



Mathematisch - Naturwissenschaftliche Fakultät
Institut für Umweltwissenschaften und Geographie

Bachelorarbeit im Studiengang Geoökologie

Einzelbaumbasierte Quantifizierung der oberirdischen
Biomasse in zwei Obstkulturen (*Prunus avium* L. und *Malus
domestica* BORKH.) am Standort Marquart

Wibke Linde Richter

792767

Betreuer:

Dr. Maik Heistermann

Dr. Till Francke

31. März 2021

Soweit nicht anders gekennzeichnet, ist dieses Werk unter einem Creative-Commons-Lizenzvertrag Namensnennung 4.0 lizenziert.

Dies gilt nicht für Zitate und Werke, die aufgrund einer anderen Erlaubnis genutzt werden.

Um die Bedingungen der Lizenz einzusehen, folgen Sie bitte dem Hyperlink:

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>

Online veröffentlicht auf dem

Publikationsserver der Universität Potsdam:

<https://doi.org/10.25932/publishup-50636>

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:kobv:517-opus4-506369>

Danksagung

Mein größter Dank gilt all denen, die mich bei der aufwändigen Feldarbeit mit Rat und Tat unterstützten. Den Mitarbeitern der Außenstelle des ATB in Marquart, insbesondere Benjamin Trost und Sibylle Biederstädt, danke ich für die Versorgung mit Eckdaten über die Anlage und jeglichem benötigten Equipment.

Ebenso für die Hilfe vor Ort möchte ich mich bei Sophia Dobkowitz und meinem Betreuer Maik Heistermann bedanken, der die feine Abstimmung zwischen Unterstützung und der Aufmunterung zum Übernehmen eigener Verantwortung fantastisch beherrscht.

Vielen Dank an Nikos Tsoulas vom ATB für die Bereitstellung der hier verwendeten Laserscandaten und die persönliche Diskussion darüber.

Mein abschließender Dank gilt Lissy, die nach kalten Tagen im Feld mit Wärme und einem offenen Ohr für mich da war.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
1 Einleitung	1
2 Untersuchungsgebiet	6
3 Methoden	8
3.1 Datenerhebung	8
3.2 Datenaufbereitung	11
3.3 Berechnung der Biomasse	12
3.4 Regressionsanalyse	13
4 Ergebnisse	15
4.1 Holzdichte	15
4.2 Verholzte oberirdische Biomasse	16
4.3 Vorhersagemodelle	17
4.4 Laubmasse	20
5 Diskussion	23
5.1 Repräsentativität der Stichproben	23
5.2 Verhältnis zwischen ABM und Laubmasse	23
5.3 Rolle der Durchmesserklassen	24
5.4 Prädiktoren und Vorhersagemodelle	25
5.5 Abschätzung des Wassergehalts	28
6 Schlussfolgerung	29
Referenzen	31

Zusammenfassung

Die Quantifizierung der Biomasse von Pflanzen mithilfe effizienter Messmethoden hat für verschiedene Wissenschaftsbereiche eine große Bedeutung. Die vorliegende Arbeit soll es ermöglichen, über die einzelbaumbasierte Schätzung der oberirdischen Biomasse einer Apfel- und einer Kirschkultur am Forschungsstandort Marquart (Potsdam) auf die Menge des in ihr enthaltenen Wasserstoffs zu schließen. Hierzu wurde das Volumen von 13 Kirsch- und 11 Apfelbäumen bestimmt, indem sie in Segmente unterteilt, diese einzeln vermessen und in Durchmesserklassen eingeteilt wurden. Des Weiteren wurden die Dichte der Zweige und die mittlere Laubmasse bestimmt. Zur Berechnung der Biomasse wurde zusätzlich ein Literaturwert der Holzdichte der entsprechenden Baumarten herangezogen. Es wurde die Verteilung der Holzbiomasse auf die einzelnen Durchmesserklassen untersucht und einfach zu erhebende Baumparameter, sowie Daten eines Terrestrischen Laserscanners als Prädiktorvariablen für eine Regressionsanalyse herangezogen.

Die experimentell ermittelten Dichtewerte zeigten eine Zunahme mit steigendem Zweigdurchmesser. Dabei wichen sie beim Kirschbaumholz leicht, beim Apfelbaumholz stärker vom Literaturwert ab.

Die Erhebungen zur Laubmasse wurden unabhängig von den vermessenen Bäumen gemacht und die Ergebnisse unterlagen großer Varianz, weshalb kein Zusammenhang zwischen Holz- und Laubbiomasse hergestellt und nur durchschnittliche Werte ermittelt werden konnten.

Der Anteil der verschiedenen Durchmesserklassen an der Gesamtmasse erwies sich als stark variabel und eine Schätzung der Biomasse aus dem Gewicht weniger kräftiger Baumsegmente daher als nicht geeignet.

Eine zuverlässige und effiziente Abschätzung der oberirdischen verholzten Biomasse kann jedoch durch die Anwendung der erstellten Modelle erreicht werden. Für die vorliegende Population gleichaltriger und ähnlich großer Individuen wurden mit einer linearen Regression die besten Ergebnisse erzielt. Während die auf Laserdaten basierenden Variablen kaum mit der Holzbiomasse korrelierten, zeigten lineare Modelle mit dem Stammdurchmesser d bzw. d^2 als Prädiktor bei beiden Baumarten eine hohe Signifikanz (p -Wert < 0.001) und sehr gute Anpassung ($R^2 > 0.8$).

Abstract

The quantification of plant biomass using efficient methods is a crucial point in different fields of science. This paper aims to facilitate the determination of hydrogen content of cherry and apple trees at a research site in the north east of Germany using the estimation of their biomass based on the sampling of single trees. Therefore the volume of 13 cherry and 11 apple trees was determined by dividing them into segments and measuring the specific length and diameter. All segments were grouped by diameter classes. Furthermore the wood density of the branches and the mean leaf biomass was determined. For the calculation of woody biomass a value for wood dry density derived from the literature for each species was used. The biomass allocation across the diameter classes was investigated and a regression analyses implemented using easily measurable tree parameters as well as data derived by a terrestrial laser scanner.

The experimental density values increased with increasing branch diameter. The deviation to the literature value was small for the cherry wood but large for the apple wood.

The investigation of leaf biomass was carried out independently from measured trees, so no relation could be established between woody and leaf biomass and only mean values were calculated.

The proportion of different diameter classes at the whole tree biomass was highly variable and thus an estimation using only the substantial tree compartments does not show appropriate results.

The most reliable and efficient way to estimate the aboveground biomass is by utilizing the developed models. A linear regression turned out to provide the best results for the present tree populations of same age and similar size. While the laser scan data did not correlate with the dry wood biomass, the linear models utilizing the stem diameter d or d^2 as predictor indicated high significance (p-value < 0.001) and a very good model fit ($R^2 > 0.8$) for both species.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Plan des Untersuchungsgebiets	7
Abb. 2	Fotos der Anlage	7
Abb. 3	Skizze der Vermessungsmethode	9
Abb. 4	Regressionsmodelle <i>Prunus avium</i> L.	18
Abb. 5	Regressionsmodelle <i>Malus domestica</i> BORKH.	21

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Holzdicke	15
Tab. 2	Anteile der kumulativen DCs an der ABM	16
Tab. 3	Modellstatistiken <i>Prunus avium</i> L.	22
Tab. 4	Modellstatistiken <i>Malus domestica</i> BORKH.	22

Abkürzungen

ABM Oberirdische Biomasse (Aboveground Biomass)

d Stammdurchmesser auf 30 cm Höhe

dbh Stammdurchmesser auf Brusthöhe (Diameter at Breast Height)

DC Durchmesserklasse (Diameter Class)

h Baumhöhe

TLS Terrestrischer Laserscanner

V_{defol} Baumvolumen im unbelaubten Zustand

V_{fol} Baumvolumen im belaubten Zustand

1 Einleitung

Als pflanzliche Biomasse wird die Summe des Trockengewichts aller oberirdisch (Holz, Rinde, Laub, Früchte) und unterirdisch (Wurzeln) wachsenden lebenden Pflanzenteile bezeichnet. Bestrebungen, die oberirdische Biomasse (Aboveground Biomass, ABM) bzw. das Stammvolumen von Einzelbäumen und ganzen Waldbeständen zu quantifizieren, gibt es in der Forstwissenschaft seit Mitte des 20. Jahrhunderts (Ellenberg 1986, Parresol 1999). Bedeutsam war und ist dies einerseits für das wirtschaftliche Management von Forsten als Rohstofflieferanten für wertvollen Bau-, Faser- und Brennstoff. Andererseits sind derartige Untersuchungen für die Geo- und Umweltwissenschaft interessant. So können beispielsweise Erkenntnisse über Energie- und Nährstoffflüsse in Ökosystemen, deren Produktivität sowie den Einfluss großer Waldgebiete (v.a. tropischer Wälder) auf den globalen Kohlenstoffkreislauf gewonnen werden (Parresol 1999, Zianis et al. 2005).

Spätestens seit dem Beschluss des Kyoto-Protokolls 1997 liegt global großes wissenschaftliches Interesse in der Erforschung der Fähigkeit von Wald- und Forstsystemen und zunehmend auch von Agrarlandschaften, durch Kohlenstoffsequestrierung und -speicherung die zunehmende atmosphärische CO_2 - Konzentration und die damit einhergehende Klimaerwärmung zu beeinflussen (Kuyah und Rosenstock 2015, Montagnini und Nair 2004, Morhart et al. 2016).

Es gibt zwei etablierte Verfahren, die ABM von Bäumen zu bestimmen, welche nachfolgend erklärt werden.

1.1 Allometrische Gleichungen

Die allometrischen Gleichungen nutzen den Zusammenhang zwischen biometrischen Parametern und der Größe eines Baumes. Hierfür werden einige repräsentative Individuen eines Bestandes gefällt, in definierte Komponenten zerlegt (z.B. Stammholz, Rinde, Zweige, Laub) und gewogen. Repräsentative Teilstichproben, die alle Komponenten und vorkommenden Durchmesserklassen (DC) abdecken, werden getrocknet und Umrechnungsfaktoren von Frisch- zu Trockengewicht ermittelt (Morhart et al. 2013, 2016, Kuyah und Rosenstock 2015). Mittels Regressionanalyse wird eine

generische Gleichung bestimmt, die auf den restlichen Bestand angewendet werden kann. Übliche Prädiktorvariablen sind der Stammdurchmesser auf Brusthöhe (*dbh*), die Baumhöhe (*h*), Kronenlänge und Kronendurchmesser (Netto und Behling 2018, Parresol 1999). Sehr verbreitet ist die Nutzung eines exponentiellen Modells mit der Prädiktorvariablen X und den Parameterwerten α und β (Gl. (1)). Deren Größe ist von Baumart, Baumalter, Standort- und Klimabedingungen abhängig (Zianis und Mencuccini 2004). Aus diesem Grund existieren keine national oder gar global gültigen Gleichungen und jeder Standort muss neu beprobt werden, um eine realistische Biomasseschätzung zu ermöglichen.

$$ABM = \alpha X^\beta + \epsilon \quad (1)$$

Beim Vergleich verschiedener allometrischer Modelle für die ABM-Schätzung in Agrarlandschaften in Kenia stellten Kuyah und Rosenstock (2015) fest, dass die Baumhöhe keinen signifikanten Einfluss auf das Schätzergebnis hat. Außerdem unterliegt sie meist einer großen Standardabweichung und kann daher eine Fehlerquelle darstellen, die die akzeptable Größe übersteigt. Modelle mit *dbh* bzw. *dbh* und der Holzdichte als Prädiktoren hingegen lieferten robuste Schätzungen, die zusätzlich mit geringem Messaufwand verbunden sind.

