

Waldinventur aus Luftbildern und LiDAR-Daten - Mit welcher Genauigkeit und Präzision lassen sich Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatz von Douglasien ableiten?

SELINA GANZ¹, YANNEK KÄBER¹ & PETRA ADLER¹

Zusammenfassung: In dieser Studie wurde untersucht, wie gut sich die in Forstwirtschaft und Forstwissenschaft relevanten Einzelbaumattribute Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe mithilfe verschiedener Sensorsysteme ableiten lassen. Im Fokus standen dabei die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der automatisierten Messungen und die Identifizierung von Unterschieden zwischen den Sensorsystemen. Als Sensorsysteme kamen unbemannte Luftfahrtsysteme (UAV) mit Light Detection And Ranging (LiDAR)-Sensor bzw. RGB-Kamera sowie Gyrocopter mit RGB-Kamera zum Einsatz. Ergänzend wurden Luftbilder aus photogrammetrischen Bildflügen des Landesamtes für Geoinformation und Landentwicklung verwendet. Das Untersuchungsgebiet war eine 50-jährige Douglasien-Versuchsfläche. Die Baumhöhe konnte durch alle Sensorsysteme mit einem RMSE zwischen 0,36 m und 2,89 m abgeleitet werden. Auch der Kronenradius ließ sich mit einem akzeptablen RMSE zwischen 0,45 m und 0,76 m relativ zuverlässig berechnen. Für die Kronenansatzhöhe wurde ein RMSE zwischen 3,88 m und 11,26 m erreicht. Folglich ließen sich Baumhöhe und Kronenradius zuverlässig ableiten, während die Ableitung des Kronenansatzes auf Einzelbaumebene sich als nicht anwendbar erwiesen hat. Selbst die räumlich hochaufgelösten LiDAR-Daten ermöglichten keine erfolgreiche Ableitung des Kronenansatzes. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen aus LiDAR- und photogrammetrischen Daten fielen geringer aus als erwartet, wobei sich bei den photogrammetrischen Daten Hinweise dafür finden, dass eine hohe Punktdichte ein wichtiger Faktor für eine erfolgreiche Ableitung der Einzelbaumattribute ist.

1 Einleitung

Mit modernen Methoden der Fernerkundung ist es möglich, äußere Merkmale von stehenden Bäumen abzuleiten um Waldinventuren zu unterstützen und zu verbessern. Traditionelle Waldinventuren zielen auf den Volumen- und Wertertrag von Waldbeständen. Mit der vermehrten Nutzung von Einzelbaumwuchsmodellen rückt aber auch die Beschreibung der Struktur der Kronen in den Fokus (WEIDENBACH et al. 2012). Die Struktur des Kronenraumes und die sich daraus ergebende Wuchsraumeffektivität und Konkurrenzverhältnisse gehören zu den wesentlichen Untersuchungsgegenständen waldbaulicher bzw. ertragskundlicher Forschungen (PRETZSCH 2014; MARTENS et al. 2012). Detaillierte Versuchsaufnahmen beinhalten daher sowohl Baumhöhen und Brusthöhendurchmesser als auch Baumposition, Kronenradien und die Höhe des Kronenansatzes (MARTENS et al. 2012, WEIDENBACH et al. 2012). Mit den Eingangsgrößen Baumhöhe, Kronenansatzhöhe und Kronenradius kann die räumliche Ausdehnung einer Krone sowie

¹ Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA),
Abteilung Biometrie und Informatik, Wonnhaldestraße 4, D-79111 Freiburg,
E-Mail: [Selina.Ganz, Yannek.Käber, Petra.Adler]@Forst.bwl.de

die Kronenschirmfläche, Kronenmantelfläche und das Kronenvolumen bestimmt werden. Des Weiteren sind Aussagen über die Kronenkonkurrenz möglich.

Bisherige Untersuchungen haben meist einen Sensor auf einer spezifischen Fläche angewandt (siehe z.B. DEAN et al. 2009; JUNG et al. 2011; KATO et al. 2009; LUO et al. 2018; MUSS et al. 2011; POPESCU & ZHAO 2008; SOLBERG et al. 2006; VAUHKONEN 2008; WALLACE et al. 2014; XU et al. 2013). Aufgrund der Unterschiede zwischen den fernerkundlichen Systemen und den Rahmenbedingungen in diesen Untersuchungen ist es nicht möglich allgemeingültige Aussagen zur Anforderung an die Eingangsdaten zu machen. Dies ist hauptsächlich der Tatsache geschuldet, dass sich die Untersuchungsgebiete bezüglich Baumarten, Waldtyp oder Bestandesalter unterscheiden. In der vorliegenden Studie liegt ein direkter Vergleich zwischen den fernerkundlichen Systemen mit den gleichen Referenzdaten, teilweise dem gleichen Befliegungsdatum und bei Wiederholungsbefliegungen der gleichen Sensorik und Plattform und teilweise der gleichen Flugplanung vor. Dadurch kann mit einer höheren Sicherheit das Anwendungspotenzial der verschiedenen Sensoren und Plattformen aufgezeigt werden. In dieser Studie wurden die Einzelbaumattribute Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe aus unterschiedlichen Systemen abgeleitet. Für den Vergleich dienten sowohl Light Detection And Ranging (LiDAR)-Daten als auch Luftbilder, welche von unbemannten Luftfahrtsystemen (Unmanned Aerial Vehicle, UAV), Gyrocopter und Flugzeug aufgenommen wurden. Der Fokus der Studie lag dabei auf dem Vergleich der verschiedenen Fernerkundungsdaten und der Validierung sowie der Untersuchung von Genauigkeit und Präzision bei der automatisierten Ableitung von Kronenparametern. Die Anwendung der unterschiedlichen Systeme unter gleichen Bedingungen ermöglichte uns für die 50-jährige Douglasien-Versuchsfläche die Beantwortung folgender Fragen. (1) Mit welcher Genauigkeit und Präzision können die Kronenattribute mit fernerkundlichen Methoden abgeleitet werden? (2) Gibt es bei der Bestimmung von Kronenattributen Unterschiede zwischen den angewandten Systemen? (3) Was sind die Anforderungen an die Eingangsdaten für die erfolgreiche Ableitung dieser Kronenattribute?

2 Material und Methoden

Dieses Kapitel beschreibt das Untersuchungsgebiet, die Referenz- und Fernerkundungsdaten sowie die Erfassungsmethoden für die Einzelbaumparameter mittels Feldmessungen und Fernerkundung, welche in der vorliegenden Studie Verwendung fanden.

2.1 Untersuchungsgebiet und Versuchsbäume

Das Untersuchungsgebiet war eine 2 ha große Versuchsfläche bei Kandern im Südschwarzwald, welche Teil des koordinierten Standraumversuchs Baden-Württemberg ist. Zum Zeitpunkt der Auswahl der Versuchsbäume wies die homogene Fläche keinerlei Naturverjüngung und kaum Bodenbewuchs auf (siehe Abbildung 1). Im September 2014 standen 227 Douglasien auf der Fläche. Diese hatten einen Brusthöhendurchmesser (BHD) von 40,9 cm ($\pm 13,5$ cm, Standardabweichung (SD)) in einem Wertebereich von 13,8 cm bis 63,9 cm. Aus diesen Bäumen wurden für die Studie im März 2017 aus allen Durchmesserklassen 30 Bäume ausgewählt. Es wurden Bäume mit unterschiedlich vielen Ästen und Kronengrößen ausgewählt. Im Mittel wiesen die

ausgewählten Bäume eine Baumhöhe von 34,2 m ($\pm 2,8$ m, SD), einen Kronenradius von 3,9 m ($\pm 0,9$ m, SD) und eine Kronenansatzhöhe von 15,3 m ($\pm 2,7$ m, SD) auf (siehe Abbildung 2).



Abb. 1: Versuchsbestand bei der Auswahl der Bäume.

