Von: Jona David Probst

geboren am: 24.08.1994 in: Berlin

wurde der Fakultät Umweltwissenschaften der Technischen Universität Dresden, Master-Studiengang "Forstwissenschaften"

zur

Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

die Masterarbeit mit dem Thema

„Untersuchung der Auswirkung von hoch anstehendem Grundwasser auf das Wachstum von Hybrid-Pappeln am Beispiel der Sorten Fritzi Pauley und Max3”

vorgelegt.

Tag der Einreichung:	.....
Verantwortliche Hochschullehrerin:	Frau Prof. Dr. Doris Krabel
Verantwortlicher Betreuer:	Dipl. Ing. Alexander Solger
Institut/Professur:	Professur für Forstbotanik

Für die Ausleihe zugelassen/nicht zugelassen

Tharandt, den ....

Vorsitzender des Prüfungsausschusses

Hiermit erkläre ich, dass ich die von mir am heutigen Tage eingereichte Masterarbeit zum Thema:

„Untersuchung der Auswirkung von hoch anstehendem Grundwasser auf Hybrid-Pappeln am Beispiel der Sorten Fritzi Pauley und Max3“

vollkommen selbständig und nur unter Benutzung der in der Arbeit angegebenen Literatur angefertigt habe.

Die Verbindung mit Betrieben, staatlichen Organen oder Einrichtungen usw. wurde nur in den in der Arbeit genannten Fällen im Einverständnis mit dem Betreuer aufgenommen.

Tharandt, den …….

Erklärung zur Ausleihbarkeit der Masterarbeit

Hiermit erteile ich der Sächsischen Landesbibliothek – Staats- und Universitätsbibliothek Dresden, Zweigbibliothek Forstwesen, das Recht, meine Masterarbeit in ihren Räumlichkeiten für jegliche Bibliotheksbenutzung - einschließlich der Präsenznutzung – bereitzustellen.

…….

Datum, Unterschrift des Verfassers

Abstract

The expansion of renewable energies is a key to achieving Germany's climate and energy policy goals. The cultivation of agricultural wood can provide biomass as a regenerative energy source. Marginal sites where conventional agriculture cannot be profitably carried out are particularly suitable for this. The present study investigates to what extent the two poplar varieties Max3 and Fritzi Pauley are suitable for cultivation on waterlogged soils. For this purpose, a greenhouse trial with different irrigation levels was carried out. This showed a significant influence of the irrigation variant on the development of the variety Max3 for the parameters longest shoot, dry leaf mass, longest root, dry root mass and the root-shoot ratio. The development of the variety Fritzi Pauley was only significantly influenced by the irrigation variant with regard to the parameter "longest shoot" and the root-shoot ratio. The genetic factor variety had a statistically significant influence on all parameters. The variety Fritzi Pauley falls behind Max3 in overall growth. However, it reacted less sensitively to the simulated high groundwater. This underlines the suitability of the variety for locations close to water, as in the field trial of the present work. The field trial was set up in a strip of agricultural woody crops near a watercourse that was planted with Fritzi Pauley. The phenology and biomass growth of the study stand were investigated. The present study could not show any concrete influence of the proximity to water on the length of the vegetation period of the individual stand components. The investigations on biomass growth of the different stand compartments showed a variation between the stand edges and the stand interior. A direct influence of the proximity to the watercourse, due to different water availability, could not be proven. Further investigations are necessary to confirm the results of the greenhouse trial on the basis of knowledge gained in the field.

