

Untersuchung des Potentials von multi-temporalen TLS-Daten zum Monitoring des Wachstums von Laubbäumen

SOPHIA BÖHME¹, ANNE BIENERT¹ & KATJA RICHTER¹

Zusammenfassung: Ziel dieser Arbeit ist die Analyse des Potentials multi-temporaler Daten eines terrestrischen Laserscanners für das Wachstumsmonitoring von Laubbäumen. Die Messungen wurden an einer Amerikanischen Weiß-Eiche während der Phase des Blattaustriebs von April bis Mai 2022 mit Scanintervallen von einem bis sechs Tagen durchgeführt. Für die Analyse der Messdaten werden Punktwolkenvergleiche, Forstinventurparameter (Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser, Kronenschirmfläche, Kronendurchmesser und Kronenvolumen), sowie aus den Punktwolken extrahierte Voxel verwendet. Mit Hilfe der Punktwolkenvergleiche und der Forstinventurparameter kann das Wachstum indirekt abgeschätzt werden. Die volumetrische Auswertung erwies sich ebenfalls als geeignet. Eine experimentelle Untersuchung an einem Modellbaum wird durchgeführt, um die angewandte Methodik zu validieren.

1 Einleitung

Der Beitrag befasst sich mit der Überwachung des Wachstums von Laubbäumen auf der Grundlage von hochfrequenten multi-temporalen terrestrischen Laserscanner-Daten (TLS). Die Analyse der Vegetationsstruktur während des Blattaustriebs kann Aufschluss über die Veränderung der Anpassungsfähigkeit der Bäume während des Klimawandels geben. In der Arbeit wird eine Amerikanische Weiß-Eiche (*Quercus alba* L.) untersucht, die ein zentrales Element des sächsischen Waldumbaus darstellt.

Gegenwärtig befassen sich nur wenige Studien mit dem Wachstums-Monitoring in hochfrequenten Zeitintervallen. CAMPOS et al. (2021) stellen eine automatisierte TLS-Messstation vor, die über einen Zeitraum von 2,5 Monaten Daten eines ca. 4,5 Hektar großen Waldstückes erfasst. Informationen zum Baumwachstum werden unter anderem aus Kronenvolumenänderungen und volumetrischen Analysen abgeleitet. Weitere Studien beschäftigen sich mit der automatisierten Ableitung von Forstinventurparametern (MAAS et al. 2008; LIANG et al. 2012; BIENERT 2013).

In der vorliegenden Arbeit wird das Potential multi-temporaler TLS-Daten für das Wachstums-Monitoring während des Blattaustriebs der Amerikanischen Weiß-Eiche analysiert und bewertet. Dazu wird ein Konzept zur Ableitung von Wachstumsparametern aus den TLS-Punktwolken entwickelt, das auf der Nutzung klassischer Forstinventurparameter, moderner Punktwolkenverarbeitungsmethoden und volumetrischer Auswerteverfahren basiert. Auf diese Weise können Blattaustrieb und Hauptwachstumsperiode datiert werden. Da es keine Referenzdaten gibt, stellt die Validierung der Ergebnisse eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund werden in einem praktischen Experiment (BÖHME 2023) an einem Modellbaum Referenzdaten erzeugt und die TLS-Daten mit

¹ Technische Universität Dresden, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung,
Helmholtzstraße 10, D-01069 Dresden,
E-Mail: sophia.boehme1@mailbox.tu-dresden.de; [anne.bienert, katja.richter1]@tu-dresden.de

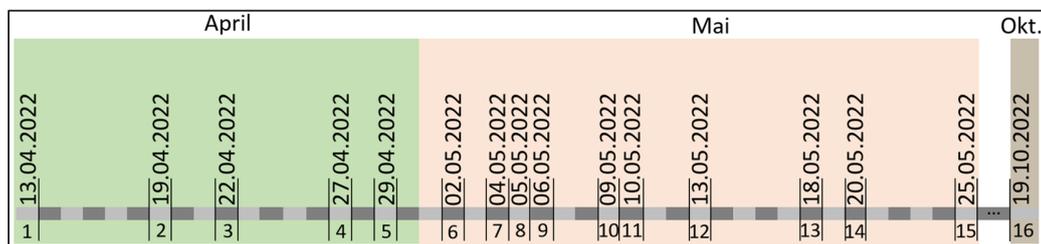
diesen verglichen. Im Folgenden werden die beiden Datensätze als Datensatz Eiche und als Datensatz Modellbaum bezeichnet.