1.2 Fernerkundung

Die Fernerkundung umfasst alle nicht destruktiven Methoden, die über passive optische Sensorik, Range Detection and Ranging (RADAR) oder Light Detection and Ranging (LiDAR) Informationen über Farbe, Dichte und Struktur des Kronendachs, die Struktur der verholzten Pflanzenteile darunter (Zweige, Äste, Stämme) oder die vertikale Struktur des Bestands liefern. Unterschiedlichste Modelle ermöglichen dann eine Abschätzung der ABM (siehe Galeana Pizaña et al. 2016). Zusätzlich im Feld erhobene Informationen über die Holzdichte (z.B. anhand von Bohrkernen) lassen dann auf die Holzbiomasse schließen (Hackenberg et al. 2015). Je nach Methode und räumlichem Maßstab kann die Ungenauigkeit bei der Schätzung für den Einzelbaum stark variieren (van Leeuwen und Nieuwenhuis 2010).

In den letzten zwei Jahrzehnten rückte die Technik des Terrestrischen Laser-scannings (TLS) immer stärker ins Interesse der Forstwissenschaften. Sie ermöglicht einerseits eine effiziente und großflächige Erfassung von Parametern wie Baumhöhe oder Stammdurchmesser. Andererseits kann mit ihrer Hilfe die Struktur von Einzelbäumen sehr genau modelliert werden (Hackenberg et al. 2015). Weiterhin macht sie Zeitreihenaufnahmen des Pflanzenwachstums möglich, die mit herkömmlichen destruktiven Methoden nicht durchgeführt werden können (Sheppard et al. 2016). Die Scanergebnisse liefern eine 3D Punktwolke, die häufig starkem Rauschen unterliegt und daher mit verschiedenen Methoden korrigiert werden muss. Mit Modellen können schließlich gezielt Informationen, z.B. über die Verteilung des Holzvolumens, extrahiert werden (Hackenberg et al. 2015).

1.3 Rolle der Holzdichte

Wesentlicher Bestandteil von ABM-Schätzungen, die nicht destruktiv durchgeführt werden, sind Kenntnisse über die Dichte der vorliegenden Holzart. Es herrschen große Unterschiede abhängig u.a. von Baumart, Baumalter, Wachstumsrate, geographischer Lage und Nährstoffverfügbarkeit (Trendelenburg und Mayer-Wegelin 1955).

Laut Swenson und Enquist (2007), die globale Daten von Angiospermen und Gymnospermen untersuchten, ist die Holzdichte positiv mit der mittleren Jahrestemperatur, sowie negativ mit der Niederschlagsmenge und Höhenlage des Standortes korreliert. Weiterhin stellten sie geringe Variationen der Dichte innerhalb der Gemeinschaften temperierter Zonen und höherer Lagen fest, die von Gymnospermen dominiert sind. Größere Abweichungen gab es in der Holzdichte angiospermen-dominierten tropischer Gemeinschaften. Insgesamt variierten die Werte zwischen 100 und 1200 kg/m³.

Auch innerhalb eines Individuums ist die Dichte heterogen, weshalb die verschiedenen Komponenten bzw. DC differenziert betrachtet werden müssen. So nimmt die Hartholzdichte in Kiefernstämmen vom Grund zur Höhe hin ab (Repola 2006).

Da die Rinde naturgemäß eine deutlich geringere Dichte als Holz hat, ist bei der Betrachtung des gesamten Baumes der Rindenanteil ein weiterer wichtiger Aspekt.

Dieser wird mit steigender DC kleiner (Morhart et al. 2016). Bei Weidentrieben in einer Kurzumlaufplantage wurde mit zunehmendem Durchmesser eine exponentielle Abnahme des Anteils der Rinde am Gesamttrockengewicht festgestellt, der ab einem Triebdurchmesser von etwa 2 cm einen konstanten Wert von 20% annahm. Bei dünneren Zweigen lag er bis zu drei Mal höher (Adler et al. 2005). Ellenberg (1986) bestimmte für Buchen und Fichten erst ab Durchmessern über 20 cm einen konstanten Rindenanteil von etwa 5%. Bei der Beprobung mittels Bohrkernen oder Baumscheiben werden üblicherweise alle Bestandteile des Stammquerschnitts entnommen und so eine mittlere Dichte bestimmt.

1.4 Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit

Studien zur Biomasseschätzung haben meist eine Bestimmung der Kohlenstoffakkumulation oder den wirtschaftlichen Wert des Holzes im Untersuchungsgebiet zum Gegenstand.

Die Motivation der vorliegenden Arbeit ist es, auf Grundlage einer Quantifizierung der ABM Aussagen über die Menge des Wasserstoffs in der oberirdischen Biomasse zweier Obstkulturen zu treffen. Die Notwendigkeit einer derartigen Untersuchung ergibt sich aus dem Kontext des Projekts *Cosmic Sense* der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), in dessen Rahmen seit November 2018 deutschlandweit Untersuchungen stattfinden, die Erkenntnisse über Bodenfeuchtedynamiken liefern sollen. Dazu wird mithilfe von Neutronendetektoren die Flussdichte sogenannter epithermischer Neutronen ermittelt, welche aus kosmischer Strahlung auf die Erdoberfläche gelangen. Diese werden durch elastische Interaktion mit Wasserstoff in der Umwelt „abgebremst“. Die Flussdichte epithermischer Neutronen steht daher im umgekehrten Verhältnis zum Vorkommen von Wasserstoff an der Erdoberfläche, der in Wasser (Bodenwasser, Luftfeuchte, Vegetation), aber auch in organischen Kohlenstoffverbindungen, in Biomasse und im Boden, vorkommt.

Wasserstoffpools außerhalb des Bodenwassers, aber innerhalb des Sondenfootprints, sind daher für das Verfahren der neutronenbasierten Bodenfeuchtebestimmung Störgrößen, die unabhängig quantifiziert werden müssen (Andreasen et al. 2017). Der Anlass vorliegender Arbeit ist der Einsatz dieses Messverfahrens auf

einer landwirtschaftlichen Versuchsfläche am Forschungsstandort Marquardt (Potsdam), welche u.a. eine Kirsch- und eine Apfelkultur beherbergt.

Erkenntnisse über allometrische Beziehungen liegen fast ausschließlich für Wälder, Forste und Agroforste vor (Morhart et al. 2013, 2016, Verwijst und Telenius 1999, Zianis 2005, Zianis und Mencuccini 2004). Dagegen gibt es kaum Untersuchungen zu Plantagen, deren Individuen einem regelmäßigen Pflegeschnitt unterliegen, in regelmäßigen Abständen gepflanzt wurden, sodass kaum Konkurrenz um Licht und Platz besteht, und die mit einem Bewässerungssystem ausgestattet sind.

Beschneidung, Flächenverfügbarkeit, Windexposition, Topographie, Düngung und Konkurrenz um Licht und Nährstoffe sind Faktoren, die die Allokation der Biomasse im Baum beeinflussen, weshalb Wuchsformen aus Waldbeständen nicht mit jenen im Offenland vergleichbar sind (Harja et al. 2012).

Das Ziel der Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, das die Quantifizierung der ABM in den beiden Obstkulturen (*Prunus avium* L. und *Malus domestica* BORKH.) am Forschungsstandort mit höchstmöglicher Genauigkeit und gleichzeitig vertretbarem Aufwand ermöglicht.

Dafür wurde das Volumen des Holzes vermessen und untersucht, wie die Anteile der stärkeren und dünneren Segmente verteilt sind. Es wurden allometrische Beziehungen auf Grundlage von Volumen- und Dichtemessungen hergestellt, da ein destruktives Sampling nicht möglich war. Zusätzlich zu herkömmlichen Parametern wurden Baumvolumina und -höhen, die auf der Datengrundlage eines TLS modelliert wurden, als Prädiktorvariablen herangezogen.

Als ABM werden nachfolgend sämtliche oberirdischen verholzten Teile des Baumes verstanden. Separate Erhebungen zur Laubmasse wurden gemacht, unterirdische Pflanzenteile sowie Früchte jedoch vernachlässigt.

2 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet befindet sich in Nordostdeutschland westlich von Berlin am Forschungsstandort Marquart des Leibniz-Instituts für Agrartechnik und Bioökonomie (ATB) in Potsdam ($52^{\circ} 28' 00''$ N, $12^{\circ} 57' 27''$ E, 37 m ü. NN). Der Standort befindet sich im Übergangsbereich vom maritimen Klima Westeuropas zum kontinentalen Klima Osteuropas. Die langjährige Jahresmitteltemperatur beträgt 9.3°C , die mittlere jährliche Niederschlagssumme 589 mm (Deutscher Wetterdienst). Ein Diluvium auf Geschiebemergel bildet das Ausgangssubstrat für Braun- und Fahlerden (mündliche Informationen von Dr. Benjamin Trost, ATB).

Das an die Wublitz, einen Seitenarm der Havel, grenzende Gelände umfasst eine Fläche von 23 ha und ist leicht nach Westen exponiert. Erste obstbauliche Versuche fanden 1930 durch Prof. E. Kemmer (Friedrich-Wilhelm-Universität zu Berlin) statt. 1966 wurde eine Prüfstation der Zentralstelle für Sortenwesen der DDR errichtet, welche 1990 an das Bundessortenamt der BRD angegliedert wurde. Seit 2015 wird die Versuchsstation durch das ATB betrieben (Gutzeit 2004).

Die Kirschanlage wurde zwischen 1995 und 1997 gepflanzt, umfasst neun Reihen und insgesamt 75 Sorten. Der Reihenabstand beträgt 5 m und der Baumabstand innerhalb der Reihe 4.5 m. Einzelne Bäume fehlen (Abb. 1).