Inhaltsverzeichnis

Abstract **4**
Inhaltsverzeichnis **5**
Abbildungsverzeichnis 6
Tabellenverzeichnis 7
Abkürzungsverzeichnis 8
1. Einleitung **9**
1.1 Hintergrund 9
1.2 Herausforderungen im Zusammenhang mit Agrarholzanbau 11
1.3 Gegenstand der Forschung 12
2. Grundlagen **14**
2.1 Die Gattung Populus 14
2.2 Agrarholzanbau 18
2.3 Autovegetative Vermehrung 20
2.4 Pflanzenentwicklung aus Steckhölzern 22
2.5 Wasserhaushalt der Pflanze 25
2.6 Topfversuche mit Gehölzen 30
3. Material und Methoden **32**
3.1 Gewächshausversuche 32
3.2 Feldversuch 36
3.3 Statistische Auswertung 41
4. Ergebnisse **43**
4.1 Gewächshausversuch Max3 43
4.2 Gewächshausversuch Fritzy Pauley 49
4.3 Vergleich Max3 / Fritzi Pauley 2021 54
4.4 Feldversuch Peickwitz 60
5. Diskussion **66**
5.1 Material und Methodik 67
5.2 Gewächshausversuch: Einfluss der Bewässerungsvariante 70
5.3 Gewächshausversuch: Einfluss der Sortenwahl 73
5.3 Feldversuch: Einfluss des Fließgewässers 76
6. Zusammenfassung und Ausblick **79**
7. Quellenverzeichnis **81**
Anhang **96**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Pappel in KG-Rohr ……33

Abbildung 2: Temperaturverlauf [C°] und relative Luftfeuchte [%] der durchschnittlichen Tageswerte in Kabine 1 ……....34

Abbildung 3: Temperaturverlauf [C°] und relative Luftfeuchte [%] der durchschnittlichen Tageswerte in Kabine 2 ……....35

Abbildung 4: Untersuchungsgebiet Peickwitz, verändert nach GOOGLE (2021)…….36

Abbildung 5: Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300 000 – Grundkarte Bodengeologie, LGB(2001) ..……...37

Abbildung 6: Lageplan der Untersuchungsfläche ……....39

Abbildung 7: USB-Datenlogger und zentraler Datenlogger ...……..…40

Abbildung 8: Baum 64 mit Dendrometer ...……..40

Abbildung 9: Längste Wurzel Max3 ……....43

Abbildung 10: Trockenmasse der Wurzeln Max3 ....……44

Abbildung 11: Längster Trieb Max3 ...…….....45

Abbildung 12: Trockenmasse der Triebe Max3 ……46

Abbildung 13: Trockenmasse der Blätter Max3 ...……46

Abbildung 14: Blattfläche Max3……....47

Abbildung 15: Wurzel-Spross-Verhältnis Max3……48

Abbildung 16: Längste Wurzel Fritzi Pauley.……49

Abbildung 17: Trockenmasse der Wurzeln Fritzi Pauley……..50

Abbildung 18: Längster Trieb Fritzi Pauley……..50

Abbildung 19: Trockenmasse der Triebe Fritzi Pauley.……51

Abbildung 20: Trockenmasse der Blätter Fritzi Pauley ……...….52

Abbildung 21: Blattfläche Fritzi Pauley ……52

Abbildung 22: Wurzel-Spross-Verhältnis Fritzi Pauley…….53

Abbildung 23: Längste Wurzel Max3 & Fritzi Pauley ……54

Abbildung 24: Trockenmasse der Wurzeln Max3 & Fritzi Pauley……55

Abbildung 25: Längster Trieb Max3 & Fritzi Pauley ……...56

Abbildung 26: Trockenmasse der Triebe Max3 & Fritzi Pauley ……..57

Abbildung 27: Trockenmasse der Blätter Max3 & Fritzi Pauley ……..57

Abbildung 28: Blattfläche Max3 & Fritzi Pauley ……58

Abbildung 29: Wurzel-Spross-Verhältnis Max3 & Fritzi Pauley……..59

Abbildung 30: Anteil der Austriebsphasen im Zeitverlauf innerhalb des Plots…….60

Abbildung 31: Anteil der Austriebsphasen im Zeitverlauf innerhalb des Restbestandes.……....61
Abbildung 32: Zeitliche Entwicklung des Blattfalls innerhalb des Plots……...62
Abbildung 33: Zeitliche Entwicklung des Blattfalls innerhalb des Restbestandes…...62
Abbildung 34: BHD-Mittelwert der Reihen 2020……..64
Abbildung 35: BHD-Mittelwert der Reihen 2021……..64