2 Methodik

2.1 Datenaufnahme des Datensatzes Eiche

Die Messungen wurden während der Wachstumsperiode von Mitte April bis Ende Mai durchgeführt. Mitte Oktober erfolgte eine Zusatzmessung. Die genauen Aufnahmezeitpunkte sind in Tabelle 1 zu finden, wobei jeder graue Kasten einen Tag darstellt. Jede Messung wird als Epoche (E) bezeichnet. Zwischen den Messepochen E15 und E16 liegen 147 Tage.

Tab. 1: Aufnahmezeitpunkte der TLS-Daten des Datensatzes Eiche



Die Aufnahmen erfolgten mit 40 mdeg Auflösung bei windstillen Verhältnissen von jeweils vier diametral angeordneten Standpunkten mit dem terrestrischen Laserscanner RIEGL VZ-400i. Die Scannerstandpunkte befanden sich in jeder Epoche ca. 15 m von dem Baum entfernt auf den nahezu gleichen Positionen. Während jeder Messung wurden Fotos des immer gleichen Astes mit einer Kamera gemacht, um das Wachstum alternativ zu dem Laserscanner zu dokumentieren.

2.2 Auswertung des Datensatzes Eiche

Um die Daten der Eiche auswerten zu können, werden sie zunächst in der Scanner-eigenen Software RiSCAN Pro (2.8) aufbereitet. Dies beinhaltet die Registrierung der Punktwolken in Bezug zur ersten Epoche, die Reduzierung auf den Untersuchungsbereich, die Extraktion der Voxel, sowie den Export der Daten in einem geeigneten Format. Anschließend können Wachstumsparameter abgeleitet werden.

Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung von Wachstum sind Punktwolkenabstände und Forstinventurparameter (Baumhöhe, Brusthöhendurchmesser (BHD), Kronenschirmfläche, Kronendurchmesser, Kronenvolumen), deren Grundlage 3D-Punkte sind, sowie die Voxelanzahl.

Punktwolkenvergleiche: Die in CloudCompare (2.12.3) implementierten Algorithmen Multiscale Model to Model Cloud Comparison (M3C2, LAGUE et al. 2013) und Cloud-to-Cloud Distance (C2C) ermöglichen den Vergleich von Punktwolken aufeinanderfolgender Epochen. Beim M3C2-Vergleich wird zunächst eine Schätzung der Oberflächennormalen und der 3D-Orientierung durchgeführt. Anschließend werden die mittleren Flächenänderungen entlang der Normalenrichtungen berechnet. Einzigartig ist die Berücksichtigung des Registrierfehlers bei der Berechnung, wodurch Deformationen im Gegensatz zum C2C-Vergleich signifikant bestimmt werden. Die Standardabweichungen der Feinregistrierung werden in RiSCAN Pro berechnet. Der Mittelwert

der Standardabweichungen aller Epochen von 0,88 cm geht als Registrierfehler in den M3C2-Vergleich ein. Beim C2C-Vergleich wird für jeden Punkt der gewählten Referenzpunktwolke der nächstgelegene Punkt in der Vergleichspunktwolke gesucht und deren Abstand berechnet.

Forstinventurparameter: Die Generierung der Parameter erfolgt mit der Software LiDAR360 (5.3). Um Einzelbaumparameter ableiten zu können, werden zunächst die Bodenpunkte klassifiziert. Anschließend wird ein digitales Geländemodell generiert, auf dessen Grundlage die Normalisierung der Daten auf ein einheitliches Höhenniveau erfolgt. Nach der Segmentierung des Baumes werden Baumhöhe, BHD, Kronenschirmfläche, -durchmesser und -volumen berechnet. Die Ergebnisse werden in Diagrammen visualisiert.

Voxelraumanalyse: Die volumetrischen Repräsentationen werden in Matlab (R2021a) ausgewertet. Da nur dann ein Voxel erzeugt wird, wenn mindestens drei Punkte darin liegen, gibt die Anzahl der Voxel indirekt Aufschluss über die Menge an Biomasse und sie kann zur Wachstumsbeschreibung herangezogen werden.