Die Baumerziehung auf der Apfelanlage erfolgt als „Schlanke Spindel“. Die Fruchtachsen sind hier an horizontalen Drähten befestigt und der Baum etwa in Kegelform beschnitten, mit kräftigen Seitenästen an der Spindelbasis und kürzeren Trieben zur Spitze hin. Die Bäume wurden 2016 in zwölf Reihen mit je 112 Individuen gepflanzt und umfassen vier Sorten. Der Reihenabstand beträgt 5 m, der Baumabstand innerhalb der Reihe 0.75 m (Abb. 1).

Beide Anlagen unterliegen einem bis zwei jährlichen Pflegeschnitten und sind mit einer Bewässerungsanlage ausgestattet.

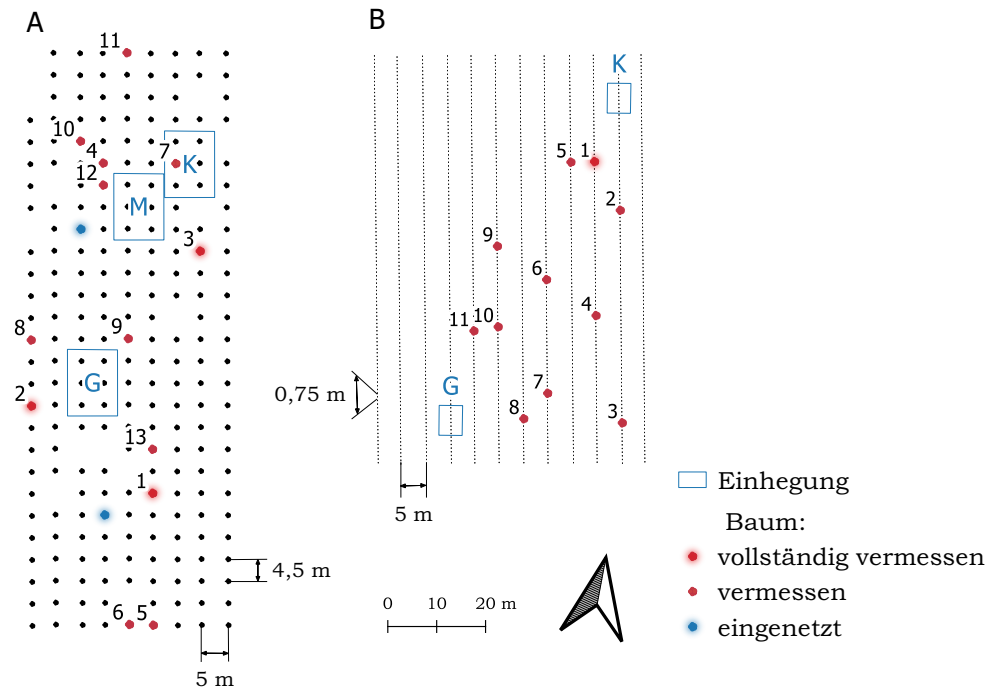


Abbildung 1: Plan der Kirschanlage (A) und Apfelanlage (B); markiert sind die vermessenen und eingesetzten Bäume sowie die eingehegten Plots der kleinen (K), mittelgroßen (M) und großen Bäume (G)

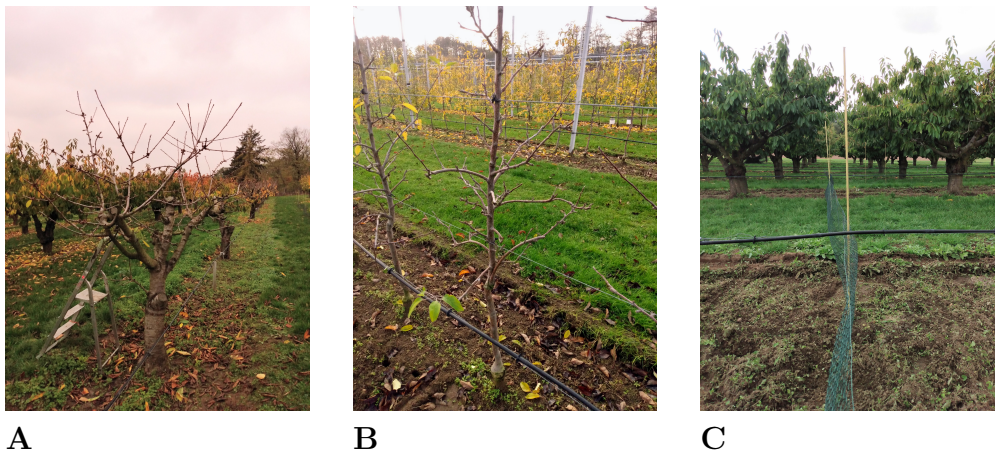


Abbildung 2: Ausschnitte der Kirschanlage (A), Apfelanlage (B) und Teil einer Einhegung zur Vermeidung von Laubverwehungen (C)

3 Methoden

3.1 Datenerhebung

Die Feldarbeit fand zwischen Oktober und Dezember 2020 statt. Anders als bei ähnlichen Studien (Kuyah und Rosenstock 2015, Morhart et al. 2013, 2016), war kein destruktives Sampling möglich. Stattdessen wurden die Holzvolumina der beprobten Bäume durch arbeitsintensive Vermessung der einzelnen Baumsegmente im Feld bestimmt.

Süßkirsche (*Prunus avium* L.)

Für eine Bestimmung der mittleren Laubbiomasse wurden im Oktober, während die Bäume noch belaubt waren, drei Plots (13.5×10 m mit jeweils 6 Individuen) mit 0.5 m hohen Drahtzäunen eingehegt, um Verwehung nach dem Laubfall zu vermeiden (Abb. 2 C). Die Auswahl erfolgte so, dass jeweils ein Plot kleine, mittlere und große Individuen beherbergte und sich die Bäume nicht am Rand der Anlage befanden (Abb. 1). Zusätzlich wurden die Kronen zweier mittelgroßer Einzelbäume vollständig eingenetzt und das Netz am Stamm fixiert.

Roxburgh (2015) schlägt für die Schätzung von allometrischen Biomassegleichungen eine Stichprobengröße von 17 bis 95 Individuen vor. Kuyah und Rosenstock (2015), die diverse Arten und Wuchsformen von Bäumen in Agrarlandschaften untersuchten, empfehlen für die Reduzierung des Fehlers auf unter 10% sogar eine Stichprobe von mindestens 30 Individuen. Davon abweichend wurden hier, aus Gründen des Arbeitsaufwandes, 13 Bäume für die Bestimmung des Holzvolumens ausgewählt. Begonnen wurde mit drei Bäumen, die die Spannbreite auftretender Wuchsformen und Größen der Pflanzung möglichst gut abbildeten:

- mittelgroßer Baum mit dünnem Stamm und breiter Krone
- großer Baum mit dickem Stamm und breiter Krone
- kleiner Baum mit dünnem Stamm und schmaler Krone

Die oberirdischen verholzten Pflanzenteile wurden in unbelaubtem Zustand vollständig vermessen. Dazu diente ein Maßband (Genauigkeit ± 1 cm) und eine Schiebellehre (Genauigkeit ± 1 mm). Der Baum wurde in Segmente unterteilt, indem ein

neuer Ast- bzw. Zweigansatz jeweils ein neues Segment markierte. Es wurde die Länge und der Umfang bzw. Durchmesser am Ansatz und am Ende des Segments bestimmt, sodass drei Messwerte pro Zweig vorlagen (Abb. 3). In späterer Berechnung wurde jedes Segment der Form eines Kegelstumpfs angenähert. Unregelmäßigkeiten in der Rinde, Knospen, sowie Ast- und Zweigansätze kürzer als 5 cm wurden vernachlässigt, da ihr Anteil an der Gesamtbiomasse als vernachlässigbar eingeschätzt wurde. Die Auswahl weiterer zehn Bäume erfolgte zufällig. Zur Reduzierung des Arbeitsaufwands wurden hier alle Zweige mit einem mittleren Durchmesser kleiner 1 cm nicht gemessen, ihr Anteil jedoch anhand der Ergebnisse der ersten drei Bäume geschätzt und später hinzuaddiert. Weiterhin wurden der Stammdurchmesser auf 30 cm Höhe über dem Erdboden (d) und die Kronenbreite längs der Reihe (b) für jeden Baum erhoben. Die Länge der Stämme war durch intensiven Pflegeschnitt auf etwa 1 m begrenzt, wo die Bäume sich bereits in starke Äste verzweigten. Daher war die Vermessung des dbh nicht möglich.

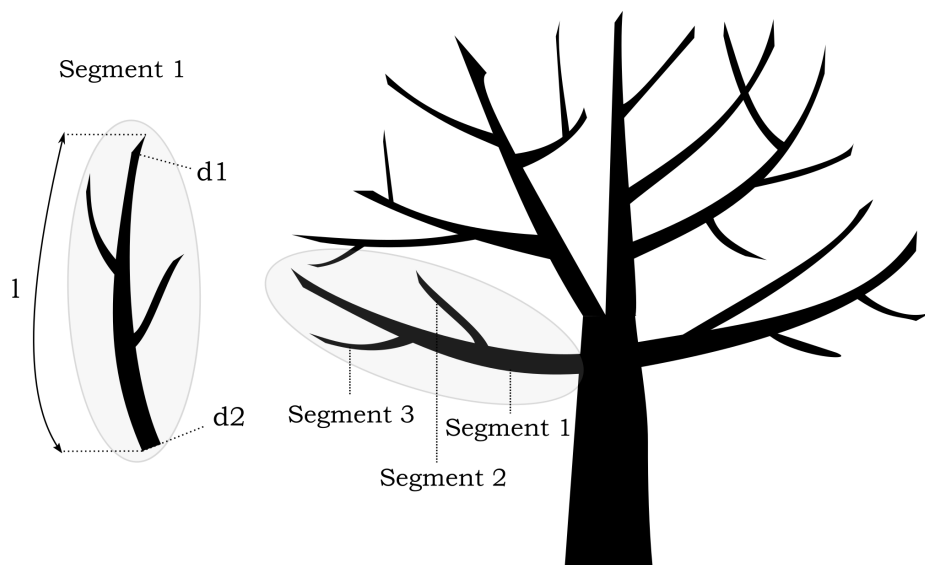


Abbildung 3: Unterteilung des Baumes und Vermessung der einzelnen Segmente

Apfel (*Malus domestica* BORKH.)

Für die Erhebung der Laubbiomasse wurde ein Plot mit kleinen und ein Plot mit großen Bäumen eingezogen (6×5 m mit jeweils 8 Individuen).