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Signifikanzen von Parameterkombinationen…….59
Tabelle 2: BHD-Zuwachs der Reihen…….65

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
AR6	Assessment Report 6
BKZ	Bodenklimazahl
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMJV	Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz
BWaldG	Bundeswaldgesetz
BWG	Bodenwassergehalt
DIN	Deutsche Industrie Norm
DN	Diameter Nominal
DWD	Deutscher Wetterdienst
EG	Europäische Gemeinschaft
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
et al.	et alii / et aliae / et alia
EU	Europäische Union
EUFORGEN	European Forest Genetic Resources Programme
Fa.	Firma
FoVG	Forstvermehrungsgutgesetz
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
IPC	International Commission on Poplars
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KG	Kommanditgesellschaft
KG-Rohr	Kanalgrundrohr
KUP	Kurzumtriebsplantage
LGB	Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
MLUV	Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz
n.Br.	nördlicher Breite
nFK	nutzbare Feldkapazität
NN	Normalnull
OLGA	Optimierung der Landnutzung an Gewässern und auf Agrarflächen
SPAC	Soil Plant Atmosphere Continuum
TM	Trockenmasse
VLO	Versuchs- und Lehrobjekt
Vol.	Volumen

1. Einleitung

1.1 Hintergrund

Der vom Menschen verursachte Klimawandel wirkt sich bereits auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt aus (IPCC, 2021). Das Jahresmittel der Lufttemperatur ist in Deutschland von 1881 bis 2019 um 1,6 ˚C gestiegen (DWD, 2019). Gerade in Brandenburg ist der Klimawandel anhand von Wetterdaten deutlich messbar. Die Jahre 2018 und 2020 waren in dem nordöstlichen Bundesland mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von jeweils 10,8 ˚C die zweitwärmsten, das Jahr 2019 mit 11,1 ˚C das wärmste seit Beginn der Aufzeichnungen 1881. Sieben der zehn wärmsten Jahre seit Aufzeichnungsbeginn fielen in den Zeitraum von 2000 bis 2020. In sechs der vergangenen sieben Jahre sind zudem unterdurchschnittliche Niederschläge verzeichnet worden (DWD, 2021a).

Die globale Oberflächentemperatur wird bei allen im sechsten Sachstandsbericht (AR6) des Weltklimarats (IPCC) betrachteten Emissionsszenarien bis mindestens Mitte des 21. Jahrhunderts weiter ansteigen. Viele Veränderungen im Klimasystem werden in unmittelbarem Zusammenhang mit der zunehmenden globalen Erwärmung größer. Dazu gehören die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzeextremen und Starkniederschlägen sowie landwirtschaftliche und ökologische Dürren (IPCC, 2021). Die globale Klimaerwärmung entsprechend der UN-Klimakonferenz 2015 in Paris auf maximal 2 ˚C zu beschränken, kann nur gelingen, wenn in den kommenden Jahrzehnten drastische Reduktionen der CO_2- und anderer Treibhausgasemissionen erfolgen (DGVN, 2016; IPCC, 2021).

Damit Deutschland seinen zugesicherten Beitrag zum Erreichen des in Paris ratifizierten UN-Klimaabkommens erreicht, ist ein energetischer Wandel nötig. Denn der Energiesektor verursachte im Jahr 2020 82,8 % der anthropogenen Treibhausgasemissionen in Deutschland (UMWELTBUNDESAMT, 2021a). Eine gesteigerte Nutzung erneuerbarer Energien führt zu einer Verdrängung fossiler Energieträger und somit zu einer zunehmenden Vermeidung klimaschädlicher Treibhausgase (UMWELTBUNDESAMT, 2021b). Als Bezugsgröße für den Anteil und den Ausbau der erneuerbaren Energien wird, entsprechend dem Energiekonzept der Bundesregierung und der EG-Richtlinie 2009/28/EG, der Bruttoendenergieverbrauch

herangezogen. Dieser umfasst neben dem Endenergieverbrauch an Strom, Wärme und Kraftstoffen, auch die damit einhergehenden Umwandlungs- und Übertragungsverluste, einschließlich der Eigenverbräuche der Erzeugungsanlagen (UMWELTBUNDESAMT, 2021c).

