchgate.net/publication/303975654_An_Easy-to-
Use_Airborne_LiDAR_Data_Filtering_Method_Based_on_Cloth_Simulation](https://www.researchgate.net/publication/303975654_An_Easy-to-Use_Airborne_LiDAR_Data_Filtering_Method_Based_on_Cloth_Simulation).
Zugriff: 25.05.2026

7 Anhang

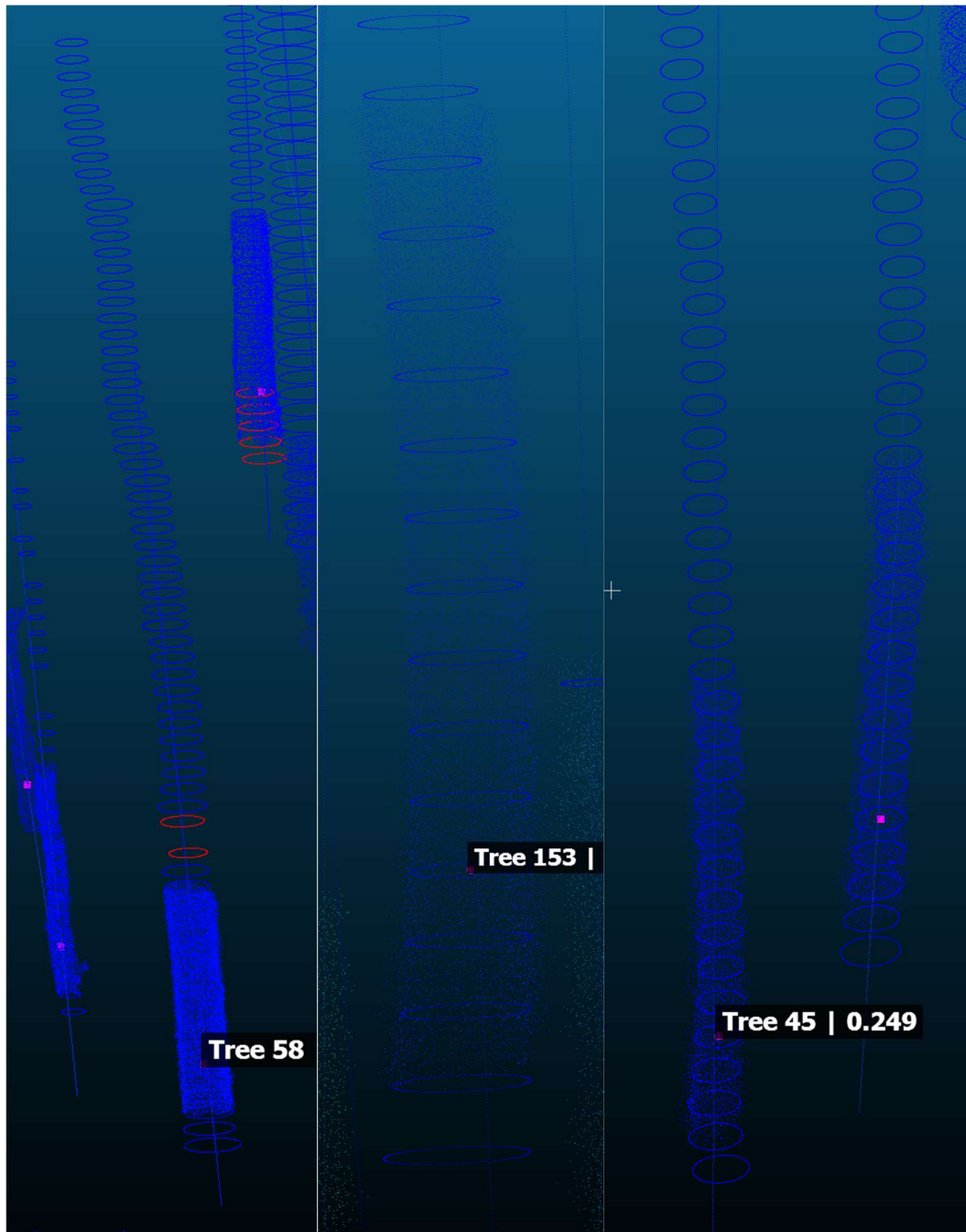


Abbildung 7-1 Darstellung der BHD-Ausreißer der durch 3DFin dargestellten Bäume

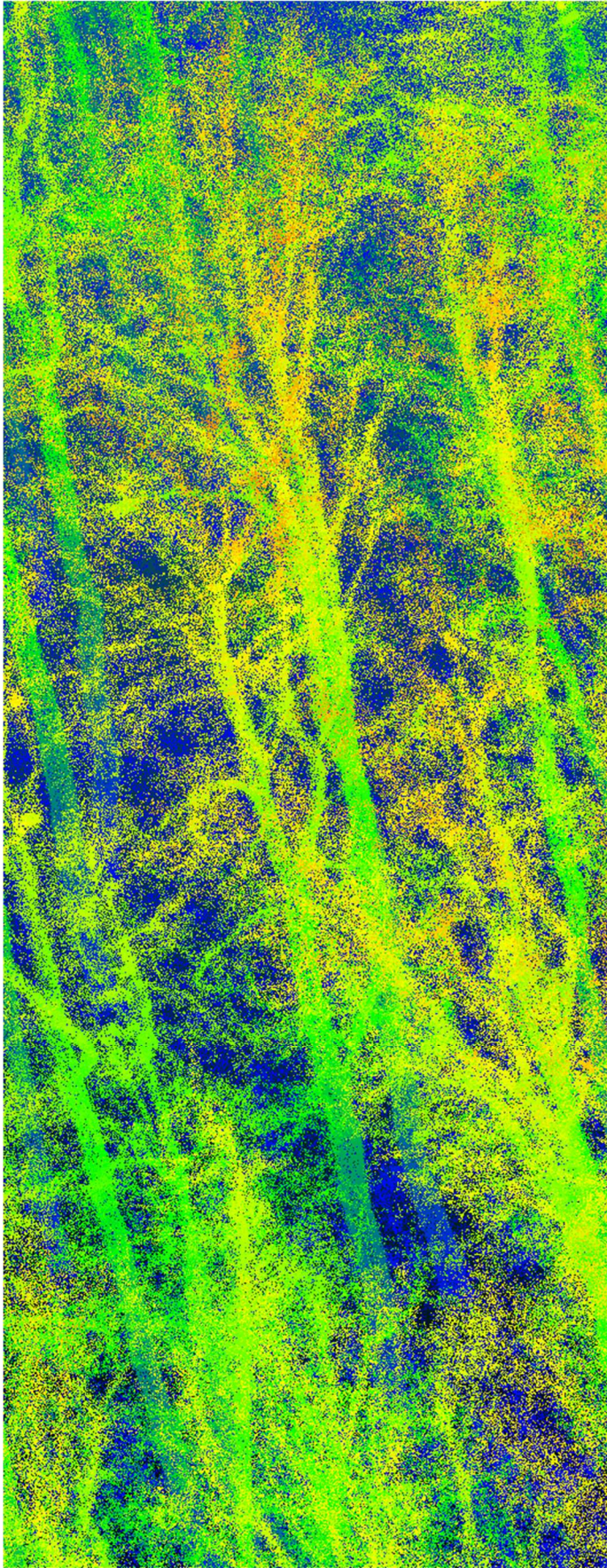


Abbildung 7-2 Beispielhafte Darstellung von Einzelbaum- und Kronenstrukturen in der für die Auswertung aufbereiteten Punktwolke