Die Vermessung der oberirdischen verholzten Teile erfolgte ähnlich wie bei den Kirschbäumen. Da es sich um junge, sehr viel dünnere und weniger verzweigte Bäume handelt, wurde hier jedoch genauer gearbeitet. Ein mittelstarker Baum wurde zur vollständigen Vermessung ausgewählt. Anhand seiner Maße konnte das mittlere Volumen der Zweigansätze, die kürzer als 5 cm waren, geschätzt werden. Diese wurden aus Effizienzgründen bei der Aufnahme der folgenden zehn Bäume nur gezählt und ihr geschätztes Volumen später zum gemessenen Gesamtvolumen hinzuaddiert. Knospen wurden auch hier vernachlässigt.

Für jeden Baum wurden die Stammdurchmesser auf 30 cm Höhe und auf Brusthöhe (d und dbh) erfasst.

Zusätzlich wurden weitere Parameter mithilfe eines Terrestrischen Laserscanners (LMS-511, SICK AG) erfasst. Der TLS wurde an einem Traktor befestigt und langsam durch die Baumreihen gefahren. Während des Scanprozesses werden Lichtpulse radial senkrecht im Winkel von 190° um den Scanner emittiert und von den Bäumen reflektiert. Die zurückgeworfenen Laserstrahlen geben in Form von Winkel und Distanz Auskunft über die Position des reflektierenden Objekts. So wird eine Punktwolke erzeugt, die eine Rekonstruktion der Form des Baumes möglich macht (SICK AG 2015). Tsoulas et al. (2020) beschreiben das Vorgehen im Detail.

Die Scanaufnahmen der Kirschbäume fanden im unbelaubten, die der Apfelbäume sowohl im unbelaubten als auch im belaubten Zustand statt. Die Modellierung der Baumform lieferte das Baumvolumen inklusive aller Zwischenräume für den belaubten (V_{fol}) und unbelaubten Zustand (V_{defol}) sowie für die Baumhöhe (h). Unter Baumvolumen wird hier eine „Einhüllende“ verstanden, die durch Triangulation der Punkte aus der aufgenommenen Punktwolke modelliert wird. Die TLS-bezogenen Messungen und Auswertungen erfolgten durch Nikos Tsoulas (ATB).

Nach Ende des Laubfalls im Dezember wurde das Laub innerhalb der Einhegungen und aus den Netzen zusammengekehrt, das Frischgewicht bestimmt (Genauigkeit der Waage ± 0.05 kg) und eine Mischprobe je Plot entnommen. Die eingetzten Bäume wurden zusammen als ein Plot betrachtet. Die Mischproben wurden

gewogen, bestmöglich von Hand gereinigt, getrocknet (24 h bei 105 °C) und erneut gewogen. Anhand der Ergebnisse wurde die Laubtrockenbiomasse auf den Plot hochgerechnet und ein Mittelwert für den Einzelbaum bestimmt.

Aufgrund der Standortabhängigkeit der Holzdichte (Chave et al. 2006, Swenson und Enquist 2007) und des großen Anteils an relativ dünnen Segmenten, die einen hohen Rindenanteil aufweisen, wurden eigene Erhebungen zur Dichte gemacht. Dafür wurden Zweige, deren Entnahme keine größeren Schäden am Baum verursachte, in je drei DC eingeteilt:

- Kirschbaumholz: DC0 (< 1 cm), DC1 (1 - 2 cm), DC2 (2 - 3 cm)
- Apfelbaumholz: DC0 (< 0.5 cm), DC0.5 (0.5 - 1 cm), DC1 (1 - 1.5 cm)

Das Volumen von zwei Proben je DC wurde durch Wasserverdrängung im Messzylinder bestimmt (Genauigkeit ± 1 ml), das Holz vollständig getrocknet (105°C, bis keine Gewichtsänderung mehr zu beobachten war) und gewogen.

3.2 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung, explorative Datenanalyse und statistische Auswertung erfolgte mit der freien Programmierumgebung und Statistiksoftware R (R Core Team 2020, version 4.0.2).

Süßkirsche (*Prunus avium* L.)

Die Form der Segmente wurde als Approximation an einen Kegelstumpf betrachtet und das Volumen wie folgt berechnet:

$$V = \frac{\pi}{3} \cdot l \cdot (d_1^2 + d_1 d_2 + d_2^2) \quad (2)$$

mit der Zweiglänge l , dem Durchmesser an der Basis d_1 und dem Durchmesser an der Spitze d_2 (Abb. 3).

Weiterhin wurden die vermessenen Zweige je Baum in DC eingeteilt. Hierzu wurde aus beiden Durchmesserwerten das arithmetische Mittel (\bar{d}) gebildet. Zweige mit $\bar{d} < 1$ cm wurden der Klasse DC0, Zweige mit $\bar{d} < 2$ cm der Klasse DC1 zugeordnet usw.

Für die Bestimmung des Gesamtvolumens des Einzelbaumes wurden die Volumina der Segmente aufaddiert. Zur Vervollständigung des Wertes der Bäume 4 - 13 (V_{mess}), wurde der Anteil der DC0 am Volumen der vollständig vermessenen Bäume 1 - 3 ermittelt und daraus das arithmetische Mittel ($A_{DC0} = 0.034$) gebildet. Dieser Anteil wurde bei den gemessenen Volumina der Bäume 4 - 13 ergänzt (Gl. (3)).

$$V_{ges} = \frac{V_{mess}}{(1 - A_{DC0})} \quad (3)$$

Apfel (*Malus domestica* BORKH.)

Die Bestimmung des Zweigvolumens erfolgte wie bei den Kirschbäumen. Die DC wurden hier jedoch feiner skaliert. Zweige mit $\bar{d} < 0.5$ cm wurden der Klasse DC0, Zweige mit $\bar{d} < 1$ cm der Klasse DC0.5 zugeordnet usw.

Aus den Werten des vollständig vermessenen Baumes 1 wurde das arithmetische Mittel des Volumens der Ansätze ($V_A = 3.8 \cdot 10^{-4} m^3$) ermittelt, dieses bei den Bäumen 2-11 mit der Zahl der Ansätze (n_A) multipliziert und zum gemessenen Volumen hinzuaddiert (Gl. (4)). Das Volumen der Ansätze wurde der DC0 zugeordnet.

$$V_{ges} = V_{mess} + n_A V_A \quad (4)$$

3.3 Berechnung der Biomasse

Das Verhältnis von Trockenmasse zu Frischvolumen der zur Dichtebestimmung entnommenen Zweige lieferte deren Darrdichte. Für die Berechnung der Biomasse wurde aus den beiden je DC und Baumart entnommenen Proben das arithmetische Mittel gebildet. Diese Werte wurden den Zweigen der Kirschbäume bis DC3, sowie der Apfelbäume bis DC1.5 zugeordnet (Tab. 1).

Für Segmente größerer DC als die bezüglich der Dichte untersuchten wurden zwei Varianten betrachtet:

- Variante 1: ihnen wurde die experimentell bestimmte Dichte der größten DC zugeordnet
- Variante 2: ihnen wurde ein Literaturwert für die Dichte des Kernholzes der jeweiligen Baumart zugeordnet (Tab. 1)

Mit folgendem Zusammenhang wurde aus Dichte und Volumen die Biomasse der Segmente ermittelt:

$$m = \rho \cdot V \quad (5)$$

Für die gesamte ABM wurden die Massen der einzelnen DC aufaddiert und die über beide Varianten bestimmten Massen verglichen. In der weiteren Analyse wurde die mit dem Literaturwert berechnete ABM verwendet. Es wurden die Anteile der einzelnen DC an der ABM bestimmt, um eine mögliche Reduzierung des Arbeitsaufwandes bei zukünftigen Feldmessungen zu diskutieren.

3.4 Regressionsanalyse

Für die Abschätzung der ABM auf Grundlage einzelner Baumparameter wurden die erhobenen Daten zunächst mithilfe von Boxplots und Quantil-Quantil-Plots auf Normalverteilung überprüft. Als Signifikanzlevel galt für alle Untersuchungen ein p-Wert von 0.05.

Für einen Überblick über die Zusammenhänge der Variablen untereinander wurden diese in einem Scatterplot gegeneinander aufgetragen und der Pearson-Korrelationskoeffizient r bestimmt. Anhand der Graphen wurde über mögliche Regressionsmodelle entschieden.

Die Prädiktoren wurden auf verschiedene Weise zur abhängigen Variablen ABM in Beziehung gesetzt, um das beste Verfahren für eine Vorhersage zu ermitteln.

Zunächst wurde mit jedem Prädiktor eine einfache lineare Regression mit der Methode der kleinsten Fehlerquadrate durchgeführt (Gl. (6)).

Weiterhin wurde eine multiple lineare Regression vorgenommen. Dies geschah in Form einer schrittweisen Vorwärtsselektion, bei der mit dem Prädiktor, der den höchsten Erklärungswert des Modells liefert, begonnen und sukzessive Variablen hinzugenommen wurden, die zur Erklärung der ABM und damit der Verbesserung des Modells beitrugen. Der Erklärungswert wurde hierbei anhand des Akaike-Informationskriteriums (AIC) beurteilt, welches den steigenden Informationsgehalt gegen Modellkomplexität abwägt.

Die lineare Gleichung für die Vorhersage der Biomasse folgt der Form:

$$ABM = \alpha + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \epsilon \quad (6)$$

mit den Prädiktorvariablen X_i , den Modellparametern α und β_i und einem Fehlerterm ϵ .

Häufig werden die Baumparameter zur Schätzung der Biomasse zu Prädiktoren kombiniert (Chave et al. 2005, Netto und Behling 2018, Parresol 1999). Daher wurden zwei gängige Variablen, d^2 und d^2h , ebenfalls zur Vorhersage herangezogen.

Wo visuell betrachtet ein nichtlinearer Zusammenhang möglich schien, wurde ein exponentielles Modell angepasst (Gl. (1)). Dafür wurden die abhängige und unabhängige Variable zunächst logarithmiert, um die Gleichung in eine lineare Form zu bringen:

$$\ln(ABM) = \alpha_0 + \beta \ln(X) \quad (7)$$

Dieses Vorgehen erzeugt eine Tendenz zu einem negativen Bias im Ergebnis (Baskerville 1972). Daher wurde bei der Rücktransformation in die arithmetische Form (Gl. (9)) ein Korrekturfaktor (CF) hinzugenommen, wie Morhart et al. (2013) ihn verwenden. Zu seiner Berechnung wird der Standardfehler der Schätzung (Se) herangezogen.

$$CF = 0.5 \cdot Se^2 \quad (8)$$

$$ABM = \exp(\alpha_0 + CF) + X^\beta \quad (9)$$

Alle Modelle wurden auf Homoskedastizität und Normalverteilung der Residuen geprüft. Die Unabhängigkeit der Residuen wurde mithilfe eines Durbin-Watson-Tests ermittelt. Um sicherzustellen, dass die in der multiplen Regressionsanalyse verwendeten Variablen einen unabhängigen Informationsbeitrag zum Modell leisten, wurden sie mithilfe des Varianzinflationsfaktors (VIF) auf Multikollinearität untersucht.