2.3 Datensatz Modellbaum

Im ersten Teil der Untersuchung wurden 19 verschieden große Blätter des Kolchischen Ahorn (*Acer cappadocicum*) an einem Gestell befestigt und mit dem Laserscanner RIEGL VZ-400i gescannt (Abb. 1). Die verschiedenen Blattgrößen stellen eine Wachstumssimulation dar. Der Laserscanner wurde tiefer als das Gestell aufgebaut, um die Höhe und das schräge Scannen eines Baumes zu simulieren. Die Messungen wurden mit einer Pulsrate von 1200 kHz und mit den Scanauflösungen 0,5 cm, 1 cm, 1,5 cm, und 2 cm durchgeführt. Anschließend wurden die Ahornblätter der fünf Scans manuell ausgeschnitten und von Streupunkten bereinigt. Jedes Blatt wird als Punkt- wolke gespeichert und die Eckpunkte der konkaven Hüllen der Blätter berechnet. Dabei wird die Blattebene über eine Hauptachsenanalyse und den kleinsten Eigenwert in die XY-Ebene des Koordinatensystems transformiert. Aus der konkaven Hülle wird anschließend der Flächeninhalt der Einzelblätter berechnet.

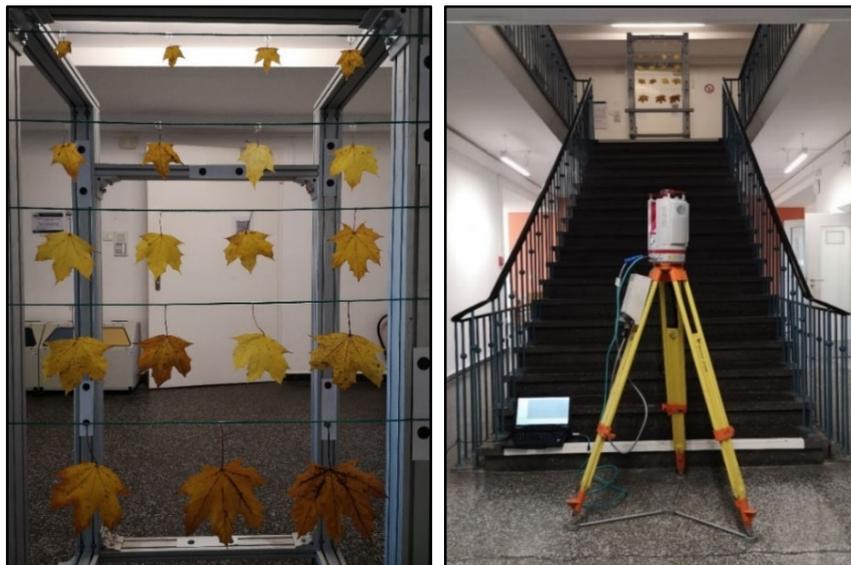


Abb. 1: Ahornblätter an dem Metallgestell (links), Position des TLS zu den Ahornblättern (rechts)

Im zweiten Teil der Untersuchung wurden die Ahornblätter auf ein A4-Blatt geklebt und mit einem Büros scanner gescannt. Dabei wurden die Stiele der Blätter entfernt, da diese in den TLS-Daten nicht enthalten sind. Mit Methoden der Bildverarbeitung wurde anschließend der Flächeninhalt der Einzelblätter berechnet.

3 Ergebnisse und Interpretation

3.1 Punktwolkenvergleiche mittels der M3C2-Methode

Die Punktwolkenabstände werden mittels des M3C2-Vergleiches in CloudCompare von Epoche zu Epoche berechnet und dargestellt (Abb. 2).

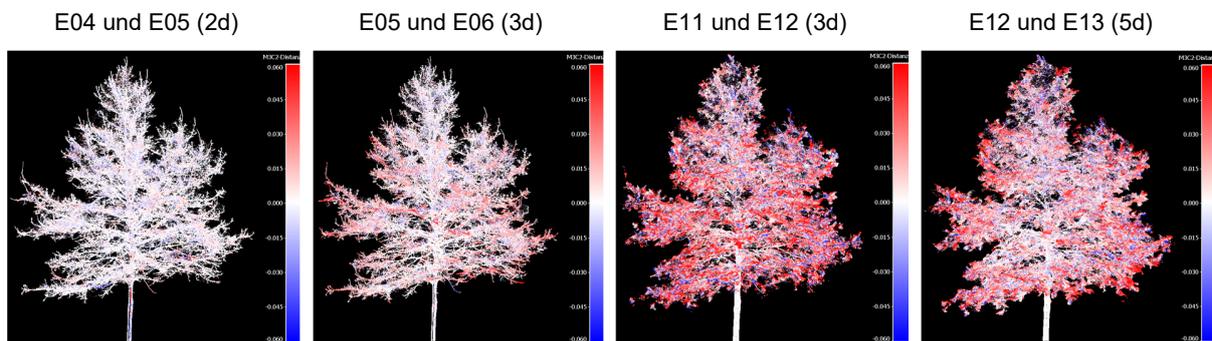


Abb. 2: Ergebnisse M3C2-Vergleich (in Klammern steht der Abstand zwischen den Scans in Tagen d)