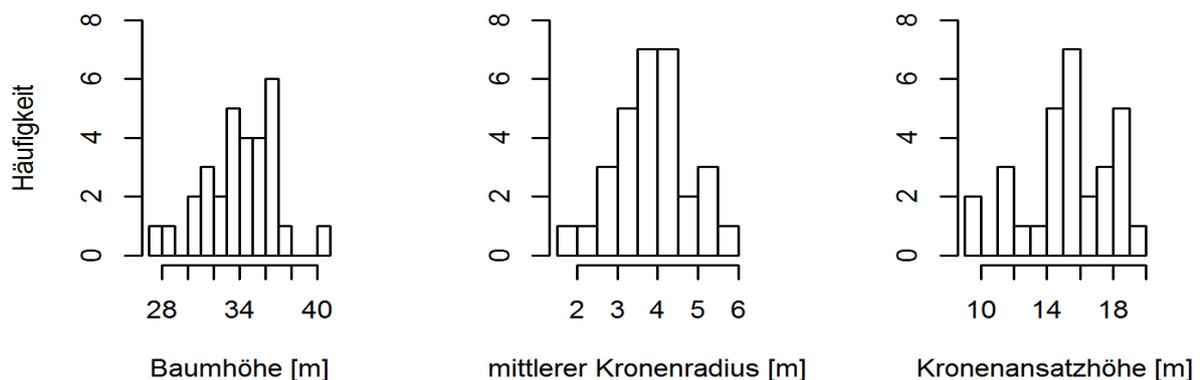


Abb. 2: Histogramme von Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe der 30 Versuchsbäume.

2.2 Fernerkundungsdaten

Im Sommer 2017 und im Frühjahr 2018 fand die Datenaufnahme mit verschiedenen fernerkundlichen Systemen statt. Darunter UAVs, welche die Versuchsfläche mithilfe eines LiDAR-Sensors und einer RGB-Kamera erfasst haben. Zusätzlich wurden mit einem Gyrocopter Luftbilder aus zwei unterschiedlichen Flughöhen aufgenommen. Die Daten mit der geringsten räumlichen Auflösung lieferte eine amtliche Standardbefliegung (photogrammetrischer Bildflug) des Landesamts für Geoinformation und Landentwicklung (LGL) aus dem Jahr 2016 (LGL, 2018a). Eine Übersicht über die durchgeführten Befliegungen (UAV-LiDAR 2017, UAV-LiDAR 2018, UAV-Kamera 2017, UAV-Kamera 2018, Gyrocopter 2 cm, Gyrocopter 5 cm) und den Standardbildflug von 2016 ist in Tabelle 1 ersichtlich.

Tab. 1: Daten zu den Befliegungen 2017/2018 und dem Standardbildflug von 2016.

	Datum	Fluggerät	Flughöhe über Grund	Überlappung
UAV-LiDAR	19.06.17 - 20.06.17	HEIGHT TECH HT-8	~ 80 m – 100 m	50%
	15.03.18	Tarot X6	~ 50 m – 60 m	60%-70%
UAV-Kamera	19.06.17 - 20.06.17	HEIGHT TECH	~ 80 m – 100 m	80%/80%
	15.03.18	HT-8 C180		
Gyrocopter 2 cm	20.06.17	AutoGyro MTOsport (D-MDOB)	~ 300 m	85%/70%
Gyrocopter 5 cm	20.06.17	AutoGyro MTOsport (D-MDOB)	~ 800 m	90%/70%
Standard	10.07.16	Flugzeug einer Standardbefliegung	2700 m – 2750 m	68%/40%

Für die Laserbefliegungen wurde 2017 ein HEIGHTTECH HT-8 und 2018 ein Tarot X6 verwendet. Die UAV wurde jeweils mit dem Laserscanner Mapper I der Firma YellowScan ausgerüstet. Der LiDAR-Sensor verfügte über die Multi-Echo Technologie und konnte pro Laserstrahl 3 Echos erfassen (First, Middle und Last Return). Die aufgenommenen Laserscan-Punkte wurden mithilfe der Software *TerraScan* in Bodenpunkte und Nicht-Bodenpunkte klassifiziert und orientiert.

Bei den Bildflügen mittels UAV wurde als Sensor die Kamera Sony Alpha 7R mit einer Brennweite von 35 mm eingesetzt. Es wurden die drei Kanäle rot, grün und blau (RGB) mit einer radiometrischen Auflösung von 8 bit aufgenommen. Die Luftbilder hatten eine geometrische Auflösung von 1 cm. Die Befliegungen mittels Gyrocopter wurden mit der Kamera D800E der Marke NIKON mit einer Brennweite von 85 mm durchgeführt. Es wurden ebenfalls RGB-Bilder mit einer radiometrischen Auflösung von 8 bit aufgenommen. Die geometrische Auflösung lag hierbei – abhängig von der Flughöhe – bei 2 cm und 5 cm. Der Standardbildflug wurde mit der UltraCam XP mit einer Brennweite von 100,5 mm durchgeführt. Die Luftbilder beinhalteten die vier Kanäle rot, grün, blau und infrarot (RGBI) bei 16 bit. Die geometrische Auflösung betrug 20 cm. Tabelle 2 beinhaltet die technischen Angaben zu den Bildflügen.

Tab. 2: Technische Angaben zu den Bildflügen.

	Kamera	Brennweite	Radiometrische Auflösung	Geometrische Auflösung
UAV-Kamera	Sony Alpha 7R	35 mm	RGB, 8 bit	1 cm
Gyro 2 cm	NIKON D800E	85 mm	RGB, 8 bit	2 cm
Gyro 5 cm	NIKON D800E	85 mm	RGB, 8 bit	5 cm
Standard	UltraCam XP	100,5 mm	RGBI, 16 bit	20 cm

Die Verortung der Bild- und Laserdaten war über die im System verbaute GNSS-Einheit möglich. Zusätzliche wurden für die Bildflüge Passpunkte verwendet. Für die Befliegungen mittels Gyrocopter wurden 14 (5 cm) bzw. 12 (2 cm) und mittels UAV wurden 4 (2017) bzw. 12 (2018) Passpunkte verwendet.

Die Luftbilder von 2017 und 2018 wurden mithilfe der Software *Agisoft Photoscan* verarbeitet, sodass photogrammetrische Punktwolken und Orthophotos erzeugt wurden. Die Luftbilder aus den Standardbildflügen wurden mit der Software *SURE* zu Punktwolken und Orthophotos mit einer Bodenauflösung von 20 cm und 50 cm verarbeitet. Die Namen der Datensätze sind in Tabelle 3 mit der entsprechenden Punktdichte dargestellt. Die LiDAR-Punktwolken (2017/2018) bestanden aus 75,5%/67,6% First Returns, 21,5%/26,7% Middle Returns und 3,0%/5,7% Last Returns. Die Durchdringungsrate (Bodenpunkte geteilt durch alle Punkte der Punktwolke) lag bei 3,0% (2017) bzw. 13,5% (2018).

Tab. 3: Punktwolken-Dichte der verschiedenen Datensätze

	Punktdichte [Punkte/m ²]
UAV-LiDAR 2017	350
UAV-LiDAR 2018	620
UAV-Kamera 2017	1690
UAV-Kamera 2018	2118
Gyro 2 cm	502
Gyro 5 cm	66
Standard 20 cm	25
Standard 50 cm	4

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Punktwolken einer segmentierten Baumkrone. Es ist zu erkennen, dass bei höherer Punktdichte mehr Details innerhalb der Baumkrone ersichtlichsind. Die photogrammetrisch erzeugten Punktwolken beschreiben die Oberfläche der Baumkrone, während die LiDAR-Punktwolke die Struktur des Baumes von der Kronenspitze (hohe Punktdichte) bis zum Boden (niedrige Punktdichte) beschreibt.

2.3 Erfassungsmethoden für die Einzelbaumparameter Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe mittels Feldmessungen

Die Baumhöhen der 30 Versuchsbäume wurden nach der Fällung am liegenden Baum mittels Maßband gemessen. Zur Bestimmung des Kronenradius wurden, wie in Röhle (1986) beschrieben, Kronenprojektionen am stehenden Baum erstellt. Dafür wurden acht Kronenrandpunkte in gleichmäßig verteilten Winkeln (von Norden aus in 45° Abstand) bestimmt und mit Fluchtstäben markiert. Die Entfernung der Fluchtstäbe von der Stammachse wurde trigonometrisch (ultraschallbasiert mittels Vertex) ermittelt. Die 8 Kronenradien wurden gemittelt. Die Kronenansatzhöhe wurde als die Höhe des ersten Grünastes definiert und am stehenden Baum mittels Vertex gemessen.