4 Ergebnisse

4.1 Holzdichte

Der Literaturwert für die Kernholzdichte beider Baumarten sowie die experimentell ermittelten Werte der Darrdichte für die unterschiedlichen DCs können Tab. 1 entnommen werden.

Sie zeigen erwartungsgemäß eine Zunahme mit steigender DC. Die Abweichung der experimentell bestimmten Werte von der Kernholzdichte ist deutlich höher bei *Malus domestica*. Die Differenz zwischen der Dichte der größten untersuchten DC und dem Literaturwert liegt hier bei 150 kg/m^3 , für *Prunus avium* bei nur 18 kg/m^3 .

Dies schlägt sich im Vergleich der Gesamtmassen der Bäume nieder, die nach zwei Varianten berechnet wurden. Die nach Variante 1 bestimmte ABM war bei den Apfelbäumen um 15.6% kleiner als die nach Variante 2 bestimmte. Bei den Kirschbäumen betrug die Differenz lediglich 2.7%.

Für alle nachfolgenden Analysen wurde die ABM nach Variante 2 herangezogen.

Tabelle 1: Literaturwerte der Kernholzdichte beider Baumarten und experimentell bestimmte Dichtewerte verschiedener Durchmesser-
klassen (DC)

Baumart	Kernholzdichte kg/m^3	DC	Holzdichte kg/m^3
<i>Prunus avium</i> L.	570 ^{*1}	0	512
		1	518
		2	552
<i>Malus domestica</i> BORKH.	730 ^{*2}	0	533
		0.5	569
		1	580

*1 Sachsse 1984

*2 kaminholz-wissen 2021

4.2 Verholzte oberirdische Biomasse

Süßkirsche (*Prunus avium* L.)

Die Volumina der vermessenen Individuen betragen zwischen 0.063 und 0.216 m³. Die entsprechenden Werte der ABM erstrecken sich von 35.6 bis 121.9 kg.

Die Massenanteile der einzelnen DC an der ABM sind sehr heterogen verteilt. So stellt der Stamm, die jeweils größte DC des Baumes, einen Anteil zwischen 31 und 59% dar. Das arithmetische Mittel liegt bei 44%.

Tab. 2 zeigt die Verteilung der Anteile der zusammengefassten DC > 15, DC > 10 und DC > 5. Sie variieren zwischen den Bäumen um bis zu 42%.

Apfel (*Malus domestica* BORKH.)

Die vermessenen Apfelbäume besitzen Gesamtvolumina zwischen 1.3 und 5.2 dm³. Die mit dem Literaturwert berechnete ABM liegt zwischen 0.88 und 3.58 kg.

Auch bei den Apfelbäumen variieren die Anteile der zusammengefassten DC am Gesamtvolumen stark (Tab. 2). So liegen die Werte des Anteils der DC > 4 zwischen 0 und 41%, der DC > 3 zwischen 13 und 72% und der DC > 2 zwischen 47 und 75%. Somit scheint hier eine Schlussfolgerung aus starken Ästen auf die Masse der Zweige und damit die gesamte ABM, wie bei den Kirschbäumen, ebenfalls nicht möglich.

Tabelle 2: Minimal-, Maximal- und arithmetischer Mittelwert der kumulativen Anteile der Durchmesserklassen (DC) an den Gesamtmassen der Einzelbäume

	Segmente	Min	Max	Mittelwert
<i>Prunus avium</i> L.	Stamm	0.31	0.59	0.44
	DC > 15	0.31	0.59	0.47
	DC > 10	0.31	0.73	0.58
	DC > 5	0.56	0.86	0.77
<i>Malus domestica</i> BORKH.	DC > 4	0	0.41	0.22
	DC > 3	0.13	0.72	0.38
	DC > 2	0.47	0.75	0.64

4.3 Vorhersagemodelle

Süßkirsche (*Prunus avium* L.)

Es wurden die Zusammenhänge zwischen den manuell (d , b) und mithilfe des TLS (V_{defol} , h) erhobenen sowie kombinierten Prädiktorvariablen (d^2 , d^2h) und der ABM untersucht. Mithilfe der Vorwärtsselektion wurde aus den genannten Variablen ein multiples Modell mit dem Stammdurchmesser d und der Kronenbreite b erstellt.

Die Scatterplots weisen erwartungsgemäß ausschließlich auf positive, jedoch unterschiedlich starke Zusammenhänge hin. Abb. 4 zeigt die Graphen für alle Einzelprädiktoren mitsamt Korrelationskoeffizienten.

Da die vorliegende Datengrundlage für alle Prädiktoren lineare Zusammenhänge vermuten lässt, wurden ausschließlich lineare Regressionsmodelle angepasst.

Die Parameter und Statistiken der einzelnen Modelle sind in Tab. 3 zu sehen. Alle Schätzungen, die auf den manuell erhobenen Baumparametern beruhen, sind signifikant.

Mit einem adjustierten R^2 von 0.85 und dem kleinsten Standardfehler zeigt das multiple Regressionsmodell mit den Prädiktoren d und b die beste Anpassung. Die geschätzte Zunahme der ABM pro Zentimeter Stammdurchmesser ist hier 3.5 kg, pro Meter Kronenbreite sind es 11.7 kg. Mit einem VIF von 1.4 ist das Kriterium der fehlenden Multikollinearität erfüllt.

Alle Modelle, die den Stammdurchmesser als Prädiktor heranziehen, zeigen ähnlich gute Anpassungen. So sind d , d^2 und d^2h mit $r = 0.912$, $r = 0.913$ bzw. $r = 0.901$ am stärksten mit der ABM korreliert. Alle adjustierten R^2 der Modelle nehmen Werte größer als 0.8 an. Ergebnis der Regression mit d als unabhängiger Variable ist ein Wachstum der ABM um 4.1 kg pro Zentimeter Stammdurchmesser.

Die auf den TLS-Daten beruhenden Parameter sind deutlich schlechter für eine Vorhersage geeignet. Visuell ist aus den Scatterplots zunächst auf keinen Zusammenhang zu schließen, was durch die Korrelationskoeffizienten, $r = 0.158$ für V_{defol} und $r = 0.365$ für h , bestätigt wird. Die angepassten linearen Modelle weisen auf keinen signifikanten Effekt der Prädiktorvariablen hin. Weiterhin haben beide Modelle große Standardfehler sowie adjustierte R^2 um 0.

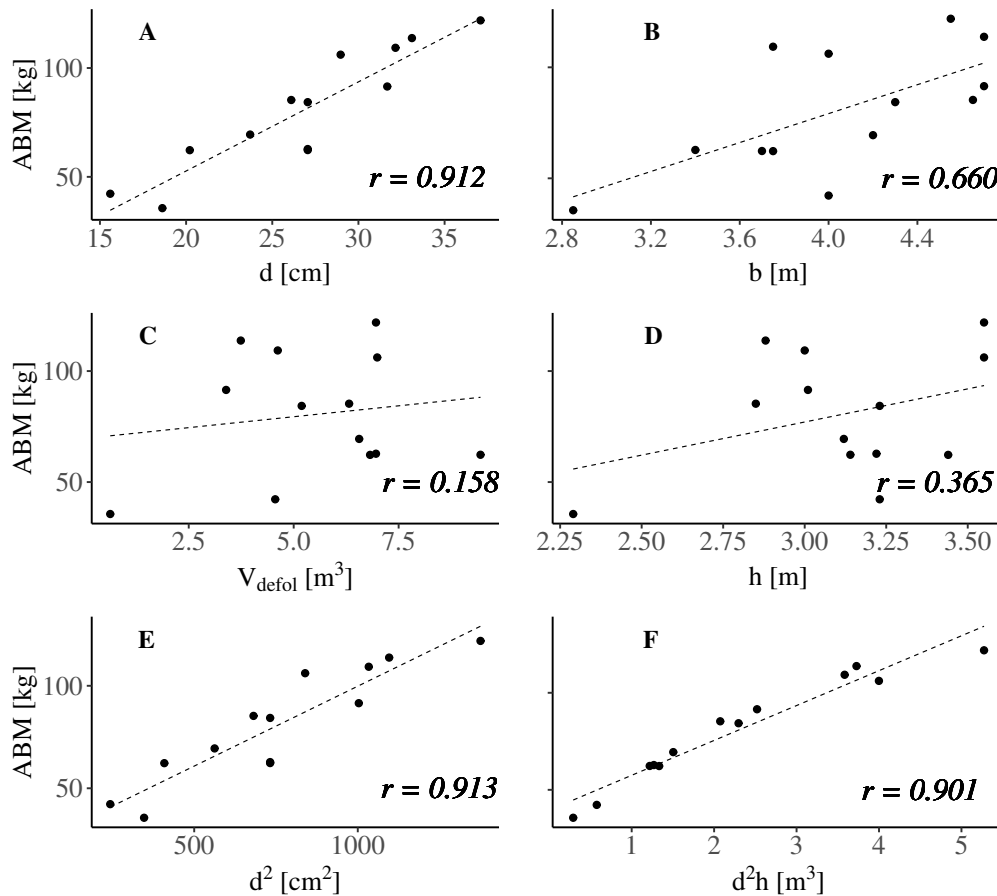


Abbildung 4: Regressionsmodelle für die Vorhersage der ABM von *Prunus avium* L. anhand verschiedener Prädiktorvariablen; Modellparameter können Tab. 3 entnommen werden

Apfel (*Malus domestica* BORKH.)

Bei den Apfelbäumen wurden die im Feld erhobenen Parameter (d , dbh), das aus den TLS-Daten bestimmte Volumen für den belaubten und unbelaubten Baum (V_{fol} , V_{defol}) sowie die Höhe im unbelaubten Zustand (h) als Prädiktorvariablen herangezogen. Ebenso wurden die kombinierten Variablen d^2 und d^2h betrachtet. Es ist zu beachten, dass die Daten für dbh und h keiner Normalverteilung folgen und die Modellstatistiken daher kritisch zu bewerten sind. Eine Regression wurde dennoch durchgeführt.

Mithilfe des Verfahrens der Vorwärtsselektion wurde ein multiples Modell mit

dbh , d und V_{fol} erstellt.

Abb. 5 zeigt die Zusammenhänge der einzelnen Variablen mit der ABM.

Die Betrachtung der Scatterplots legt lineare Beziehungen für d , dbh , d^2 , d^2h nahe (Abb. 5 A, B, E, F). Dagegen korrelieren die mit den TLS-Daten ermittelten Parameter V_{defol} und h kaum mit der Biomasse bzw. ist die Art des Zusammenhangs visuell nicht erkennbar (Abb. 5 C, D).