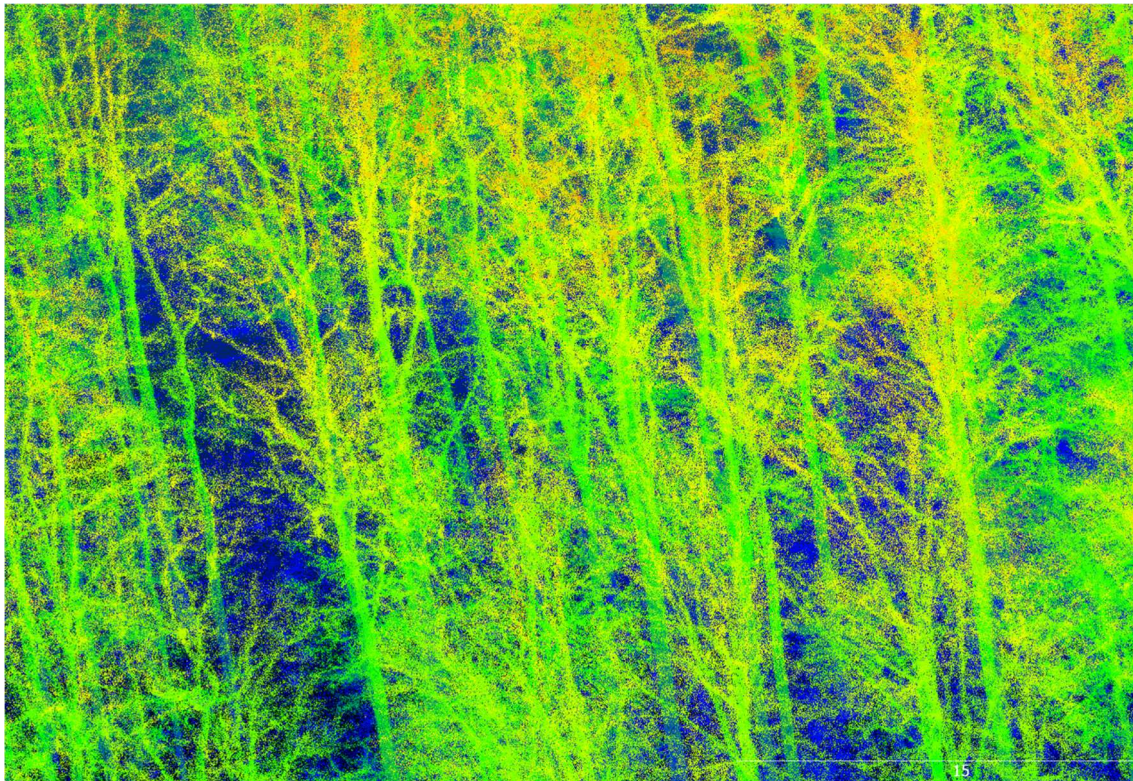


Abbildung 7-3 Weitere Ansicht von Einzelbaum- und Kronenstrukturen in der für die Auswertung aufbereiteten Punktwolke

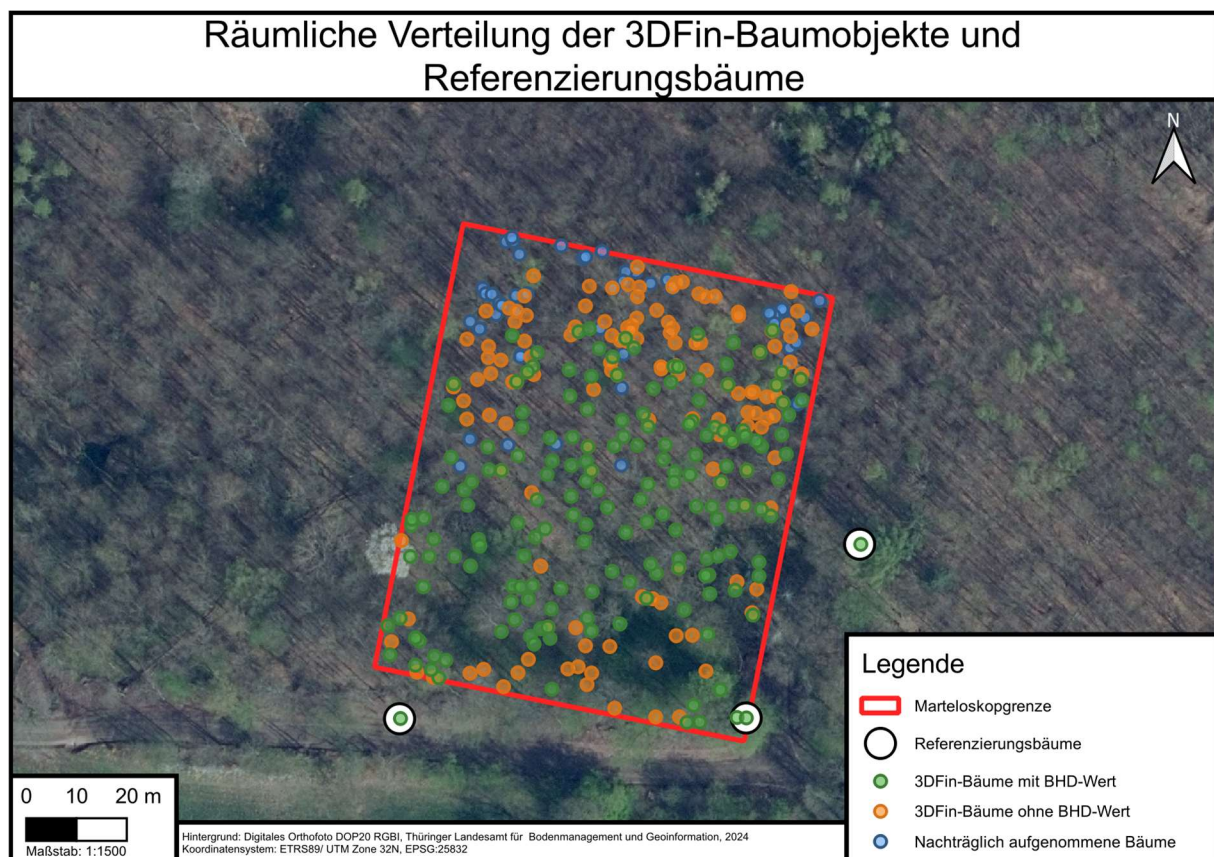


Abbildung 7-4 Räumliche Verteilung der 3DFin-Baumobjekte mit und ohne BHD-Wert, der nachträglich aufgenommenen Bäume sowie der Referenzierungsbäume