Die erste deutliche Veränderung tritt zwischen E5 und E6 ein, wobei Differenzen bis zu 4,5 cm berechnet werden. Dieser Zeitpunkt stellt den Blattaustrieb dar. Zur Bestätigung dieser Aussage werden die aufgenommenen Fotos herangezogen, auf denen der Blattaustrieb zwischen E5 und E6 deutlich zu erkennen ist (Abb. 3).



Abb. 3: Fotos der Epochen 5 und 6: 29. April 2022 (links); 02. Mai 2022 (rechts)

Das größte Wachstum, von bis zu 6 cm, findet von E11 zu E12 statt. Weitere große Veränderungen sind von E12 zu E13 zu verzeichnen. Danach flacht das Wachstum ab. Zwischen E12 und E13 liegen fünf Tage, während die Zeitdifferenz zwischen E11 und E12 nur drei Tage beträgt. Anhand der unterschiedlichen Aufnahmeintervalle ist das Abflachen des Wachstums ab E12 gut zu erkennen. Dies markiert das Ende der Hauptwachstumsperiode.

Bei dem Vergleich von E15 und E16 werden Differenzen bis 30 cm festgestellt. Diese Differenzen können in den Fotos nicht nachgewiesen werden. Weitere Untersuchungen zeigen, dass die Astabsenkung, die durch die Gewichtszunahme der Blätter verursacht wird, einen zunehmenden syste-

matischen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Abb. 4 zeigt zur Veranschaulichung das Absenken ausgewählter Äste. Bereits bei einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden ist das Tieferhängen der Äste der später aufgenommenen Epoche zu beobachten (Abb. 4 links). Die größte Differenz ist zwischen E15 und E16 zu verzeichnen (Abb. 4 rechts) und auf die große Zeitdifferenz zwischen diesen Messungen zurückzuführen. Anhand der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Astabsenkung proportional zum Blattwachstum verläuft. Die mit dem M3C2-Vergleich berechneten Differenzen sind überwiegend auf die Astabsenkung zurückzuführen. Da die Astabsenkung mit dem Blattwachstum korreliert ist, ermöglicht diese Auswertungsstrategie eine indirekte, relative Abschätzung des Wachstums.

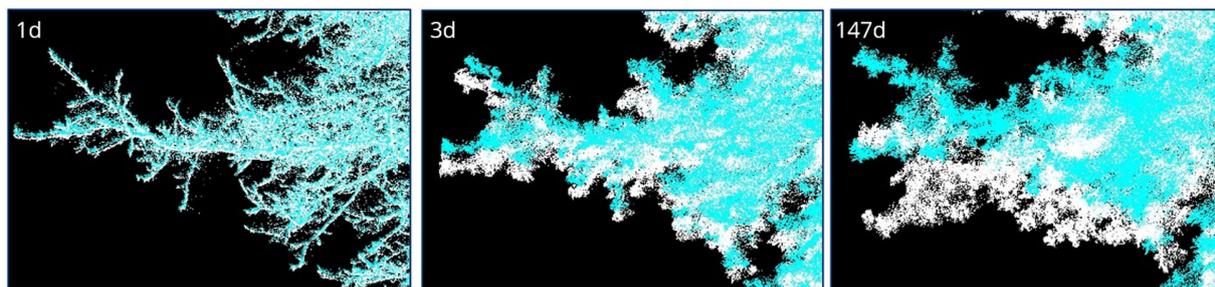


Abb. 4: Vergleich der Astpositionen: E7 und E8 (links), E11 und E12 (Mitte) und E15 und E16 (rechts) - Türkis: zeitiger aufgenommene Epoche, Weiß: später aufgenommene Epoche, jeweils oben links: Abstand zwischen den Scans in Tagen d

Die Astabsenkung erklärt auch die überwiegend positiven Differenzen (rot eingefärbt) in Abb. 2. Bei der M3C2-Berechnung wird die später aufgenommene Epoche als Referenz genutzt. Die Differenzen werden ausgehend von der Referenzeпоche berechnet. Bei dieser hängen die Äste durch die Astabsenkung jeweils tiefer, wodurch die Differenzen meist positiv werden.