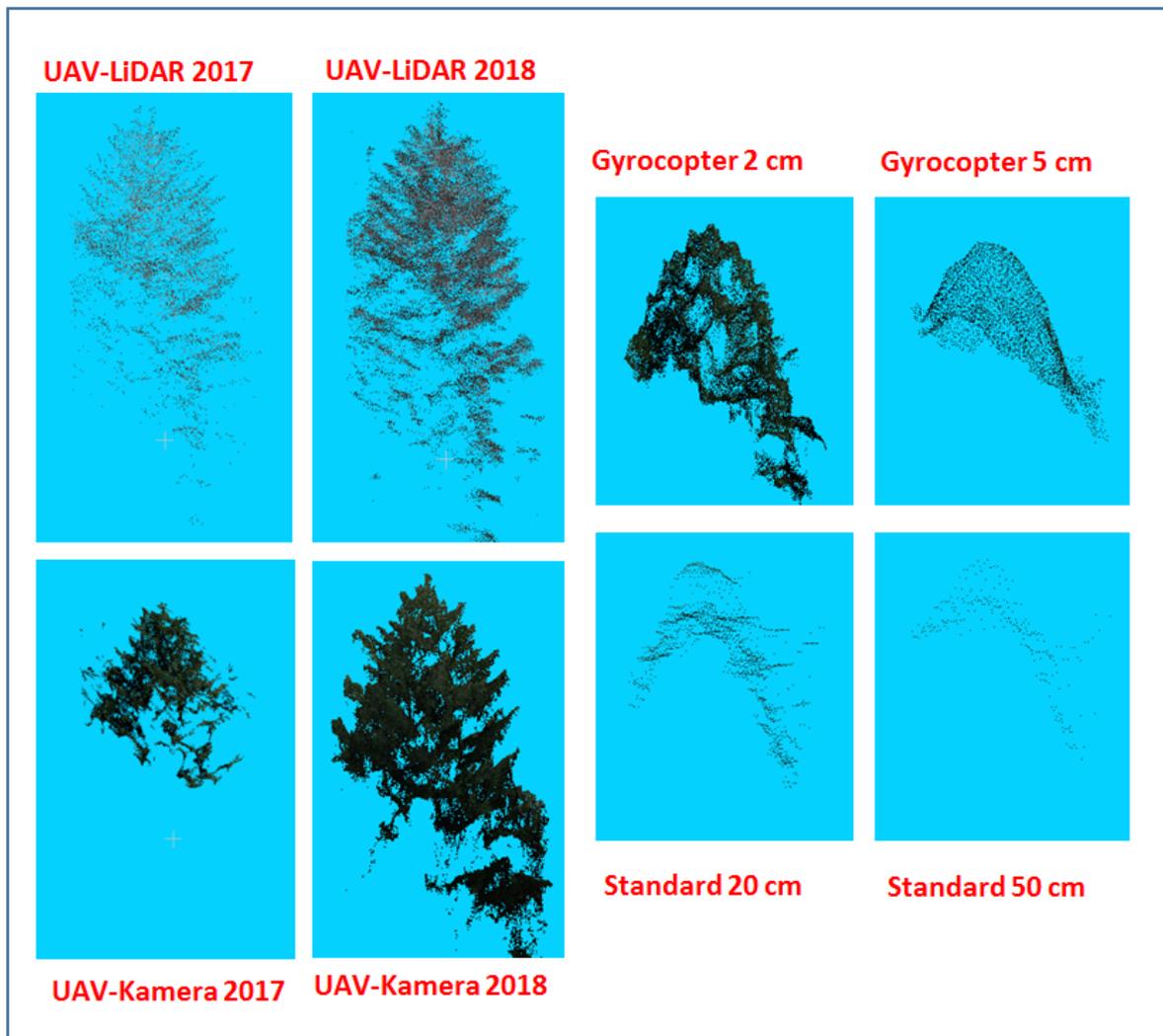


Abb. 3: Vergleich der Punktwolken einer automatisch segmentierten Baumkrone.

2.4 Erfassungsmethoden für die Einzelbaumparameter Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe mittels Fernerkundung

Dieses Kapitel beschreibt die verwendeten Methoden zur Ableitung der Einzelbaumparameter mittels Fernerkundung. Für alle Datensätze wurden die Parameter aus dem Oberflächenmodell berechnet (rasterbasierter Ansatz). Für die LiDAR-Daten wurden zusätzlich Methoden entwickelt, um die Kronenparameter direkt aus den LiDAR-Punktwolken abzuleiten (LiDAR-Ansatz). Alle Berechnungsschritte wurden mithilfe der Programmiersprache R (R Core Team, 2017) durchgeführt.

2.4.1 Erstellung eines Oberflächenmodells und Einzelbaumdelinierung

Als Grundlage für die Entwicklung der bildanalytischen Verfahren dienten digitale Oberflächenmodelle (DSM), welche sowohl aus den photogrammetrisch erzeugten Punktwolken als auch aus LiDAR-Daten erzeugt wurden. In R wurde mittels *grid_canopy* aus dem Paket *lidR*,

Version 1.5.0 (ROUSSEL et al. 2018), ein DSM erstellt. Diese Funktion gab für jedes Pixel den Z-Wert des am höchsten gelegenen Punktes wieder. Leere Pixel wurden mit einer Kombination aus dem *k-nearest-neighbor*-Ansatz und *Inverse Distance Weighting* interpoliert. Für die Daten mittels UAV und Gyrocopter wurde jeweils ein DSM mit 10 cm Auflösung, aus den Punktwolken des Standardbildfluges ein DSM mit 20 cm bzw. 50 cm Auflösung erstellt.

Um Kronenparameter abzuleiten sind einzelbaumbezogene Informationen notwendig. Folglich müssen alle Pixel eines Bildes bzw. alle Punkte einer Punktwolke, welche zu einer Baumkrone gehören, von den anderen Pixeln bzw. Punkten isoliert werden. Für die Segmentierung der Einzelbäume wurde der Watershed-Algorithmus mithilfe des Tools *lastrees* aus *lidR* angewandt. Segmentiert wurde auf Basis des Oberflächenmodells. Die Punktwolken der LiDAR-Daten wurden mithilfe der resultierenden Watershed-Segmente zu Einzelbäumen segmentiert.

2.4.2 Baumhöhe

Um die Baumhöhen zu ermitteln, mussten zunächst die Koordinaten der Baumspitzen identifiziert werden. Da bei der Segmentierung mittels Watershed nicht alle relevanten Bäume automatisch erkannt werden konnten, wurden manuell Polygone erstellt, welche die Baumspitzen aller Testbäume beinhalteten. Der höchste DSM-Wert innerhalb der Polygone wurde abgefragt und dessen Koordinaten ausgelesen. Um die Baumhöhe zu erhalten wurde die Differenz zwischen höchstem DSM-Wert und der entsprechenden Geländehöhe aus einem digitalen Geländemodell (DTM) berechnet. Als DTM wurde das landesweite DTM verwendet, welches vom LGL auf Basis von LiDAR-Daten mit einer Auflösung von 1 m erzeugt wurde (LGL 2018b). Für die LiDAR-Punktwolken wurde die Baumhöhe zusätzlich anhand der mit den Bodenpunkten normalisierten Punktwolke bestimmt (höchster Punkt innerhalb der Krone), nachdem mit den Watershed-Segmenten auf einzelne Kronen zugeschnitten wurde.