In den letzten Jahrzehnten entwickelten sich die erneuerbaren Energien rasant: Lag ihr Anteil am Bruttostromverbrauch im Jahr 2000 noch bei etwa 6,2 %, stieg er bis 2020 auf 45,4 %. Auch beim Bruttoendenergieverbrauch stieg der Anteil der erneuerbaren Energien an - allerdings deutlich langsamer, von 6,2 % im Jahr 2004 bis auf 19,6 % im Jahr 2020 (UMWELTBUNDESAMT, 2021b). Bis zum Jahr 2030 sieht der am 10. Juni 2020 beschlossene "Nationale Energie- und Klimaplan" den Ausbau der erneuerbaren Energien auf 30 % am Bruttoendenergieverbrauch für Deutschland vor (PRESSE-UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG, 2021). Aufgrund der stark gesunkenen Ausbaudynamik der letzten Jahre sind erhebliche zusätzliche Anstrengungen notwendig, um dieses Ziel zu erreichen (UMWELTBUNDESAMT, 2021b).

Während Wind- und Wasserkraft sowie Fotovoltaik fast ausschließlich zur Stromerzeugung aus regenerativen Quellen dienen, spielt die Biomasse im Bereich der Wärme- und Kraftstoffbereitstellung mit Abstand die wichtigste Rolle (BMWI, 2021). Biomasse wird in verschiedenen Aggregatzuständen zur Strom- und Wärmeerzeugung, sowie zur Herstellung von Biokraftstoffen genutzt. Unter den erneuerbaren Energien tragen die Biomassen mit knapp 23 % zur Stromerzeugung, mit 86 % zum Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte und mit 88 % zum Endenergieverbrauch im Verkehr bei (BMWI, 2021).

Folglich kann ein weiterer Ausbau der Nutzung von Biomasse einen entscheidenden Teil zum Erreichen der deutschen klima- und energiepolitischen Ziele beitragen. Dies kann entweder durch eine Erhöhung des Anteils der Biomassen am Bruttoendenergieverbrauch oder einen Wandel in der Produktionsart unter Nutzung positiver Sekundäreffekte erfolgen. Der Anbau von schnellwachsenden Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen (Agrarholzanbau) bietet hier eine ernstzunehmende Option. Jedoch ergeben sich im Zusammenhang mit dem Anbau von Agrarholzkulturen Herausforderungen in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit und Wasserverfügbarkeit.

1.2 Herausforderungen im Zusammenhang mit Agrarholzanbau

Um sich im Konkurrenzgefüge der landwirtschaftlichen Produktion behaupten zu können, müssen Agrarholzkulturen von Entscheidungsträgern in Agrarbetrieben akzeptiert werden (MEYER, 2010). Dazu ist es notwendig, dass Agrarholzkulturen vertretbare wirtschaftliche Ergebnisse erzielen oder andere innerbetriebliche Funktionen übernehmen. Die Netto-Biomasseerträge von Agrarholzbeständen sind jedoch meist geringer als bei anderen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen (BOEHMEL et al., 2008). Gegenüber traditionellen landwirtschaftlichen Kulturen für Bioenergie, wie z. B. Mais, liegt der Vorteil von Agrarholzbeständen in ihren positiven ökologischen Auswirkungen (AMTHAUER GALLARDO, 2014). Abgesehen von der Bestandsbegründung und den damit einhergehenden Vorarbeiten, sind weder Bodenbearbeitung, Düngung noch Pflanzenschutz notwendig. Dies führt in Zusammenhang mit anderen Effekten wie z.B. dem erhöhten Nahrungsangebot für Mikroorganismen durch Streufall und Begleitvegetation oder der tieferen Durchwurzelung zu geringerer Erosionsanfälligkeit (Wind- und Wassererosion) und Schadstoffauswaschung sowie verbesserter Trinkwasserqualität (ZACIOS et al., 2012).