Mit dem C2C-Vergleich werden die gleichen Ergebnisse wie bei dem M3C2-Vergleich erzielt.

3.2 Forstinventurparameter und Voxelraumanalyse

Die aus den Punktwolken abgeleiteten Forstinventurparameter Baumhöhe, Kronenvolumen und Kronenschirmfläche sowie die aus der volumetrischen Analyse abgeleitete Voxelanzahl sind in Abbildung 5 dargestellt. Da der Kronendurchmesser direkt aus der Kronenschirmfläche abgeleitet wird, verlaufen beide Kurven gleich. Es wird daher auf die Darstellung des Kronendurchmessers verzichtet. Der BHD hat sich nicht signifikant verändert und wird deshalb ebenfalls nicht visualisiert.

Die Kurvenverläufe von Kronenparametern und Voxelanzahl sind sehr ähnlich. Der erste größere Anstieg erfolgt zwischen E5 und E7. Dies markiert den Zeitpunkt des Blattaustriebes. Die Baumhöhe wächst erst ab E7 an, da sich genau an der Baumspitze kein Trieb befindet. Bei den Kronenparametern und der Voxelanzahl flachen die Kurven ab E12 bzw. E14 ab, was auf eine Hauptwachstumsperiode von ca. drei Wochen schließen lässt. Der Anstieg der Baumhöhe wird durch das Abknicken der Baumspitze unterbrochen, weswegen aus diesem Parameter keine Hauptwachstumsperiode abgeleitet werden kann. Von E15 zu E16 verhält sich das Kronenvolumen anders als die Kronenschirmfläche. Dies ist auf den Einfluss der Astabsenkung zurückzuführen. Für die Berechnung des Kronenvolumens, wird die senkrechte Baumausdehnung genutzt. Senken sich die

Äste ab, streckt sich der Baum in der Länge und das Kronenvolumen wird größer bestimmt. Bei der Kronenschirmfläche vergrößert sich die zur Berechnung genutzte Projektionsfläche nicht. Auch auf die Voxelanzahl wirkt die Astabsenkung. Über das Wachstum von E15 zu E16 kann demnach keine Aussage getroffen werden.

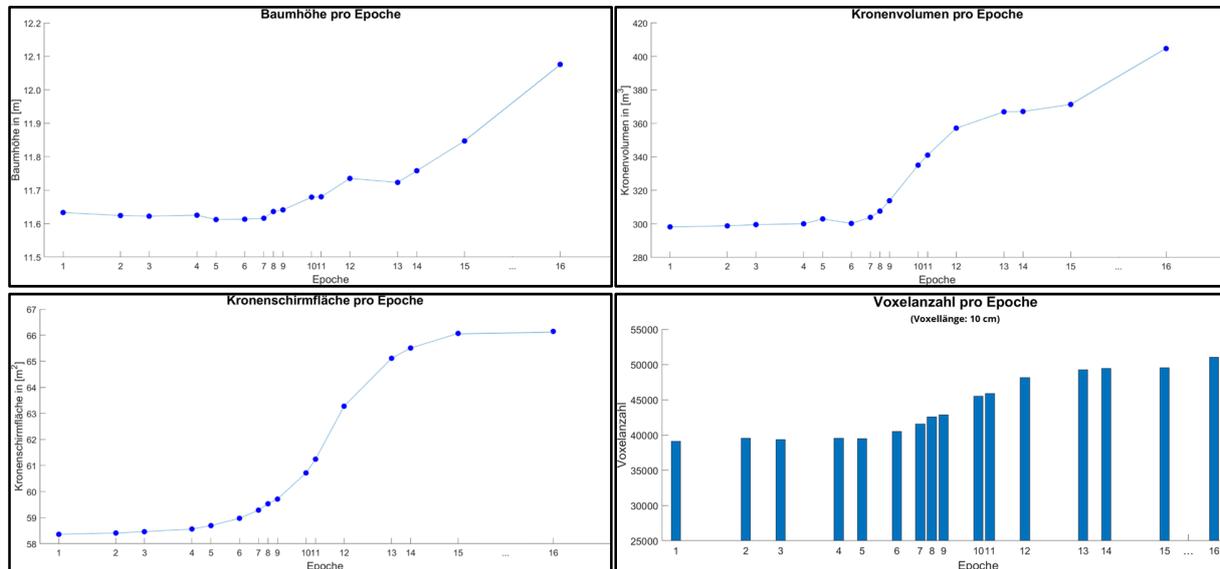


Abb. 5: Baumhöhe (oben links), Kronenvolumen (oben rechts), Kronenschirmfläche (unten links) und Voxelanzahl (unten rechts) pro Epoche