2.4.3 Kronenradius

Die rasterbasierte Ableitung des Kronenradius konzentrierte sich auf den Vergleich des Verfahrens der Fernerkundung mit der herkömmlichen terrestrischen Messmethode zur Erstellung von Kronenprojektionen. Basierend auf der Arbeit von POPESCU et al. (2003) wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher ausgehend von der Baumspitze die Kronenbreite eines Baumes automatisch erfasst. Für eine Baumkrone wurden vier Höhenprofile aus dem Oberflächenmodell extrahiert: Ost-West, Nord-Süd, Südwest-Nordost und Nordwest-Südost. Durch die Anpassung einer Kurve vierten Grades wurde die Kronenbreite modelliert. Die Minima der Kurve bildeten die Enden der Krone ab. Dies resultierte in acht Kronenradien, welche – simultan zu den terrestrischen Aufnahmen – von Norden aus mit 45° Abstand um die Krone verteilt waren. Die Höhenprofile wurden iterativ erstellt, angefangen mit einem Mindestradius von 3 m. Das Höhenprofil verlängerte sich schrittweise solange, bis an beiden Seiten durch eine Kurve vierten Grades ein lokales Minimum gefunden wurde und bestimmte Abbruch-Kriterien erfüllt waren oder bis ein Radius von 6 m erreicht wurde. Aus der LiDAR-Punktwolke wurde eine zweidimensionale von oben projizierte konvexe Hülle um die segmentierten Punkte gelegt. Der Radius eines Kreises mit der Fläche dieser konvexen Hülle wurde als mittlerer Kronenradius definiert. In Abbildung 4 sind die Methoden zur Ableitung des Kronenradius abgebildet.

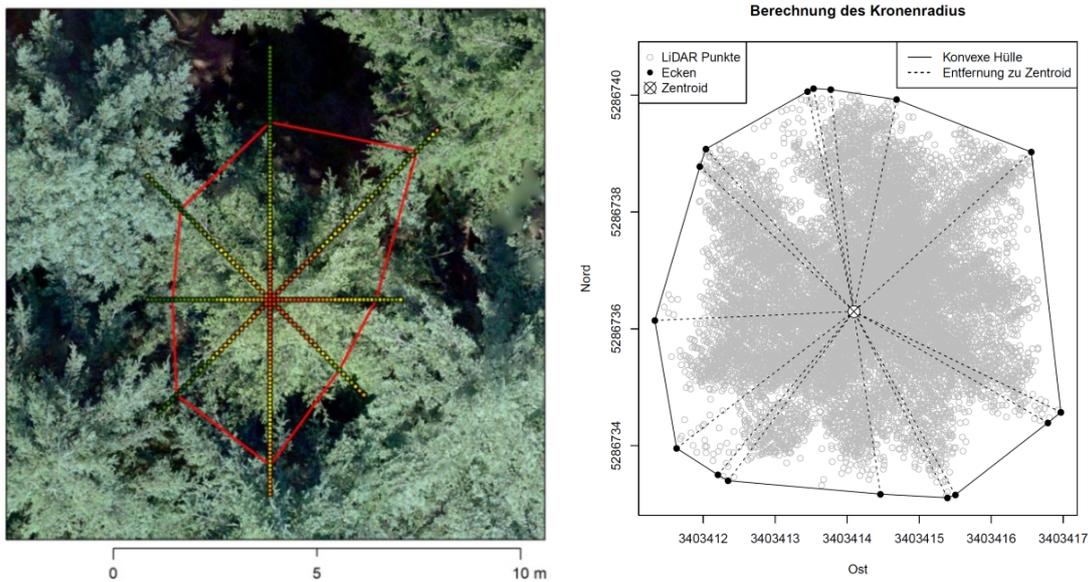


Abb. 4: Ableitung des Kronenradius. Links: Rasierbasierter Ansatz. Höhenprofil nach den Höhenwerten eingefärbt von grün (niedrig) über gelb bis rot (hoch), resultierende Kronenprojektion in rot. Rechts: LiDAR-Ansatz. Berechnung des Kronenradius aus der zweidimensionalen konvexen Hülle.

2.4.4 Kronenansatzhöhe

Zur Bestimmung der Kronenansatzhöhe (rasterbasierter Ansatz) wurden normalisierte Oberflächenmodelle (nDSM) berechnet. Ein nDSM wurde auf detaillierte Kronenabgrenzungen zugeschnitten, welche eine Weiterentwicklung der achteckigen Kronenprojektionen aus 2.4.3 darstellten. Der niedrigste Pixelwert des zugeschnittenen nDSMs wurde als Kronenansatzhöhe definiert. Für die Bestimmung der Kronenansatzhöhe mittels LiDAR wurde eine Polynomialfunktion vierten Grades auf die vertikale Häufigkeit der Punkte gefittet. Die Höhe beim Minimum dieser Funktion war als Kronenansatzhöhe definiert (siehe Abbildung 5).

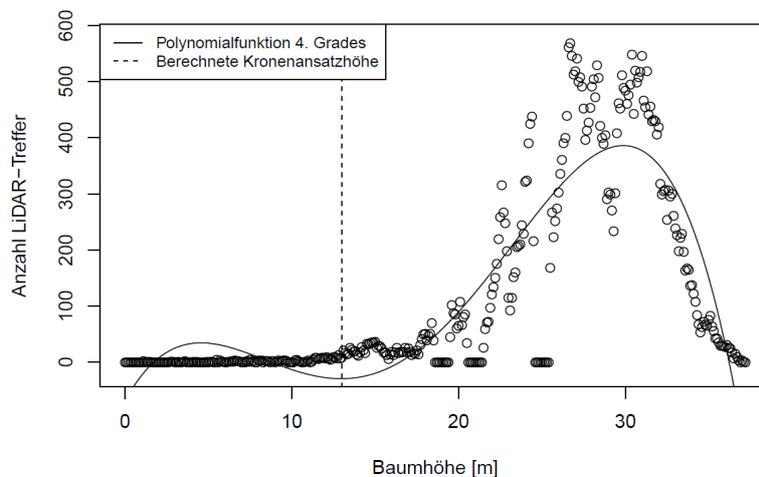


Abb. 5: Mittels LiDAR wurde die Kronenansatzhöhe mithilfe eines Histogramms berechnet. Die Position des Minimums der angepassten Kurve wurde als Kronenansatzhöhe definiert.

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die aus verschiedenen Fernerkundungsdaten abgeleiteten Kronenparameter mit den Feldmessungen verglichen und validiert. Für jeden Kronenparameter werden die Ergebnisse gesondert dargestellt. Die Genauigkeit der abgeleiteten Parameter wurde mit der Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers (RMSE, Root Mean Square Error) und dem mittleren Fehler (ME, Mean Error) validiert. Der Variationskoeffizient über alle automatisch erkannten Bäume innerhalb der 6 Felder galt als Maß für die Reproduzierbarkeit (Präzision). Für die Baumhöhe wurden die Fernerkundungsdaten mit den Felddaten verglichen, welche im gleichen Zeitraum aufgenommen wurden. Dies ergab einen Vergleich von jeweils 15 Bäumen pro Datensatz. Für Kronenradius und Kronenansatzhöhe wurden jeweils alle 30 Bäume zur Validierung verwendet unter der Annahme, dass sich die Kronenausdehnung zwischen Juni 2017 und März 2018 nicht verändert hat. Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse für alle Parameter und Datensätze. Die Reproduzierbarkeit der Kronenparameter wurde anhand aller auf der Versuchsfläche automatisch erkannten Bäume abgeleitet, indem der Variationskoeffizient über alle Datensätze einzelbaumweise berechnet und über alle Bäume gemittelt wurde.

Tab. 4: RMSE und ME für Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe. Für die LiDAR-Daten wird das jeweils beste Ergebnis (Raster-/LiDAR-Ansatz) angezeigt.