Da die Diagramme für d und dbh (Abb. 5 A, B) auch eine mögliche exponentielle Beziehung vermuten lassen, wurde auch das exponentielle Modell auf diese Daten angewendet und die Modellstatistik mit der der linearen Regression verglichen. Dieser Schritt überprüft, ob diese sonst bei Biomasseschätzungen übliche Herangehensweise auch für die hier untersuchte Population geeignet wäre. Sowohl der graphischen Darstellung als auch der Modellstatistik (Tab. 4) kann man entnehmen, dass beide Modelle sehr ähnliche Anpassungen erzeugen.

Wie bei den Kirschbäumen haben auch bei den Apfelbäumen alle manuell erhobenen Parameter einen signifikanten Effekt auf die ABM.

Die beste Anpassung lieferte das multiple lineare Modell ($\text{adj. } R^2 = 0.91$). Es sagt pro Zentimeter Stammdurchmesser auf Brusthöhe eine Zunahme der Biomasse um 1.71 kg, pro Zentimeter Stammdurchmesser auf 30 cm Höhe eine Zunahme von 0.47 kg und pro Kubikmeter Scanvolumen des belaubten Baumes eine Abnahme von 0.58 kg vorher. Der Zusammenhang zwischen V_{fol} und der ABM ist zwar positiv, hier aber schon durch die Parameter von d und dbh beschrieben, sodass mit dem Regressionsgewicht des Scanvolumens wieder herunter korrigiert wird.

Ähnlich gut sind sämtliche einfachen linearen Regressionsmodelle, deren unabhängige Variablen auf Durchmesserwerten beruhen. Die hohen Korrelationskoeffizienten für d , dbh , d^2 und d^2h ($r = 0.934$, $r = 0.945$, $r = 0.945$ und $r = 0.930$) weisen auf einen starken positiven Zusammenhang hin. Alle zugehörigen Modelle besitzen ein adjustiertes R^2 größer als 0.8.

Bei einer Zunahme von d um einen Zentimeter folgt ein Wachstum der ABM um 1.11 kg. Bei dbh ist es das Doppelte.

Die exponentiellen Modelle beschreiben die Veränderungen der ABM mit steigendem d bzw. dbh geringfügig schlechter ($\text{adj. } R^2 = 0.77$ bzw. 0.79). Die Vorhersage anhand linearer Modelle ist für den vorliegenden Baumbestand also vollkommen ausreichend.

Die Prädiktoren aus den TLS-Aufnahmen haben, ähnlich wie bei den Kirschbäumen, sehr kleine Korrelationskoeffizienten. Überraschenderweise korreliert das Scanvolumen der belaubten Bäume ($r = 0.614$) besser mit der Holzbiomasse als das Volumen der unbelaubten Bäume ($r = 0.329$). Laut Modellstatistik hat V_{fol} sogar einen signifikanten Effekt auf die ABM (p-Wert = 0.045).

Für die Baumhöhe h ist im Scatterplot (Abb. 5 G) keine Korrelation mit der ABM erkennbar ($r = 0.167$) und auch das angepasste Modell (adj. $R^2 = -0.08$, p-Wert = 0.623) zeigt die schlechte Eignung des Parameters als Prädiktor.

4.4 Laubmasse

Die Ergebnisse der Erhebung der Laubmasse zeigen eine starke Varianz in beiden Baumbeständen. Die Laubmasse von *Prunus avium* betrug auf den Plots mit kleinen, mittleren und großen Bäumen im Mittel 2.8 kg, 2.9 kg und 6.2 kg pro Baum. Bei den eingezetzten Bäumen ergab sie 4.3 kg. Der Gesamtmittelwert liegt bei 4.0 kg Laubmasse je Individuum.

Bei *Malus domestica* betrug die durchschnittliche Masse auf dem Plot der kleinen Bäume 0.16 kg und auf dem der großen Bäume 0.40 kg je Baum. Der Mittelwert liegt bei 0.28 kg.

Für eine grobe Schätzung des Verhältnisses von Laubmasse zu verholzter Biomasse wurde die über alle Plots gemittelte Laubmasse zur ABM in Beziehung gesetzt. Bei den Kirschbäumen beträgt sie 3 - 11% und bei den Apfelbäumen 8 - 32% der ABM.

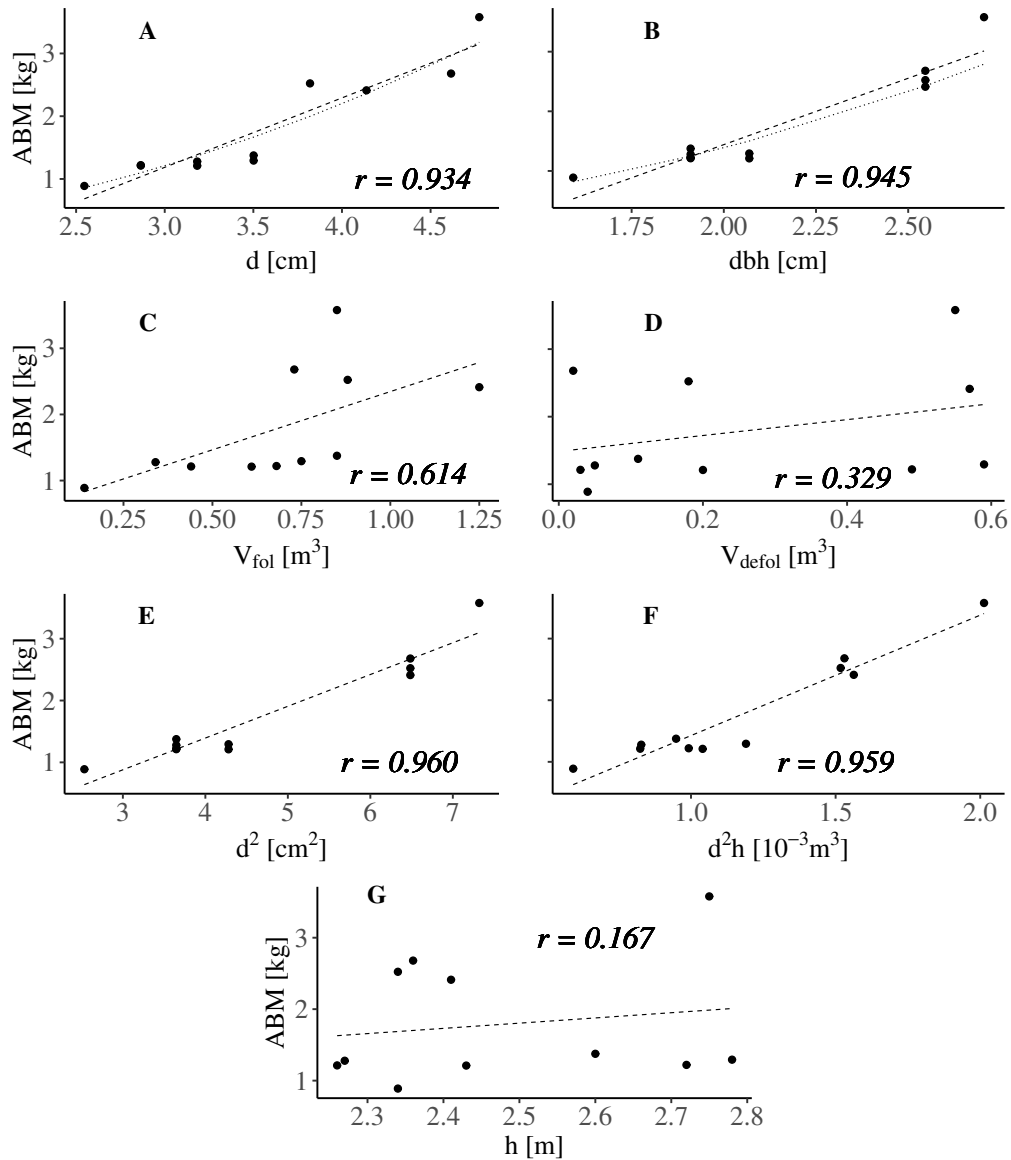


Abbildung 5: lineare Regressionsmodelle (gestrichelte Linie) und exponentielle Modelle (gepunktete Linie) für die Vorhersage der ABM von *Malus domestica* BORKH. anhand verschiedener Prädiktorvariablen; Modellparameter können Tab. 4 entnommen werden

Tabelle 3: Kennwerte der linearen Regressionsmodelle für *Prunus avium* L.

	Prädiktor	Parameterschätzung			adj. R ²	RMSE	F - Wert	p - Wert
		α	β_1	β_2				
1	d	-29.23	4.10		0.82	11.76	54.43	<0.001
2	b	-51.20	32.59		0.38	21.54	8.45	0.014
3	h	-12.47	29.84		0.05	26.69	1.69	0.220
4	V_{defol}	69.61	1.97		-0.06	28.31	0.28	0.606
5	d^2	21.84	0.08		0.82	11.71	54.97	<0.001
6	d^2h	27.58	0.02		0.80	12.42	47.59	<0.001
7	$d + b$	-61.26	3.52	11.74	0.85	10.76	34.06	<0.001

22

Tabelle 4: Kennwerte der Regressionsmodelle für *Malus domestica* BORKH.

	Form	Prädiktor	Parameterschätzung				adj. R ²	RMSE	F - Wert	p - Wert
			α	β_1	β_2	β_3				
1		d	-2.13	1.11			0.86	0.32	61.81	<0.001
2		dbh	-3.01	2.23			0.88	0.30	75.71	<0.001
3		h	-0.02	0.73			-0.08	0.89	0.03	0.623
4	Lineares Modell	V_{fol}	0.58	1.76			0.31	0.72	5.45	0.045
5		V_{defol}	1.49	1.18			0.01	0.86	1.09	0.320
6		d^2	-0.18	0.15			0.88	0.30	75.34	<0.001
7		d^2h	-0.03	0.06			0.85	0.33	57.50	<0.001
8		$d + dbh + V_{fol}$	-3.18	1.71	0.47	-0.58	0.91	0.26	33.40	<0.001
9	exponentielles	d	0.12	2.08			0.88	0.30	65.33	<0.001
10	Modell	dbh	0.28	2.31			0.97	0.17	125.92	<0.001

5 Diskussion

5.1 Repräsentativität der Stichproben

Die Individuen beider Baumarten haben auf den ersten Blick jeweils ein sehr homogenes Erscheinungsbild, welches bei näherer Betrachtung jedoch eine differenzierte Untersuchung erfordert.

Zunächst ist die Topographie beider Anlagen nach Westen leicht abfallend und die Bäume am Fuß des Hanges weisen tendenziell einen kräftigeren Wuchs, größere Kronen und eine größere Laubmasse auf (siehe Kap. 4.4 und Abb. 1). Dies könnte mit einer besseren Wasserversorgung, höherer Nährstoffverfügbarkeit und besseren Bodeneigenschaften zusammen hängen. Über längere Zeit wird Boden oberhalb erodiert und akkumuliert sich in Senken, was besonders ausgeprägt auf landwirtschaftlich genutzten Flächen geschieht. Dies lässt eine höhere Bodenqualität am unteren Teil des Hanges vermuten.