3.3 Flächeninhalte aus der experimentellen Untersuchung an dem Modellbaum

Abbildung 6 zeigt die Flächeninhalte der Bildverarbeitung (Binarisierung) und der TLS-Messung pro Blatt. Die Werte der Binarisierung stellen die Referenzdaten für das simulierte Wachstum dar. Im Diagramm ist eine stetige Zunahme der Flächeninhalte der Binarisierung und aller TLS-Daten zwischen Blatt 1 und Blatt 19 zu sehen. Bis Blatt 9 bilden die TLS-Daten mit 2 cm Auflösung das Wachstum nicht exakt ab, da die Blattgröße im Verhältnis zur Scanauflösung zu klein ist. Weiterhin fällt auf, dass die Werte aus den TLS-Daten immer kleiner sind als die der Binarisierung. Während der Digitalisierung mit dem Büros Scanner, werden die Blätter flach gepresst. Durch Drehung, schräge Sicht und Krümmung sind die Blätter an dem Gestell jedoch nicht immer senkrecht zum Laserscanner ausgerichtet. Dadurch wird der Flächeninhalt zu klein bestimmt. Je größer die Blätter werden, desto größer werden auch diese Effekte und desto mehr weichen die Ergebnisse aus der Binarisierung von den TLS-Daten ab. Außerdem werden die Flächeninhalte aus den TLS-Daten mit Abnahme der Auflösung überwiegend kleiner. Es kann nicht sichergestellt werden, dass die berechneten Randpunkte der konkaven Hülle die realen Randpunkte der Blätter repräsentieren. Je größer die Auflösung ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass der Laserstrahl nicht genau den Randpunkt detektiert, sondern ein Objekt, welches sich weiter im Hintergrund befindet. Im Zuge des manuellen Ausschneidens wurden weit hinten liegende Punkte entfernt, wodurch den Blättern Randpunkte fehlen und der Flächeninhalt folglich zu klein bestimmt wird.

Die festgestellten Trends gelten nicht für die Blätter 9 bis 12 und 14 bis 16. Diese Blätter hängen am Gestell in den Reihen drei und vier und haben scheinbar eine ungünstige Lage zum Scanner. Um die Werte zu überprüfen, müssten jedoch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Werden relative Werte benötigt, eignen sich alle hier getesteten Auflösungen, außer 2 cm, für die Aufnahme. Soll ein großes Gebiet terrestrisch gescannt werden, ist zu überlegen, ob die geringere Genauigkeit die kürzere Scandauer und schnellere Rechenzeit in der Nachbearbeitung aufwiegt.

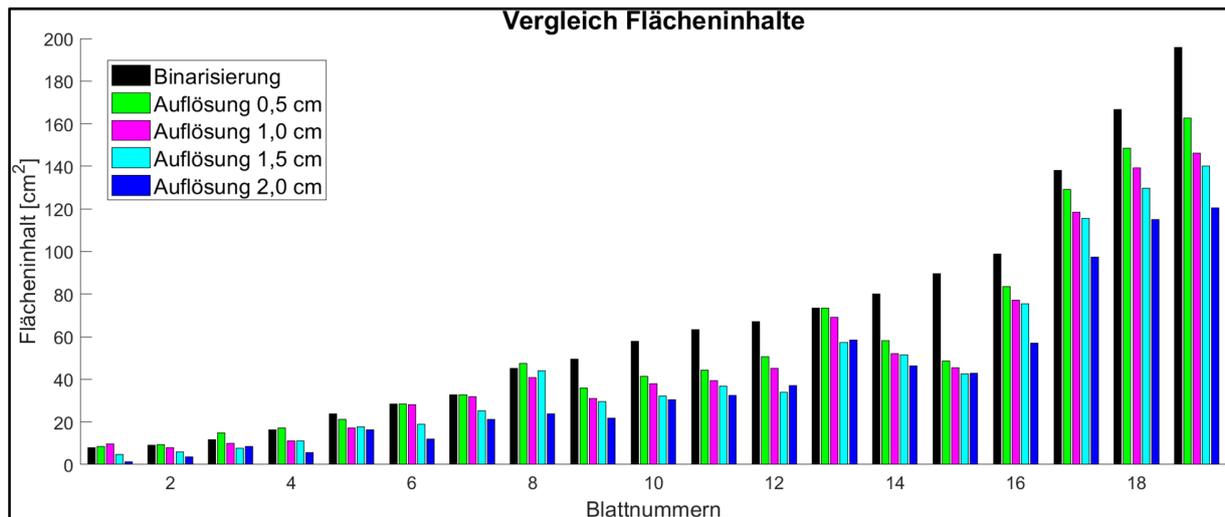


Abb. 6: Gegenüberstellung der Flächeninhalte aus der Binarisierung und der TLS-Messung