Im Vergleich zur traditionellen Forstwirtschaft liegt der große Vorteil des Agrarholzanbaus in den sehr hohen Erträgen (SCHIRMER, 1996). Während die Hauptbaumarten der deutschen Forstwirtschaft (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche) frühestens nach 40 Jahren ihre maximale Wuchsleistung erreichen (kulminieren), benötigen Pappeln zwischen 20 und 30 Jahre (SCHOBER, 1987). Nach entsprechender züchterischer Bearbeitung kulminieren die im Agrarholzanbau eingesetzten Hochleistungsklone der Pappel nochmal bedeutend früher. Der durchschnittliche jährliche Bruttozuwachs der Fichte auf dem Gebiet der alten Bundesländer zwischen 1987 und 2002 beträgt 7,64 t TM/ha/a (ENGLERT, 2009; FNR, 2020). Vergleicht man diesen Wert mit den durchschnittlichen Massenzuwächsen von im Kurzumtrieb genutzten Pappelklonen im mittleren (7-9 t TM/(ha a)) oder hohen (10-18 t TM/(ha a)) Ertragsniveau, wird deutlich, welche enormen Potenziale im Agrarholzanbau liegen. Deutlich wird allerdings auch, dass das Ertragsniveau von Agrarholzbeständen je nach Standort stark variiert. Da Pappeln einen sehr hohen Wasserverbrauch haben, werden die Erträge wesentlich von der Wasserversorgung beeinflusst (LEWANDOWSKI et al., 2009; MONCLUS et al.,

2005). Steht der Grundwasserkörper den Pflanzen als Wasserquelle zur Verfügung, stellt Wassermangel jedoch keinen limitierenden Wachstumsfaktor dar (BÖHM et al., 2018).

1.3 Gegenstand der Forschung

Mit dem Fortschreiten des Klimawandels und der energetischen Transformation in Deutschland nimmt auch das Interesse am Agrarholzanbau seit einigen Jahren zu. Im Zuge dessen hat sich die Wissenschaft damit auseinandergesetzt, unter welchen Umständen der Anbau von Agrarholz wirtschaftlich sein kann. Dabei hat sich ergeben, dass Agrarholz auf traditionellen Landwirtschaftsstandorten monetär nicht mit klassischen Kulturpflanzen konkurrieren kann (KRÖBER et al., 2008). Folglich sind agrarökologische Sonderstandorte für zukünftige Anbaupotenziale besonders interessant (BÖHM & VESTE, 2018b). Zu diesen Sonderstandorten zählen einerseits Flächen, die für eine normale landwirtschaftliche Nutzung zu trocken, zu steinig oder zu feucht sind, andererseits handelt es sich um Grenzertragsflächen und Ränder von Bewirtschaftungsparzellen (SCHROERS, 2006). Vorausgegangene Untersuchungen beschäftigten sich überwiegend mit der Reaktion von Pappelsteckhölzern auf Wasserverfügbarkeit im Sinne von Wassermangel (vgl. KRABEL et al., 2015, 2018; MÜLLER, 2013; SCHUSTER, 2017). Daher untersucht diese Arbeit, inwiefern sich Gewässernähe bzw. hoch anstehendes Grundwasser auf das Wachstum von Hybridpappeln auswirkt.

Diese Zielsetzung wird durch folgende Forschungsfragen konkretisiert:

1. Welchen Einfluss hat die Wasserverfügbarkeit/Staunässe auf das frühe Wurzel- und Sprosswachstum bei Pappelsteckhölzern?

Hierzu werden folgende Hypothesen untersucht:

H1: Der Faktor Wasser hat einen Einfluss auf die Triebmasse.