Datensatz	Baumhöhe (m)		Kronenradius (m)		Kronenansatzhöhe (m)	
	RMSE	ME	RMSE	ME	RMSE	ME
UAV-LiDAR 2017	0,36	-0,13	0,53	0,11	4,46	1,00
UAV-LiDAR 2018	0,49	-0,3	0,46	-0,08	4,49	-1,83
UAV-Kamera 2017	1,09	1,03	0,45	0,12	4,52	1,08
UAV-Kamera 2018	0,49	0,18	0,53	0,06	5,18	1,23
Gyrocopter 2 cm	0,68	0,44	0,49	0,07	3,88	-0,21
Gyrocopter 5 cm	1,44	1,29	0,76	-0,11	8,81	-8,48
Standard 20 cm	1,86	1,63	0,68	0,06	9,49	-8,73
Standard 50 cm	2,89	2,71	0,67	0,09	11,26	-11,06

3.1 Baumhöhe

Wie in Abbildung 6 und Tabelle 4 dargestellt, liegen die berechneten Baumhöhen sehr nah an den Feldmessungen. Die Ergebnisse variieren zwischen einem RMSE von 0,36 m (RMSE%: 1,05) für UAV-LiDAR 2017 bis 2,89 m (RMSE%: 8,46) für Standard 50 cm. Vergleicht man bei den LiDAR-Daten den rasterbasierten mit dem LiDAR-Ansatz, so ergeben sich mit einem RMSE für den rasterbasierten Ansatz von 0,36 m bzw. 0,63 m (2017/2018) und 0,38 m bzw. 0,49 m (2017/2018) für den LiDAR-Ansatz nur geringe Unterschiede. Der Vergleich der verschiedenen Sensoren ergibt für UAV-LiDAR, gefolgt von UAV-Kamera 2018 und Gyrocopter 2 cm die besten Ergebnisse mit einem RMSE < 0,7 m. Die Genauigkeit für UAV-Kamera 2017, Gyrocopter 5 cm und die Standard-Luftbilder liegen mit einem ME > 1 m zu niedrig. Die LiDAR-Daten liegen tendenziell eher höher als die Feldmessungen, während die photogrammetrischen Daten bis auf wenige Ausnahmen niedriger als die Feldmessungen liegen.

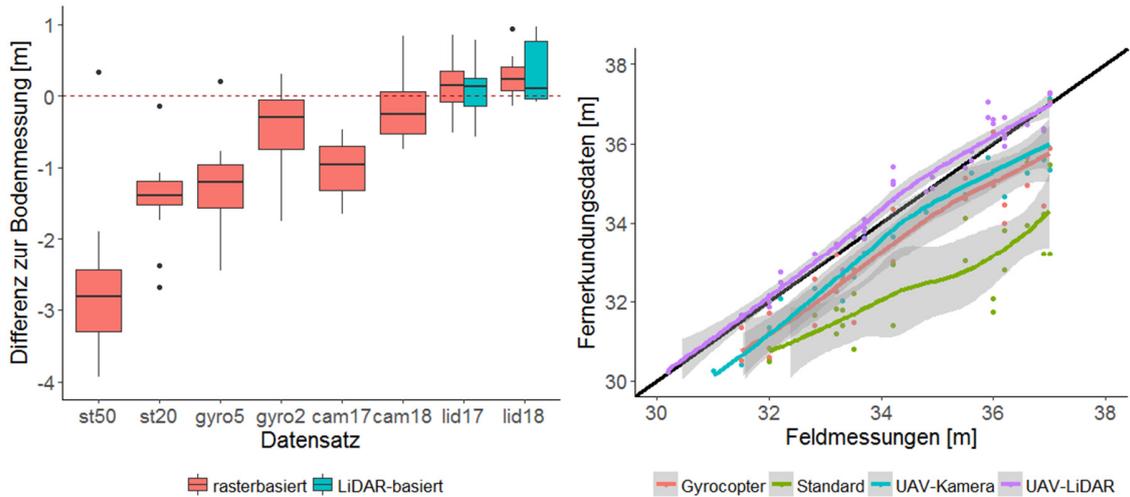


Abb. 6: Ergebnisse zur Ableitung der Baumhöhe aus verschiedenen Fernerkundungsdaten. Datensätze: st50/st20 = Standard 20/50 cm, gyro2/gyro5 = Gyrocopter 2/5cm, cam17/cam18: UAV-Kamera aus 2017/2018, lid17/lid18: UAV-LiDAR aus 2017/2018.

3.2 Kronenradius

Für den Kronenradius unterscheiden sich die Ergebnisse der Datensätze nur geringfügig (siehe Abbildung 7 und Tabelle 4). Der RMSE variiert zwischen 0,45 m (RMSE%: 11,88 m) und 0,76 m (RMSE%: 20,05). Der Kronenradius wird weder über- noch unterschätzt; der Fehler schwankt um die Werte der Feldmessungen. Die Unterschiede zwischen Raster-Ansatz und LiDAR-Ansatz sind mit einem RMSE von 0,53 m/0,68 m (2017) und 0,46 m/0,71 m (2018) gering. Auch zwischen photogrammetrischen und LIDAR-Daten sind keine Unterschiede erkennbar.

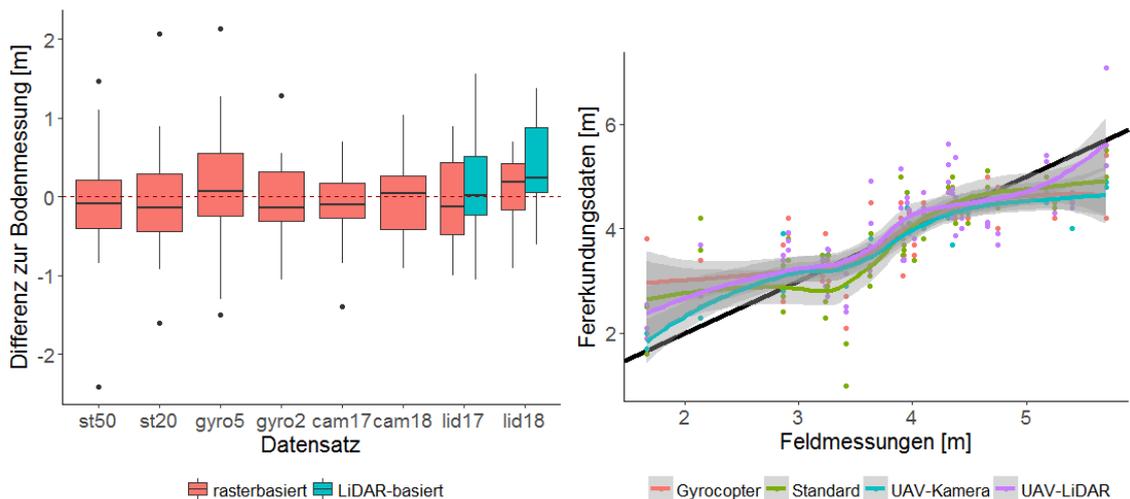


Abb. 7: Ergebnisse zur Ableitung des Kronenradius aus verschiedenen Fernerkundungsdaten. Datensätze: st50/st20 = Standard 20/50 cm, gyro2/gyro5 = Gyrocopter 2/5cm, cam17/cam18: UAV-Kamera aus 2017/2018, lid17/lid18: UAV-LiDAR aus 2017/2018.

3.3 Kronenansatzhöhe

Für die Ableitung der Kronenansatzhöhe ergibt sich eine Genauigkeit von einem RMSE zwischen 3,88 m (RMSE%: 25,41) bei Gyrocopter 2 cm und 11,26 m (RMSE%: 73,74) bei Standard 50 cm. Für die Datensätze Standard und Gyrocopter 5 cm ist eine hohe systematische Überschätzung zu beobachten, während die anderen Datensätze im Rahmen von ± 5 m (ohne Ausreißer) um die Feldmessung schwanken. Der LiDAR-Ansatz kann die Genauigkeit mit einem RMSE von 4,50 m/4,89 m (2017/2018) gegenüber dem Raster-Ansatz mit einem RMSE von 4,46 m/4,49 m (2017/2018) nicht verbessern. Die Ergebnisse sind in Abbildung 8 und Tabelle 4 dargestellt.