Da für die westlichen Reihen der Apfelanlage keine Daten des TLS vorlagen, wurden nur Bäume der oberen acht Reihen vermessen, um die Prädiktoren V_{fol} , V_{defol} und h für die gesamte Stichprobe untersuchen zu können. So wurden die größeren Individuen nicht in die Analyse eingebunden, wodurch die Ergebnisse der Modellierung bei Bäumen größerer ABM fehlerbehaftet sein könnten. Die modellierten Zusammenhänge sind vermutlich dennoch geeignet, um in allen Teilen der Pflanzung Anwendung zu finden.

Insgesamt sind die hier untersuchten Stichproben durch ihre geringe Größe nur bedingt repräsentativ (Kap. 3.1). Die Messungen im Feld wurden jedoch auf Grund des erheblichen Arbeitsaufwandes begrenzt.

5.2 Verhältnis zwischen ABM und Laubmasse

Aus praktischen Gründen wurden die Erhebungen zur Laubmasse nicht für die selbe Stichprobe gemacht, für die das Holzvolumen vermessen wurde. Daher konnte keine Beziehung zwischen der ABM eines Baumes und seiner Blattmasse untersucht werden. Für eine objektive Einteilung der Individuen in die Klassen „Groß“, „Mittel“ und „Klein“, welche eine entsprechende Zuordnung der Laubmasse ermöglichen würde, wurde auch keine Empfehlung entwickelt. Stattdessen wird für zukünftige

Schätzungen auf die subjektive Wahrnehmung bzw. die Nutzung des Wertes der durchschnittlichen Laubmasse verwiesen. Für eine weiterführende Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Laubmasse und der restlichen ABM könnte zum Beispiel die Biomasse der Bäume auf den eingehegten Plots auf Grundlage der Stammdurchmesser und entsprechenden Modelle (Kap. 4.3 und Tab. 3 und 4) geschätzt, gemittelt und zur mittleren Laubmasse des Plots ins Verhältnis gesetzt werden.

Weiterhin sind die Schwankungen des Laubanteils und der Dichte der Blätter über den Jahresverlauf zu beachten, was die Einbeziehung der Laubmasse in die Biomasseschätzung erschwert. So weist Buchenlaub im Hochsommer das dreifache seiner Darrdichte kurz nach dem Austreiben auf (Ellenberg 1986). Außerdem ist zu bedenken, dass es sich bei der hier bestimmten Laubmasse um die Trockenmasse bereits abgeworfenen Laubes handelt, das zum Teil bereits über Wochen der Zersetzung ausgesetzt war. Daher ist sie vermutlich geringer, als während der Vegetationsperiode.

5.3 Rolle der Durchmesserklassen

Obwohl die zunächst sehr ähnlichen Wuchsformen der Bäume eine einheitliche Verteilung der ABM auf die DCs vermuten lässt, wurde dies durch die Messungen widerlegt. Die kumulativen Massenanteile der DCs an der ABM zeigen, dass aus den Kenntnissen der Masse stärkerer Segmente nicht automatisch die Masse dünnerer abgeleitet werden kann. Dies gilt für beide Baumarten.

Selbst der Anteil des Stammes der Kirschbäume an der ABM unterliegt großer Varianz (Kap. 4.2 und Tab. 2). Was jedoch weiterer Untersuchung bedarf, ist die Veränderung der Verteilung der Anteile mit zunehmendem Stammdurchmesser bzw. steigender ABM. Morhart et al. (2016) stellten beispielsweise fest, dass der Anteil der Stammbiomasse bei *Prunus avium* mit zunehmendem *dbh* sinkt, während der Anteil der Zweigbiomasse steigt. Hier könnte eine weitere Regressionsanalyse Aufschluss geben.

Bei der Bestimmung der Masse wurde festgestellt, dass sich die Ergebnisse beider Berechnungsvarianten bei den Apfelbäumen stark unterscheiden. Dies ist auf den großen Unterschied zwischen dem experimentell bestimmten und dem Literaturwert

der Holzdicke zurückzuführen (Kap. 4.1 und Tab. 1). Die Differenz kann durch die geringe Größe der DCs erklärt werden, für die die Dichtebestimmung durchgeführt wurde. Es wurden nur kleine DC untersucht, die einen verhältnismäßig großen Rindenanteil haben und damit eine deutlich geringere Darrdicke als das Kernholz aufweisen (Adler et al. 2005, Morhart et al. 2016). Dass dieser Unterschied bei den Kirschbäumen geringer ausfiel, könnte mit dem größeren Durchmesser der beprobten Zweige erklärt werden.

Bei beiden Baumarten ist die Anzahl der Segmente kleinerer DC zwar höher als die größerer DC, der deutlich größere Volumenanteil der Bäume ist jedoch durch die großen DC repräsentiert. Weiterhin wurde bereits in wenig dickeren als den bezüglich der Dichte untersuchten Segmenten das Verhältnis Holz/Rinde als deutlich höher eingeschätzt. In einer Studie von Adler et al. (2005) wurde dieses Verhältnis für Weidentriebe bestimmt und herausgefunden, dass es bis zu einem Durchmesser von 2 cm zunahm und danach konstant blieb. Für dünne Zweige hingegen war es bis zu drei Mal kleiner.

Für die Berechnung der Massen der $DC > 2$ bzw. $DC > 1$ wurde daher der Literaturwert herangezogen.

5.4 Prädiktoren und Vorhersagemodelle

Der *dbh* der beprobten Apfelbäume nahm insgesamt nur fünf verschiedene Werte an, welche keiner Normalverteilung folgten. Dennoch wurde entschieden, den Einfluss des Parameters auf die Vorhersage mit zu untersuchen, da er den Standardprädiktor in Biomasseschätzungen darstellt (Kuyah und Rosenstock 2015, Parresol 1999, Picard et al. 2012), kleine Stichproben insgesamt nur schwer eine perfekte Normalverteilung erreichen und auch mit nicht normalverteilten Daten eine gute Schätzung der Regressionskoeffizienten erreicht werden kann. Es können jedoch falsche Modellstatistiken resultieren, weshalb die Signifikanz der Modelle, die auf diesem Parameter beruhen, nicht zu hoch zu bewerten ist. Aus diesem Grund wurde für die kombinierten Prädiktoren der Stammdurchmesser auf 30 cm Höhe verwendet.

Auch die Baumhöhe h ist als Prädiktor für den Apfelbestand kritisch zu bewerten. Die Anbauweise sieht eine Orientierung an exakt positionierten Drähten vor, wodurch das Wachstum in die Höhe auf etwa 2.5 m begrenzt ist. Einzelne Zweige

am oberen Ende des Baumes können einen großen Einfluss auf die mit dem TLS gemessene Höhe haben, tragen aber kaum etwas zur gesamten ABM bei. Des Weiteren sind die Daten nicht normalverteilt. Der Vollständigkeit halber wurde die Beziehung zur ABM dennoch betrachtet.

Frühere Studien legen die Anwendung des exponentiellen Modells (Gl. (1)) zur Bestimmung der ABM und eine log-Transformation der Daten nahe, da diese typischerweise exponentielle Zusammenhänge aufweisen und zu Heteroskedastizität neigen, welche durch die Transformation behoben werden kann (Morhart et al. 2013, 2016, Picard et al. 2012, Verwijst und Telenius 1999, Zeng und Tang 2011).

Hier wurde bei der Wahl des Regressionsmodells jedoch von der exponentiellen Form abgewichen, da alle Scatterplots eher auf lineare Zusammenhänge hindeuteten (Abb. 4 und 5). Darüber hinaus wurde auf eine Transformation der Daten verzichtet, da sie auch ohne diese die Bedingungen für eine Regressionsanalyse erfüllten (Ausnahme: *dbh* und *h* bei *Malus domestica*) und sich die Beziehung der abhängigen und unabhängigen Variablen durch eine Transformation nicht merklich veränderte. Dennoch wurde für zwei Prädiktoren, bei denen mit Blick auf den Scatterplot auch ein exponentieller Zusammenhang möglich schien (*d* und *dbh* bei *Malus domestica*), das exponentielle Modell verwendet (Abb. 5 und Tab. 4). Doch selbst hier zeigte der Vergleich der Modellstatistiken eine geringfügig bessere Anpassung des linearen Modells, was die Wahl für die restlichen Prädiktoren bestätigte.

Dass in vorliegender Untersuchung kaum exponentielle Beziehungen zu erkennen waren, könnte dem begrenzten Bereich geschuldet sein, in dem die Daten lagen. Es wurden nur gleichaltrige Bäume betrachtet, deren ABMs und Stammumfänge keine große Spannbreite abdeckten. Selbst wenn die Beziehungen zwischen Parametern und ABM für diese Populationen dem exponentiellen Modell folgten, konnte ein kleiner Ausschnitt der Kurve linear angenähert werden. Welches Modell die Zusammenhänge auf den untersuchten Anlagen besser beschreibt, kann also anhand der betrachteten Stichprobe nicht beurteilt werden. Sicher ist jedoch, dass ein lineares Modell für den Größenbereich, den die Bäume aktuell abdecken, gute Schätzungen liefert.

Weiterhin wurde der Intercept α in der Analyse mit geschätzt. Zwar ergäbe eine logische Vorbetrachtung, dass ein Wert von 0 für jeden Prädiktor (*d*, *b*, *V_{fol}* usw.)

einen Wert von 0 für die ABM zur Folge hätte. Da aber nur ein ausgewählter Bereich untersucht wurde (s. oben), erwies sich diese Herangehensweise als ungeeignet.

Die aus den TLS-Daten herangezogenen Prädiktoren hatten in allen Fällen nur geringe Aussagekraft. Das Volumen, auf Grundlage einer modellierten Baumform bestimmt, schließt sämtliche Zwischenräume im Inneren der Krone mit ein. Es enthält also keine Information über die Anzahl und Dicke der Segmente, aus denen der Baum zusammengesetzt bzw. wie dicht die Krone ist. Da aber genau dies die Holzmasse ausmacht, spiegeln V_{fol} und V_{defol} nicht die ABM wider.

Da V_{fol} eine gleichmäßigere Form der Krone abbildet, ergab sich hier vermutlich eine höhere Korrelation mit der ABM. Denn ein kräftigerer Baum weist im Allgemeinen auch eine ausladendere Krone auf.

Interessant wäre eine weiterführende Untersuchung des Kronenvolumens als Prädiktor für die Laubmasse.