H2: Der Faktor Wasser hat einen Einfluss auf die Blattmasse/Blattfläche.

H3: Ein Überangebot an Wasser führt zur Ausbildung einer geringeren Wurzelmasse.

H4: Eine geringere Wasserverfügbarkeit führt zur Ausbildung einer größeren Wurzellänge, um verfügbares Wasser in tieferen Bereichen des Bodens zu erschließen.

2. Welchen Einfluss hat die Sortenwahl auf das frühe Wurzel- und Sprosswachstum bei Pappelsteckhölzern?

Hierzu werden folgende Hypothesen untersucht:

H5: Der genetische Faktor Sorte hat einen Einfluss auf die Triebmasse.

H6: Der genetische Faktor Sorte hat einen Einfluss auf die Blattmasse/Blattfläche.

H7: Der genetische Faktor Sorte beeinflusst die Wurzellänge.

H8: Der genetische Faktor Sorte beeinflusst die Wurzelmasse.

3. Welchen Einfluss hat der Abstand zum Fließgewässer auf die Wuchsparameter der Pappelbestockung?

Hierzu werden folgende Hypothesen untersucht:

H9: Der Abstand zum Fließgewässer hat einen Einfluss auf die Länge der Vegetationsperiode (Austriebszeitpunkt-Blattfall).

H10: Der Abstand zum Fließgewässer hat einen Einfluss auf den oberirdischen Biomassezuwachs.

Die Untersuchungen für die vorliegende Abschlussarbeit fanden im Rahmen des *Stadt-Land-Plus-Projektes* OLGA *statt*. OLGA steht für **O**ptimierung der **L**andnutzung an **G**ewässern und auf **A**grarflächen zur nachhaltigen Entwicklung der Region Dresden. Das Projekt ist in vier Module eingeteilt und beruht auf hydrologischen, forstwissenschaftlichen, umweltpsychologischen und ökonomischen Forschungs- und Umsetzungsarbeiten. Die vorliegende Thesis ist dem Modul 1 „Nachhaltige Holznutzung an Fließgewässern“ zuzuordnen (LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, 2021a,b). Das OLGA-Projekt zielt auf die Verbesserung der ökologischen Funktion von Auen und Flussläufen und die Schaffung von regionalen Wertstoffkreisläufen in der Region Dresden ab. Der Anbau von Energieholz an Fließgewässern in Kombination mit landwirtschaftlicher Produktion und regionalem Vertrieb der Produkte stehen dabei im Mittelpunkt. (LANDESHAUPTSTADT DRESDEN, 2021a).

2. Grundlagen

Als Grundlage für die Untersuchung der oben beschriebenen Forschungsfragen, werden in diesem Kapitel wichtige Begriffe und Sachzusammenhänge erklärt.

2.1 Die Gattung Populus

Die Gattung *Populus* aus der Familie der Salicaceae umfasst, je nach Autor, 24-89 Arten und ist in die Klasse der Magnoliopsida einzuordnen (ECKENWALDER, 1996; HESMER, 1951). Die Gattung wird wiederum in die sechs Sektionen *Populus*, *Leucoides*, *Tacamahaca*, *Aigeiros*, *Turanga* und *Abaso* unterteilt (ECKENWALDER, 1996). Ihr natürliches Verbreitungsgebiet befindet sich überwiegend auf der Nordhalbkugel, aber auch Teile Südamerikas und Nordafrikas werden von einzelnen Arten besiedelt (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). Pappeln kommen häufig an Flussläufen oder in Ufernähe vor und bilden mit Weiden und Erlen die Weichholzaue, die tiefste Auwaldstufe (MOSNER et al., 2010). Daneben wachsen sie in temperaten, borealen und montanen Wäldern. Viele Pappelarten sind aufgrund ihres raschen Jugendwachstums, ihrer Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Fähigkeit zur vegetativen Vermehrung aggressive Kolonisten auf Störflächen (ZALESNY et al., 2005). Nimmt man ihren hohen Strahlungsbedarf und die, mit seltenen Ausnahmen, relativ geringe Lebenserwartung von 60 bis 100 Jahren hinzu, können sie den Pionier-Gehölzen zugeordnet werden (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014; BENETKA et al., 2014).