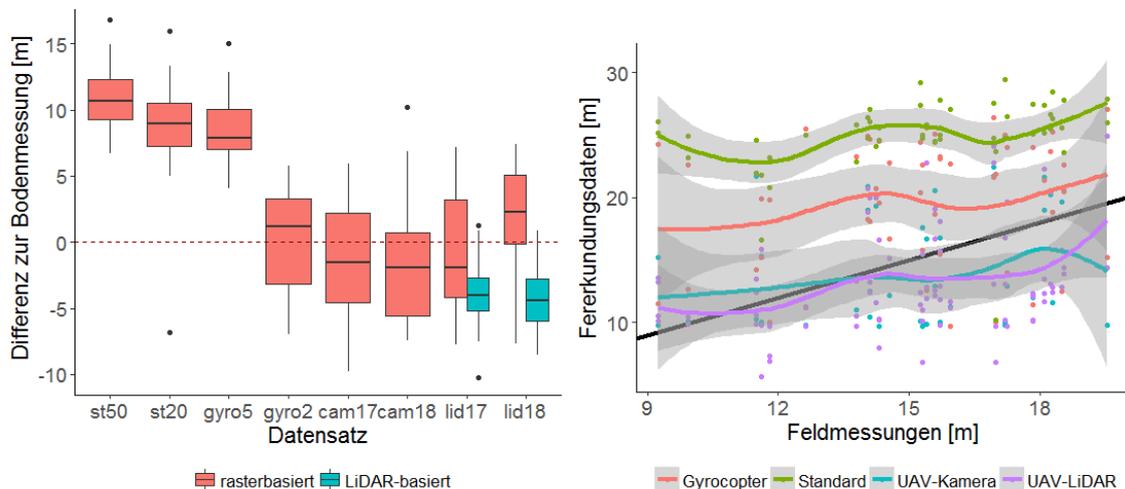


Abb. 8: Ergebnisse zur Ableitung der Kronenansatzhöhe aus verschiedenen Fernerkundungsdaten. Datensätze: st50/st20 = Standard 20/50 cm, gyro2/gyro5 = Gyrocopter 2/5cm, cam17/cam18: UAV-Kamera aus 2017/2018, lid17/lid18: UAV-LiDAR aus 2017/2018.

3.4 Reproduzierbarkeit

Der Variationskoeffizient (in %, \pm SD) liegt für die Ableitung von Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe aus dem Oberflächenmodell bei jeweils $3,37 \pm 1,12$, $7,07 \pm 2,93$ und $34,74 \pm 7,7$. Aus den mit LiDAR-Daten abgeleiteten Parametern ergibt sich ein Variationskoeffizient von jeweils $1,05 \pm 1,15$, $4,83 \pm 5,75$ und $11,58 \pm 10,23$. Die Ergebnisse für die drei Kronenparameter werden in Abbildung 9 dargestellt. LiDAR-basiert ist die Variation geringer als mit rasterbasiertem Ansatz, wobei LiDAR-basiert die Variation von zwei LiDAR-Datensätzen analysiert wird, während mittels rasterbasiertem Ansatz 8 Datensätze verglichen wurden.

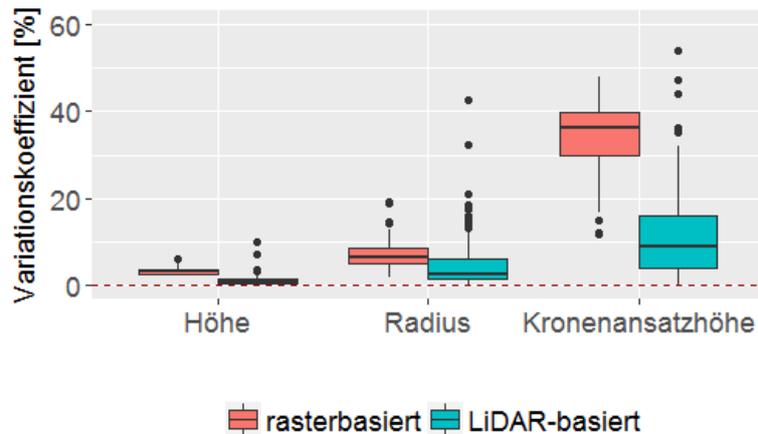


Abb. 9: Variationskoeffizient zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit (Präzision).

4 Diskussion

Vergleichbare Studien erreichten für die Ableitung der Baumhöhe mittels LiDAR-Daten einen RMSE von 0,92 m (WALLACE et al. 2016) bzw. 1,2 m (SOLBERG et al. 2006). Mittels Luftbildern wurde ein RMSE von 0,35 m (ZARCO-TEJADA et al. 2014), 0,91 m (JENSEN & MATHEWS 2016), 1,30 m (WALLACE et al. 2016), 1,38 m (GIFTTHALER 2017) und 3,00 m – 3,08 m (PANAGIOTIDIS et al. 2016) erreicht. Aufgrund der Abweichungen, die bei der Bestimmung der Referenzwerte auftreten, ist es fraglich, ob im Feld eine genaue Reproduktion der terrestrischen Höhenmessungen überhaupt möglich ist. Auch die Ergebnisse zur Reproduzierbarkeit konventioneller Baumhöhenmessungen von LUOMA et al. (2017) stützen diese Zweifel. Bei Wiederholungsbefliegungen sind bei robusten Methoden generell ähnliche Ergebnisse zu erwarten. Zwischen der UAV-Befliegung mit Kamera im Jahr 2017 und 2018 ergaben sich bei der Baumhöhe jedoch signifikante Unterschiede. Grund hierfür war vermutlich die unzureichende Verteilung und Anzahl der Passpunkte bei der Befliegung 2017. Weil sich die Orientierung der UAV-Luftbilder von 2017 mit nur 4 Passpunkten schwierig gestaltete, wurden im Jahr 2018 12 über das Befliegungsareal verteilte Passpunkte eingesetzt. Aufgrund der zeitlichen Differenz zwischen der Befliegung des Standardbildfluges Anfang Juli 2016 und den Feldmessungen Ende Juni 2017 müssen die Ergebnisse der Standard-Luftbilder kritisch betrachtet werden. Die Aufnahme der Quirle an den gefällten Testbäumen ergab für die letzten 5 Jahre einen durchschnittlichen Quirl-Abstand von 0,5 m und maximal 1,4 m. Unter der Annahme, dass pro Jahr ein neuer Quirl entstanden ist, kann von einem jährlichen Höhenwachstum von etwa 50 cm und im Extremfall von bis zu 1,4 m ausgegangen werden. Ein mittlerer Fehler von bis zu 1,4 m ist bei den Ergebnissen der Standard-Luftbilder folglich zu tolerieren. Abzüglich dessen bleibt ein Fehler von 1 – 2 m.

POPESCU et al. (2003) erreichten für die Ableitung der durchschnittlichen Kronenbreite von dominanten Bäumen mittels LiDAR-Daten einen RMSE von 1,36 m – 1,41 m. Vergleichbare Studien erzielten für den durchschnittlichen Kronendurchmesser einen RMSE von 0,9 m (KATO et al. 2009), 0,82 m – 1,04 m (PANAGIOTIDIS et al. 2016), 1,10 m (SOLBERG et al. 2006), 1,8 m (POPESCU & ZHAO 2008) bzw. 1,8 m (SOLBERG et al. 2006). In diesen Studien wurde der RMSE für den Kronendurchmesser anstelle des mittleren Kronenradius angegeben. Daher sollte der

RMSE dieser Studien halbiert werden, um vergleichbare Werte zu erhalten. In der vorliegenden Studie waren die Ergebnisse über alle Datensätze hinweg ähnlich. Dies wurde dadurch gefördert, dass die Parameter der rasterbasierten Methode bei der Erstellung der Kronenprojektionen für den jeweiligen Datensatz soweit optimiert wurden, um einen möglichst geringen RMSE zu erhalten. Folglich war der niedrigste RMSE 45 cm. Dies deckt sich in etwa mit der Genauigkeit, welche bei terrestrischen Aufnahmen erreicht werden kann.