Dass sich die Baumhöhe als ungeeignet erwies, liegt vermutlich an der Vereinheitlichung der Wuchsformen durch intensiven Pflegeschnitt. Der Parameter h ist jedoch bereits in anderen Studien kritisch betrachtet worden, da er auch bei wild wachsenden Bäumen nicht maßgeblich zum Erklärungsgehalt der Modelle beiträgt und seine Erhebung meist fehlerbehaftet ist (Kuyah und Rosenstock 2015).

Für die Apfelanlage empfiehlt sich die Vermessung des Stammdurchmessers auf 30 cm Höhe. Der dbh mag eine größere Aussagekraft haben, jedoch ließ die Stichprobe dieser Untersuchung die Schätzung eines verlässlichen Modells nicht zu.

Wenngleich die ABM durch schnell erhobene Parameter in beiden Obstkulturen gut geschätzt werden kann, so bleibt klar zu stellen, dass unterirdische Biomasse und Früchte bei der Untersuchung vollkommen vernachlässigt wurden. Insbesondere die Apfelbäume weisen im Spätsommer einen, im Verhältnis zur Gesamtbiomasse, hohen Fruchtanteil auf.

5.5 Abschätzung des Wassergehalts

Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Ausgangspunkt für eine Schätzung der in der Vegetation vorhandenen Menge Wasserstoffs, aber auch spezifisch der gespeicherten Wassermenge dienen. Hierbei ist zu beachten, dass der Wassergehalt im Holz saisonalen Schwankungen mit einem Minimum im Herbst und Maximum im späten Winter unterliegt. Außerdem gibt es, besonders ausgeprägt an heißen Sommertagen, tagesperiodische Fluktuationen im Wassergehalt des Xylems. So wurden bei Apfelbäumen zwischen Morgen und Nachmittag Differenzen um bis zu 14% gemessen (Brough et al. 1986).

6 Schlussfolgerung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Methode, die eine zuverlässige und gleichzeitig mit möglichst geringem Arbeitsaufwand verbundene Bestimmung der ABM einzelner Bäume der Obstplantagen am Standort Martquart ermöglicht. Es wurde sich zunächst an Parametern wie dem Stammdurchmesser und der Kronenbreite orientiert, die bereits in früheren Studien verbreitet Anwendung fanden und bestätigt, dass d auch im hier untersuchten Bestand die besten Schätzungen liefert. Andere Prädiktoren, die aus den Daten eines TLS bezogen wurden, zeigten hingegen keine verlässlichen Beziehungen zur Holzbiomasse.

Da alle Bäume der Anlagen gleich alt sind, ist keine große Variation in den Stammdurchmessern und Baumgrößen vorhanden. Bei der Modellierung wurde vom sonst üblichen exponentiellen Modell abgewichen, da in dem begrenzten Größenbereich, den die Stichprobe abdeckt, mit einem einfachen linearen Modell mindestens gleichwertige Ergebnisse erzielt wurden.

Die besten Anpassungen hatten für beide Baumarten die multiplen linearen Modelle, die als Prädiktoren bei *Prunus avium* d und b und bei *Malus domestica* d , dbh und V_{fol} verwenden.

Wenn das Kriterium der Kosteneffizienz beachtet wird, empfiehlt sich jedoch eindeutig die Verwendung des einzelnen Parameter d bzw. d^2 , da die entsprechende Modellierung nur geringfügig schlechtere Ergebnisse liefert. Dies deckt sich mit einer Vielzahl von Studien, die Baumbestände weltweit untersuchten und eine Kosten-Nutzen-Abwägung trafen (Chave 2005, Chave et al. 2005, Kuyah und Rosenstock 2015, Verwijst und Telenius 1999).

Weiterhin wurde festgestellt, dass eine reduzierte Vermessung (z.B. nur starke Segmente bis zu einer bestimmten DC) keine verlässliche Möglichkeit bietet, den Rest des Baumes abzuschätzen und damit die gesamte ABM zu erheben.

Zur Dichtemessung konnten leider nur sehr dünne Zweige verwendet werden. Da diese einen erhöhten Rindenanteil aufweisen und den größeren Volumenanteil des Baumes nicht repräsentieren, wurde für die Umrechnung der Volumenwerte in Biomasse zusätzlich ein Dichtewert für das reine Holz herangezogen.

Die Erhebungen zur Laubmasse zeigten sehr große Unterschiede auf den einzelnen Plots und sind damit ungeeignet, einen pauschalen Mittelwert für den Einzelbaum

abzuleiten.

Die insgesamt genaueste Schätzung mit den hier gewonnenen Erkenntnissen lässt sich für die Bäume außerhalb der Vegetationsperiode im Winter und frühen Frühling machen. Dies entspricht der Zeit der Datenerhebung. Zusätzliche Pflanzenteile wie Knospen, Blätter und Früchte werden zu einem negativen Bias im Ergebnis führen.

Referenzen

- Adler, A., T. Verwijst und P. Aronsson (2005). „Estimation and relevance of bark proportion in a willow stand“. In: *Biomass and Bioenergy*, S. 102–113.
- Andreasen, M. u. a. (2017). „Status and Perspectives on the Cosmic-Ray Neutron Method for Soil Moisture Estimation and Other Environmental Science Applications“. In: *Vadose Zone Journal*.
- Baskerville, G. L. (1972). „Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass“. In: *Canadian Journal of Forestry*, S. 49–53.
- Brough, D. W., H. G. Jones und J. Grace (1986). „Dijurnal changes in water content of the stems of apple trees, as influenced by irrigation“. In: *Plant, Cell and Environment*, S. 1–7.
- Chave, J., C. Andalo u. a. (2005). „Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests“. In: *Oecologia*, S. 87–99.
- Chave, J., H. C. Muller-Landau u. a. (2006). „Regional and phylogenetic variation of wood density across 2456 neotropical tree species“. In: *Ecological Applications*, S. 2356–2367.
- Deutscher Wetterdienst (2021). *Potsdam*. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/wetterundklima_vorort/berlin-brandenburg/potsdam/_node.html (besucht am 26.03.2021).
- Ellenberg, H., R. Mayer und J. Schauer mann (1986). *Ökosystemforschung: Ergebnisse des Sollingprojekts*. Stuttgart: Ulmer, S. 113–118.
- Galeana Pizaña, J. M., J. M. N. Hernandez und N. C. Romero (2016). „Remote sensing-based biomass estimation“. In: *IntechOpen*.
- Gutzeit, W. (24. Feb. 2004). *Kirschen, Holunder und Sanddorn. Obstforschung mit Tradition im Bundessortenamt in Marquardt*. URL: <https://www.pnn.de/potsdam/kirschen-holunder-und-sanddorn/22374142.html> (besucht am 06.03.2021).
- Hackenberg, J. u. a. (2015). „Non destructive method for biomass prediction combining TLS derived tree volume and wood density“. In: *Forests*, S. 1274–1300.
- Harja, D. u. a. (2012). „Tree shape plasticity in relation to crown exposure“. In: *Trees*, S. 1275–1285.

- kaminholz-wissen (2021). *Hartholz oder Weichholz? Werte zur Bestimmung und Definition*. URL: <http://www.kaminholz-wissen.de/hartholz-weichholz.php> (besucht am 22.02.2021).
- Kuyah, S. und T. S. Rosenstock (2015). „Optimal measurement strategies for above-ground tree biomass in agricultural landscapes“. In: *Agroforest Systems*, S. 125–133.
- Leeuwen, M. van und M. Nieuwenhuis (2010). „Retrieval of forest structural parameters using LiDAR remote sensing“. In: *European Journal of Forest Research*, S. 749–770.
- Montagnini, F. und P. K. R. Nair (2004). „Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems“. In: *Agroforestry Systems*, S. 281–295.
- Morhart, C., J. Sheppard, J. K. Schuler u. a. (2016). „Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) - a case study“. In: *Forest Ecosystems*.
- Morhart, C., J. Sheppard und H. Spieker (2013). „Above ground leafless woody biomass and nutrient content within different compartments of a *P. maximowiczii* x *P. trichocarpa* poplar clone“. In: *Forests*, S. 471–487.
- Netto, S. P. und A. Behling (2019). „Additivity of tree biomass components using ratio estimate“. In: *Anais da Academia Brasileira de Ciências*.
- Parresol, B. R. (1999). „Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons“. In: *Forest Science*.
- Picard, N., L. Saint-Andre und M. Henry (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: from field measurement to prediction*. Rome, Montpellier: Food, Agricultural Organization of the United Nations und Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.
- R Core Team (2020). *R: A language and environment for statistical computing*. R foundation for statistical computing. Vienna, Austria.
- Repola, J. (2006). „Models for vertical wood density of Scots pine, Norway spruce and birch stems, and their application to determine average wood density“. In: *Silva Fennica*, S. 673–685.

- Roxburgh, S. H. (2015). „Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: How many individuals to harvest?“ In: *Ecosphere*.
- Sachsse, H. (1984). *Einheimische Nutzhölzer und ihre Bestimmung nach makroskopischen Merkmalen*. Hamburg, Berlin: Parey, S. 104.
- Sheppard, J. u. a. (2017). „Terrestrial laser scanning as a tool for assessing tree growth“. In: *iForest*, S. 172–179.
- SICK AG (2015). *LMS5xx Laser Measurement Sensors Operating Instructions*. SICK AG. Waldkirch, Germany.
- Sprugel, D. G. (1983). „Correcting for bias in log-transformed allometric equations“. In: *Ecology*, S. 209–210.
- Swenson, N. G. und B. J. Enquist (2007). „Ecological and evolutionary determinations of a key plant functional trait: wood density and its community-wide variation across latitude and elevation“. In: *American Journal of Botany*, S. 451–459.
- Trendelenburg, R. und H. Mayer-Wegelin (1955). *Das Holz als Rohstoff*. München: Verlag Hauser, S. 541.
- Tsoulias, N. u. a. (2020). „Apple shape detection based on geometric and radiometric features using a LiDAR laser scanner“. In: *Remote Sensing*.
- Verwijst, T. und B. Telenius (1999). „Biomass estimation procedures in short rotation forestry“. In: *Forest Ecology and Management*, S. 137–146.
- Zeng, W. S. und S. Z. Tang (2011). „A new general allometric biomass model“. In: *Nature Precedings*.
- Zianis, D. und M. Mencuccini (2004). „On simplifying allometric analyses of forest biomass“. In: *Forest Ecology and Management*, S. 311–332.
- Zianis, D., P. Muukkonen u. a. (2005). „Biomass and stem volume equations for tree species in Europe“. In: *Silva Fennica Monographs*.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Alle Teile, die sinngemäß einer Veröffentlichung entstammen, sind als solche kenntlich gemacht.

Weiterhin wurde die Arbeit bisher weder veröffentlicht noch einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Potsdam, 4. Mai 2021

Wibke Linde Richter