4 Diskussion

Die Methoden, die zur Auswertung der TLS-Daten verwendet werden, haben einen großen Einfluss darauf, ob das Wachstum bestimmt werden kann oder nicht. Sie haben zudem unterschiedliche Vor- und Nachteile.

Bei dem C2C-Vergleich werden keine zusätzlichen Parameter benötigt, wodurch ein schneller Überblick über Deformationen möglich ist. Jedoch muss bei der Interpretation der Ergebnisse die Registriergenauigkeit beachtet werden. Beim M3C2-Vergleich sind dagegen durch die Angabe des Registrierfehles Informationen über die Signifikanz der Ergebnisse vorhanden. Die Forstinventurparameter können automatisiert berechnet werden. Die Baumhöhe ist jedoch anfällig für Windeinflüsse oder Abknicken. Kronenschirmfläche, -durchmesser und -volumen, sowie die Voxelanzahl zeigen ab dem Zeitpunkt des Blattaustriebes zuverlässig Wachstum an. Beim Monitoring des Frühjahrswachstum muss der BHD nicht betrachtet werden, da das Stammwachstum in diesem Zeitraum nur marginal ist. Insgesamt wirkt auf alle Parameter die Astabsenkung als systematischer, zeitabhängiger Effekt, wodurch nur relative und keine absoluten Werte für das Wachstum ableitbar sind. Auch die Ableitung relativer Veränderungen ist nur möglich, wenn die zeitliche Auflösung so gering ist, dass der Einfluss der Astabsenkung nicht übermäßig ins Gewicht fällt. Bei der Auswertung ist immer von positivem Wachstum auszugehen, da sonst auch eine Asthe-

bung bei Laubfall als Wachstum interpretiert wird. Können die beeinflussenden Effekte differenziert und aus den Ergebnissen eliminiert werden, zeigen die multi-temporalen TLS-Daten ab einer zeitlichen Auflösung von 24 Stunden zuverlässig Wachstum an.

Für die in dieser Arbeit untersuchte Eiche kann der Blattaustrieb auf die Zeit zwischen dem 30. April und dem 03. Mai datiert werden. Die Hauptwachstumsperiode beginnt mit dem Blattaustrieb und endet in der Woche zwischen dem 13. und dem 20. Mai.

Der direkte Vergleich der Datensätze Eiche und Modellbaum ist durch den unterschiedlichen Aufbau und die verschiedene Datenauswertemethoden nicht möglich. Jedoch können Erkenntnisse des Datensatzes Modellbaum auf den Datensatz Eiche übertragen werden. Die Auflösung des Datensatzes Eiche beträgt 1 cm in 15 m Entfernung. In dem Datensatz Modellbaum sind die Ergebnisse der Daten mit einer Auflösung von 1 cm nicht am aussagekräftigsten. Sie bilden das Wachstum dennoch zuverlässig ab. Für zukünftige Messepochen ist zu überlegen, die Auflösung des Datensatzes Eiche zu erhöhen. Soll ein größeres Waldstück gescannt werden, ist es aufgrund der längeren Aufnahmezeiten jedoch sinnvoll, eine niedrigere Auflösung zu wählen. Die Tatsache, dass der relative Fehler in den Ergebnissen des Datensatzes Modellbaum mit der Blattgröße zunimmt, kann sich im Datensatz Eiche durch Ergebnisse mit geringerer Genauigkeit in den späteren Epochen äußern. Überprüft werden kann das hier nicht, da keine Genauigkeiten der Ergebnisse des Datensatzes Eiche erhoben wurden. Weiterhin werden mit Hilfe der TLS-Daten alle Blattflächeninhalte zu klein bestimmt. Beim Datensatz Modellbaum ist dies auf gekrümmte und verdrehte Blätter zurückzuführen. Beim Datensatz Eiche können zu geringe Blattflächeninhalte durch schräge Sicht auf die Blätter oder durch Wind verursacht werden. Außerdem werden bei dem Datensatz Eiche allein durch die verwendete Berechnungsmethode die Kronenparameter immer zu groß bestimmt. Diese zu großen Bestimmungen durch die Auswertemethodik treten systematisch auf, d.h. es können dennoch relative Veränderungen bestimmt werden.