Die Kronenansatzhöhe kann auf unterschiedlichste Weisen definiert sein (DEAN et al. 2009; JUNG et al. 2011; KATO et al. 2009; LUO et al. 2018; MUSS et al. 2011; POPESCU & ZHAO 2008; SOLBERG et al. 2006; VAUHKONEN 2008; WALLACE et al. 2014; XU et al. 2013). Jede dieser Studien verwendete hierbei eine andere Definition der Kronenansatzhöhe. Auch die Messfehler variierten von einem RMSE von 1,62 m in SOLBERG et al. (2006) bis zu 3,5 m in LUO et al. (2018). In der vorliegenden Studie konnte selbst der LiDAR-Datensatz mit einem RMSE von 4,5 m keine vergleichbaren Ergebnisse erzielen. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Definition des ersten grünen Astes eine sehr schwierig zu reproduzierende Vergleichsgröße liefert. Es kann aber auch auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass der Kronenansatz in seiner räumlichen Erscheinung von Baum zu Baum eine zu große Variabilität aufweist. So kann der Kronenansatz durch einen kleinen grünen Ast charakterisiert sein oder durch mehrere starke Äste. Zudem können Äste nach oben oder nach unten geneigt sein, was die Bestimmung der Kronenansatzhöhe noch weiter erschwert. Im Mittel konnten jedoch teilweise sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Tatsächlich wichen die Mittelwerte aller 30 Versuchsbäume für die Datensätze UAV-LiDAR, UAV-Kamera und Gyrocopter 2 cm mit rasterbasiertem Ansatz maximal 2 m vom Mittelwert der Feldmessungen ab. Der mittlere Fehler dieser Datensätze lag zwischen -1,83 m und 1,23 m, während der mittlere Fehler für Gyrocopter 5 cm und Standard kleiner als -8,48 m war (siehe Tabelle 4). Dies weist darauf hin, dass der Kronenansatz auf Bestandesebene besser zu beschreiben ist. Auf Einzelbaumebene haben die Ergebnisse jedoch gezeigt, dass eine Bestimmung des Kronenansatzes mit den verfügbaren Daten stark fehlerbehaftet war.

Die Datensätze dieser Studie können auch durch eine unterschiedliche Punktdichte charakterisiert werden. YU et al. (2004) beschrieben für die Ableitung der Baumhöhe eine abnehmende Genauigkeit bei abnehmender LiDAR-Punktdichte bzw. zunehmender Flughöhe, wobei die Flughöhen 400 m, 800 m und 1500 m über Grund getestet wurden. Bei NÆSSET (2004) variierte hingegen nur 1 von 54 LiDAR-Höhenmetriken signifikant zwischen den Flughöhen von 530 m – 540 m und 840 m – 850 m über Grund. Mit den Datensätzen dieser Studie konnte ab einer Punktdichte von 350 Punkten/m² eine höhere Genauigkeit erzielt werden (Vergleich Gyrocopter 2 cm und 5 cm). Für den Kronenradius hatten die Ausreißer bis zu einem Kronenradius von 4 m fast ausschließlich eine Punktdichte kleiner 350 Punkten/m². Da der RMSE bei allen Datensätzen jedoch ähnlich war, konnte auf keinen Zusammenhang zur Punktdichte geschlossen werden. Abbildung 10 zeigt, dass der Kronenansatz sich mit einer zu niedrigen Punktdichte nicht bestimmen lässt und die Abweichung zu den Feldmessungen ab einer Punktdichte von 502 Punkten/m² (Gyrocopter 5 cm) substanziell geringer ist. Bei niedrigeren Punktdichten werden kleine Lücken im Bestand bzw. Kronenränder vermutlich zu schlecht erfasst, sodass das DSM an diesen Stellen interpoliert wird und der untere Kronenbereich nicht ausreichend abgebildet wird. Dies führt zu einer systematischen Überschätzung der Kronenansatzhöhe.

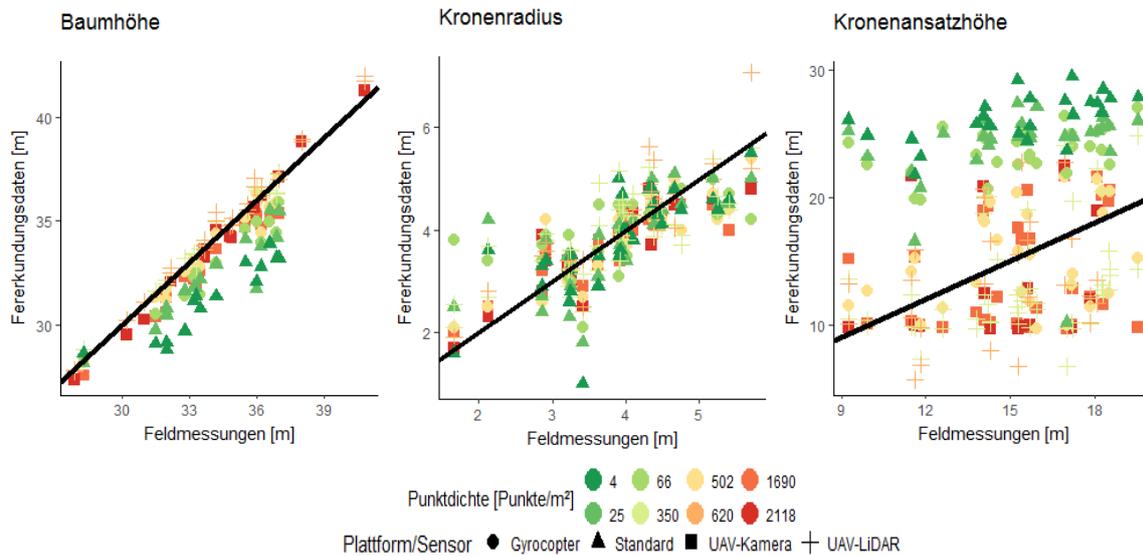


Abb. 10: Streudiagramme zwischen den Feldmessungen und jeweils den abgeleiteten Parametern Baumhöhe, Kronenradius und Kronenansatzhöhe. Die Punktdichte der einzelnen Datensätze wird farblich von grün (= niedrige Punktdichte) bis rot (=hohe Punktdichte) markiert.

Es gab bereits eine Vielzahl an Untersuchungen zur Ableitung von Baumhöhe, Kronendurchmesser und -ansatzhöhe. Vergleichende Studien zielten zwar auf die gleiche Zielgröße, basierten jedoch auf einer unterschiedlichen Datengrundlage und Methodik, was einen Vergleich erschwert, mit einer großen Unsicherheit behaftet bis zu unmöglich macht. Beispielsweise variierten Baumarten, Waldstrukturen, Anzahl und Aufnahmemethodik der Referenzdaten, Bedingungen bei den Befliegungen, Sensorik, Plattform, Kameraeinstellungen, Flugplanung oder die Definitionen der Kronenparameter. Frühere Studien bewerteten meist einen Fernerkundungsdatensatz (PANAGIOTIDIS et al. 2016; GIFTHALER 2017, SIBONA et al. 2017), verglichen zwei Datensätze wie LiDAR- und photogrammetrischen Daten (WALLACE et al. 2016; THIEL & SCHMULLIUS 2016) oder untersuchten beispielhaft den Einfluss von zwei bis drei unterschiedlichen Flughöhen (YU et al. 2004; NÆSSET 2004) oder den Einfluss verschiedener Versuchsflächen (ZARCO-TEJADA et al. 2014; PANAGIOTIDIS et al. 2017). In diesem Beitrag wurden insgesamt 8 Datensätze miteinander verglichen, welche sowohl in der Sensorik (Kamera, LiDAR) als auch in der Aufnahmemethodik (Gyrocopter, UAV, Flugzeug, Flughöhe, Überlappung, Jahreszeit...) variierten, jedoch auf die gleichen Referenzdaten und die gleiche Methodik bei der Ableitung der Parameter zurückgriffen. Dadurch konnte mit einer höheren Sicherheit das Anwendungspotenzial der verschiedenen Sensoren und Plattformen aufgezeigt werden. Solche Vergleiche, wie in der vorliegenden Studie beschrieben, tragen dazu bei das Bewusstsein zu schärfen, dass verschiedene Metriken mehr oder weniger empfindlich auf unterschiedliche Datensätze reagieren können (ROUSSEL et al. 2017).