Entsprechend dem Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit, sollen nachfolgend die Sektionen *Aigeiros* und *Tacamahaca* und ihre relevanten Arten genauer beschrieben werden.

2.1.1 Die Sektion *Aigeiros*

Die Taxa der Sektion ***Aigeiros*** (Schwarzpappeln) – reine Arten und Hybriden - wurden mit den Anfängen der Plantagenzucht weltweit die bedeutendsten Mitglieder der Gattung *Populus*. Ursprünglich in Eurasien und Nordamerika beheimatet, wurden und werden Pappeln der Sektion Aigeiros auf allen Kontinenten gepflanzt. Ökologisch gesehen umfasst diese Sektion einige der wichtigsten Auwald-Pappeln der nördlichen Hemisphäre, die zusammen mit den anderen Arten der Weichholzaue ein prägendes

Element dieser Lebensräume sind. Die Sektion umfasst *Populus deltoides*, *P. fremontii* und *P. nigra* (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014).

Populus nigra ist heimisch in den gemäßigten Klimabereichen Europas, Nordafrikas sowie West- und Zentralasiens (WEISGERBER, 1999). Obwohl es sich bei *P. nigra* um die Typusart der Sektion handelt, unterscheidet sie sich in vielen Eigenschaften von den beiden nordamerikanischen *Aigeiros-Pappeln* und ähnelt eher den Vertretern der *Tacamahaca* Sektion. Außerdem finden sich in der Chloroplasten-DNA *P. nigras* eindeutige Kongruenzen mit *P. alba* der Sektion Populus (SMITH & SYTSMA, 1990).

Populus nigra kann Höhen von 35 m und Durchmesser von maximal 2 m erreichen. Ihre Lebensdauer beträgt etwa 100 Jahre, einzelne Exemplare können aber bis zu 300 Jahre alt werden (AAS, 2006). Kennzeichnend ist der oft gekrümmte oder geschwungene Stamm und die unregelmäßig verzweigte Krone, die oft früh von Kronenauflösung betroffen ist (JOACHIM, 2000). Einige Bestände bringen jedoch gerade, gut geformte Individuen hervor, von denen viele vegetativ vermehrt wurden. 40 Klone von *P. nigra* sind derzeit bei der *International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment* (IPC) registriert (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014).

Die *Schwarzpappel* (*P. nigra*) ist eine klassische Pionierbaumart und ein charakteristischer Bestandteil der Flussläufe und Auwaldbiotope (WEISGERBER, 1999). Die hohe menschliche Bevölkerungsdichte innerhalb ihres natürlichen Verbreitungsgebietes, kombiniert mit einer langen Geschichte der Einführung fremdländischer Pappeln, haben dazu geführt, dass die natürlichen *P. nigra*-Bestände enorm zurückgedrängt wurden. Die Introgression exotischer Pappelgene in die autochthonen Populationen und die Störung von Uferökosystemen durch Flussbegradigung, Kanal-, Damm- und Deichbau bedrohen die genetische Integrität dieser Art (VANDEN BROECK, 2003). In der Tat sehen viele Botaniker *P. nigra* als eine der meist bedrohten Baumarten in Europa. Zum Schutz bestehender natürlicher *P. nigra*-Bestände und deren Inventatisierung werden die Anlage von Schemel und Samenplantagen, Anpflanzung in Flusslebensräumen und der Schutz vor tierischen Schäden eingesetzt. Die Koordinierung dieser Bemühungen erfolgt durch EUFORGEN, das Europäische Genetische Ressourcen Programm (FRISON et al., 1995; VANDEN BROECK, 2003).