5 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wird das Potential multi-temporaler TLS-Daten für das Wachstumsmonitoring eines Einzelbaumes untersucht. Auf alle Ergebnisse wirkt die Astabsenkung, verursacht durch sich erhöhendes Blattgewicht, als zunehmender systematischer Effekt. Während des betrachteten Zeitraumes findet kein Stammwachstum statt. Mit Hilfe von Punktwolkenvergleichen, Forstinventurparametern und der Voxelanzahl kann jedoch aus den multi-temporalen TLS-Daten das Wachstum abgeleitet werden, wenn folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- I. Durch die Astabsenkung sind nur indirekte Abschätzungen des Wachstums möglich.
- II. Die Ableitung relativer Veränderungen ist nur bei zeitlich hoher Auflösung möglich.
- III. Es muss vorausgesetzt werden, dass das Wachstum positiv ist.

Im zweiten Teil der Veröffentlichung wird eine experimentelle Untersuchung durchgeführt, wobei Referenzflächeninhalte mit aus TLS-Daten berechneten Flächeninhalten verglichen werden. Bei einer Auflösung der TLS-Daten von 0,5 cm werden die Veränderungen der Flächeninhalte am genauesten abgebildet. Die Daten mit einer Auflösung von 2 cm bilden das Wachstum nicht mehr

zuverlässig ab. Die Flächeninhalte aus den TLS-Daten sind immer kleiner als die Referenzflächeninhalte, wobei sich dieser Effekt mit zunehmender Blattgröße vergrößert.

Eine Validierung der Methodik, welche für die Auswertung des Datensatzes Eiche verwendet wird, ist durch die Untersuchung des Modellbaumes nicht möglich, da verschiedene Methoden angewendet werden. Jedoch wird bestätigt, dass die Wahl der Auflösung bei der Aufnahme des Datensatzes Eiche zweckmäßig war und das absolute Werte zu groß bestimmt werden.

In Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Daten wird in zukünftigen Studien ein regelmäßiges Aufnahmeintervall von 24 Stunden empfohlen. Auch könnten meteorologische Daten, wie Windgeschwindigkeit und Temperatur erfasst werden, um die Ergebnisse besser validieren zu können. Weiterhin ist eine automatisierte Quantifizierung der Astabsenkung mit Hilfe quantitativer Strukturmodelle (BIENERT et al. 2018) des Baumgestübes erstrebenswert.

6 Literaturverzeichnis

- BIENERT, A., 2013: Automatische Extraktion von 3D-Baumparametern aus terrestrischen Laserscannerdaten (Dissertation). Deutsche Geodätische Kommission, München, Heft Nr. 705.
- BIENERT, A., GEORGI, L., KUNZ, M., MAAS, H.-G. & VON OHEIMB, G., 2018: Comparison and Combination of Mobile and Terrestrial Laser Scanning for Natural Forest Inventories. *Forests*, **9**(7), 395, <https://doi.org/10.3390/f9070395>.
- BÖHME, S., 2023: Untersuchung des Potentials von multi-temporalen TLS-Daten zum Monitoring des Wachstums von Laubbäumen. Bachelorarbeit am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (unveröffentlicht).
- CAMPOS, M. B., LITKEY, P., WANG, Y., CHEN, Y., HYYTI, H., HYYPPÄ, J. & PUTTONEN, E., 2021: A Long-Term Terrestrial Laser Scanning Measurement Station to Continuously Monitor Structural and Phenological Dynamics of Boreal Forest Canopy. *Frontiers in Plant Science*, **11**, 606752, <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.606752>.
- LAGUE, D., BRODU, N. & LEROUX, J., 2013: Accurate 3D comparison of complex topography with terrestrial laser scanner: Application to the Rangitikei canyon (N-Z). *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, **82**, 10-26, <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2013.04.009>.
- LIANG, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., HOLOPAINEN, M. & MELKAS, T., 2012: Detecting Changes in Forest Structure over Time with Bi-Temporal Terrestrial Laser Scanning Data. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, **1**(3), 242-255, <https://doi.org/10.3390/ijgi1030242>.
- MAAS, H.-G., BIENERT, A., SCHELLER, S. & KEANE, E., 2008: Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *Int. J. Remote Sens.*, **29**(5), 1579-1593, <https://doi.org/10.1080/01431160701736406>.