5 Fazit und Ausblick

Die Ableitung inventurrelevanter Einzelbaumcharakteristika ist mit Einschränkungen möglich. Allerdings setzt die erfolgreiche Anwendung eine korrekte Segmentierung der Einzelbäume voraus. Automatisiert ist dies leider immer noch mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Die Genauigkeiten für die Bestimmung der Baumhöhe und des Kronenradius sind vielversprechend und die entwickelten Methoden ausreichend robust. Der Vergleich von automatisch abgeleiteter Baumhöhe bzw. Kronenradius und terrestrischer Messung fällt für alle Datensätze sehr positiv aus. Für die Ableitung der Baumhöhe sind LiDAR-Daten oder photogrammetrische Daten mit einer hohen Punktdichte und einer guten absoluten Orientierung optimal. Bei der Bestimmung von Kronenradius ist die Wahl des Sensors von geringerer Bedeutung. Die Höhe des Kronenansatzes auf Einzelbaumebene hingegen ist mit einer für die Rundholzsartierung relevanten Definition nicht automatisch bestimmbar. Selbst unter der Verwendung der LiDAR-Daten kann bei der Bestimmung des Kronenansatzes keine höhere Genauigkeit erzielt werden. Die Gründe für diese Ungenauigkeit und auch die im Vergleich zu anderen Untersuchungen entstehenden Widersprüche der Ergebnisse bei der Bestimmung des Kronenansatzes liegen vermutlich in der Definition der Kronenansatzhöhe. Bildet man jedoch den Mittelwert der Kronenansatzhöhen über alle Versuchsbäume, so kann für Datensätzen mit einer ausreichend hohen Punktdichte (UAV-LiDAR, UAV-Kamera, Gyrocopter 2 cm) auf Bestandesebene der Kronenansatz mit höherer Genauigkeit abgeleitet werden. Bei den photogrammetrischen Punktwolken können die besten Ergebnisse mit einer möglichst hohen Punktdichte erzielt werden. Allgemein kann man festhalten, dass die Unterschiede in der Genauigkeit zwischen LiDAR-Daten und photogrammetrischen Daten relativ gering ausfallen. Die Verwendung von Luftbildern wird daher als adäquate und kostengünstige Alternative für die Vermessung von einzelnen Kronen erachtet. WALLACE et al. (2016) stützen diese Bewertung durch eine Untersuchung von LiDAR- und photogrammetrischen Daten zur Analyse von Waldstrukturen. Die Analyse der Reproduzierbarkeit lassen die gleichen Schlussfolgerungen zu wie der Vergleich der Daten mit den Feldmessungen mittels RMSE: Die Baumhöhe lässt sich am zuverlässigsten ableiten. Der Kronenradius lässt sich mit einem akzeptablen Streuung reproduzieren, während die Ableitung des Kronenansatzes je nach Datensatz zu substantiell anderen Ergebnissen führt. Die Anwendung der untersuchten Verfahren kann dazu beitragen, Waldinventuren zu optimieren oder waldwachstumskundliche Versuchsflächen effizienter und standardisiert zu Vermessen.

6 Danksagung

Das in diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft unter dem Förderkennzeichen 22023114 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Studie wurde an der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) durchgeführt. Die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze (UAV-LiDAR, UAV-Kamera, Gyrocopter) sind im Rahmen Projektes „Weiterentwicklung statistischer Holzaufkommensprognoseverfahren zur Differenzierung von Rohholzsorten und Produktqualität (Pro-Qual-Tools)“ entstanden. Die Luftbilder

des Standardbildflugs sowie das Geländemodell wurden vom LGL zur Verfügung gestellt (LGL 2018a; LGL 2018b).

7 Literaturverzeichnis

- DEAN, T., CAO, Q., ROBERTS, S. & EVANS, D., 2009: Measuring heights to crown base and crown median with LiDAR in a mature, even-aged loblolly pine stand. *Forest Ecology and Management*, **257**(1), 126-133.
- JUNG, S., KWAK, D., PARK, T., LEE, W. & YOO, S., 2011: Estimating Crown Variables of Individual Trees Using Airborne and Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing*, **3**(11), 2346-2363.
- KATO, S., MOSKAL, L., SCHIESS, P., SWANSON, M., CALHOUN, D. & STUETZLE, W., 2009: Estimating Crown Variables of Individual Trees Using Airborne and Terrestrial Laser Scanners. *Remote Sensing of Environment*, **113**(6), 1148-1162.
- LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND LANDENTWICKLUNG BADEN-WÜRTTEMBERG, LGL, 2018a: Geobasisdaten © www.lgl-bw.de Az.: 2851.9–1/19.
- LANDESAMT FÜR GEOINFORMATION UND LANDENTWICKLUNG BADEN-WÜRTTEMBERG, LGL, 2018b: Digitale Geländemodelle (DGM). Online: https://www.lgl-bw.de/lgl-internet/opencms/de/05_Geoinformation/Geotopographie/Digitale_Gelaendemodelle/ (Zugriff am 20 Dezember 2018).
- LUO, L., ZHAI, Q., SU, Y., MA, Q., KELLY, M. & GUO, Q., 2018: Simple method for direct crown base height estimation of individual conifer trees using airborne LiDAR data. *Optics Express*, **26**(10), A562-A578.
- MARTENS, S., 2012: Erste Erfahrungen bei der Herleitung ertragskundlicher Parameter für Einzelbäume aus LIDAR-Daten. Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2012, 171-179.
- MUSS, J., MLADENOFF, D. & TOWNSEND, P., 2011: A pseudo-waveform technique to assess forest structure using discrete lidar data. *Remote Sensing of Environment*, **115**(3), 824-835.
- NÆSSET, E., 2004: Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. *Remote Sensing of Environment*, **91**(2), 243-255.
- PRETZSCH, H., 2014: Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, **327**, 251-264.
- PANAGIOTIDIS, D., ABDOLLAHNEJAD, A., SUROVÝ, P., & CHITECULO, V., 2017: Determining tree height and crown diameter from high-resolution UAV imagery. *International journal of remote sensing*, **38**(8-10), 2392-2410.
- POPESCU, S. C., WYNNE, R. H. & NELSON, R. F., 2003: Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian journal of remote sensing*, **29**(5), 564-577.

- POPESCU, S. C., & ZHAO, K., 2008: A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment*, **112**(3), 767-781.
- R CORE TEAM, 2017: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RÖHLE, H., 1986: Vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Genauigkeit bei der Ablo- tung von Kronenradien mit dem Dachlot und durch senkrechtes Anvisieren des Kronen- randes (Hochblick-Messung). *Forstarchiv*, **57**(2):67–71.
- ROUSSEL, J.-R., CASPERSEN, J., BÉLAND, M., THOMAS, S., ACHIM, A., 2017: Removing bias from LiDAR-based estimates of canopy height: Accounting for the effects of pulse density and footprint size. *Remote Sensing of Environment*, **198**, 1-16.
- ROUSSEL, J.-R. & AUTY D., 2018: lidR: Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications. R package version 1.5.0.
- SOLBERG, S., NAESSET, E. & BOLLANDSAS, O., 2006: Single Tree Segmentation Using Airborne Laser Scanner Data in a Structurally Heterogeneous Spruce Forest. *Photogrammetric Engi- neering & Remote Sensing*, **72**(12), 1369-1378.
- THIEL, C. & SCHMULLIUS C., 2017: Comparison of UAV photograph-based and airborne lidar- based point clouds over forest from a forestry application perspective. *International journal of remote sensing*, **38**(8-10), 2411-2426.
- VAUHKONEN, J., 2008: Estimating crown base height for Scots pine by means of the 3D geome- try of airborne laser scanning data. Publikation der University of Joensuu, Faculty of Forest Sciences, Hill R.A., Rosette, J. and Suárez, J. (Editor), 8th international conference on Li- DAR applications in forest assessment and inventory, 17.-19. September 2008 in Edin- burgh, UK, 616-624.
- WALLACE, L., WATSON, C. & LUCIEER, A., 2017: Detecting pruning of individual stems using airborne laser scanning data captured from an Unmanned Aerial Vehicle. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **30**, 76-85.
- WEIDENBACH, M., WEZYK, P., TOMPALSKI, P., HOFFMANN, K. & MARTENS, S., 2012: Erfassung von Einzelbaumparametern mit Airborne-Laser-Scanning-Daten. *AFZ-DerWald*, **21**, 12- 15.
- XU, W., SU, Z., FENG, Z., XU, H., JIAO, Y. & YAN, F., 2012: Comparison of conventional meas- urement and LiDAR-based measurement for crown structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, **98**, 242-251.
- YU, X., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., & MALTAMO, M., 2004: Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. *Proceedings of the Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment–Instruments, Processing Methods and Applications*, 02-06.
- ZARCO-TEJADA, P. J., DIAZ-VARELA, R., ANGILERI, V., & LOUDJANI, P., 2014: Tree height quan- tification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. *European journal of agronomy*, **55**, 89-99.