8 Erklärungen

8.1 Eigenständigkeitserklärung



Erklärung zur Eigenständigkeit und zum Einsatz KI-gestützter Schreibwerkzeuge

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit mit dem Titel

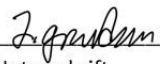
Einrichtung von forstlichen Karteloskopflächen mithilfe von mobilen Laserscanning Verfahren selbständig von mir und ohne fremde Hilfe verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, durchgängig unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht worden sind. Dies gilt auch für Zeichnungen, Skizzen, bildliche Darstellungen und dergleichen.

Ich erkläre hiermit, dass ich beim Einsatz von KI-gestützten Schreibwerkzeugen diese Werkzeuge in einer Rubrik < Einsatz KI-gestützter Methoden > mit ihrem Produktnamen und -version, meiner Bezugsquelle und einer Übersicht des im Rahmen dieser Arbeit genutzten Funktionsumfangs vollständig aufgeführt habe. Die verwendeten KI-Werkzeuge sind außerdem in der Anlage zur Eigenständigkeitserklärung dokumentiert. Die mit KI-gestützten Schreibwerkzeugen erstellten Inhalte habe ich steuernd bearbeitet.

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit oder Teile daraus nicht anderweitig als Prüfungsarbeit eingereicht habe oder diese als Veröffentlichung erschienen ist.

Göttingen, 12.06.2026

Ort, Datum


Unterschrift

Erklärung zur Veröffentlichung der Abschlussarbeit:

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit in den Bestand der Fakultätsbibliothek aufgenommen und in dieser Form der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird:

☐ JA

☒ NEIN

Göttingen, 12.06.2026

Ort, Datum


Unterschrift

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim/Holzminde/Göttingen
University of Applied Sciences and Arts

www.hawk.de

8.2 Anlage zur Eigenständigkeitserklärung

Anlage zur Eigenständigkeitserklärung zu meiner [Prüfungsform] Bachelorarbeit

[Titel der Arbeit (ggf. kürzen)] Einrichtung von forstlichen Marteloskopflächen mithilfe von mobilen Laserscanning Verfahren

[Vorname Name, Matrikelnr.] Justin Thomas Grundmann, 137995

Dokumentation der Verwendung generativer KI-Systeme

In meiner Prüfungsleistung habe ich die unten genannten generativen KI-Systeme wie im Folgenden beschrieben eingesetzt.

Zweck der Verwendung	Eingesetzte(s) KI- System(e)	Beschreibung der Verwendungsweise
Generierung von Ideen und Konzeption der Arbeit		
Literatursuche	Chat-GPT	Vorschläge von Studien bei spezifischen Themen
Literaturanalyse		
Literaturverwaltung und Zitationsmanagement		
Auswahl von Methoden und Modellen		
Datensammlung und -analyse		
Generierung / Überprüfung von Programmcodes		
Erstellung / Optimierung von Visualisierungen von Daten		
Erstellung bildlicher Darstellungen		
Interpretation und Validierung von Daten		
Strukturierung des Texts der Arbeit		
Formulierung des Texts der Arbeit		
Übersetzung	Chat-GPT	Englischsprachige Studien wurden bei Verständnisproblemen in Teilbereichen Übersetzt

Anlage zur Eigenständigkeitserklärung zu meiner [Prüfungsform] **Bachelorarbeit**

[Titel der Arbeit (ggf. kürzen)] **Einrichtung von forstlichen Karteloskopflächen mithilfe von mobilen Laserscanning Verfahren**

[Vorname Name, Matrikelnr.] **Justin Thomas Grundmann, 137995**

Dokumentation der Verwendung generativer KI-Systeme

Redigieren des Texts		
Layouten der Arbeit		
Plausibilitätsprüfung meiner Argumentation(en)		
Vorbereitung der Präsentation der Arbeit		
Sonstiges	Chat-GPT	Überprüfung der Rechtschreibung

[Ort], [Datum] **Göttingen, 12.06.2026**

Ort, Datum


Unterschrift