Die einfache vegetative Vermehrbarkeit, ihre Genügsamkeit hinsichtlich der Bodentextur und ihre Toleranz gegenüber Pathogenen sind, neben ihrer Raschwüchsigkeit, ursächlich für den schon lange praktizierten Plantagenanbau (WEISGERBER, 1999). *P. nigra* ist ein Elternteil vieler Hybridkreuzungen, die sich entweder spontan herausbildeten oder zur Steigerung der Leistungsfähigkeit gezielt von Pappelzüchtern durchgeführt wurden (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). In jüngerer Zeit hat sich *P. nigra* als Partner in zahlreichen Kreuzungen mit Taxa der Sektion *Tacamahaca*, darunter die asiatischen *P. maximowiczii*, *P. laurifolia*, *P. simonii*, *P. cathayana* und der nordamerikanischen *P. trichocarpa*, bewährt. Klone dieser Hybriden wurden und werden vielfach für die Plantagenholzproduktion verwendet. Allein fünf *P. nigra* × *P. maximowizcii* - Hybriden (Max 1,…,**Max 3**,…,Max 5) sind derzeit in der Datenbank des *IPC* registriert (*IPC*, 2021).

2.1.2 Die Sektion *Tacamahaca*

Die Sektion ***Tacamahaca*** (Balsampappeln) ist taxonomisch umstritten. Je nach Quelle enthält diese Sektion nur neun (ECKENWALDER, 1996) oder bis zu 40 (FANG et al., 1999) Taxa. Weitgehend mit Ufer- oder Feuchtbiotopen assoziiert, sind Balsampappeln vor allem in der nördlichen Hemisphäre verbreitet. Eine Art, *Populus yunnanensis*, ist jedoch subtropisch (ROLOFF & SCHÜTT, 1999). Mehrere Arten der Sektion werden kommerziell genutzt. Drei Arten sind in Nordamerika autochthon, die übrigen in Asien. (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014).

Das ursprüngliche Verbreitungsgebiet von ***Populus maximowiczii*** umfasst die niedrigen bis mittleren Höhenlagen des nordöstlichen China, des östlichen Russlands und Koreas. Am häufigsten wird das Taxon jedoch mit dem nördlichen Japan assoziiert (HESMER, 1951; DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). Ihr typischer Lebensraum sind Flussschotterbänke, fluviale Ebenen und niedrige Terrassen, in Japan besiedelt sie aber auch die vulkanische Asche an den niedrigen Hängen aktiver Vulkane (HARUKI & TSUYUZAKI, 2001).

Die *Japanische Pappel (P. maximowiczii)* ist ein schnellwüchsiger Baum, der Höhen von 30 m und Durchmesser von 2 m erreichen kann. Die Borke an älteren Stämmen ist grau und tief gefurcht (HESMER, 1951). Dieses Taxon ist eines der bekanntesten unter den asiatischen Pappeln, da sie ein Elternteil vieler intra- und intersektionellen Hybriden ist

(DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). Erfolgreiche Verpaarungen von *P. maximowiczii* fanden mit *P. balsamifera*, *P. ciliata*, *P. deltoides*, *P. nigra* und *P. trichocarpa* statt. Einige der am schnellsten wachsenden Hybridkreuzungen des historischen Nordamerikanischen-Pappel-Zuchtprojektes der *Oxford Paper Company* verwendeten *P. maximowiczii* als weiblichen Elternteil (STOUT & SCHREINER, 1933). Zurzeit sind zehn Hybride von *P. maximowiczii* bei der *International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment* registriert (IPC, 2021).

P. maximowiczii kann in fremdländischen Habitaten sehr anfällig für Stammkrebs sein. Die durch den Stammkrebs *Septoria musiva* ausgelöste Schädigung kann betroffene Individuen stark deformieren und schließlich abtöten. Einige Hybriden *mit P. nigra* aus europäischen Kreuzungsversuchen haben eine bessere Resistenz gegen Krebs gezeigt, obwohl auch sie nicht völlig immun sind (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014).

Populus trichocarpa hat ihr natürliches Verbreitungsgebiet im Westen Nordamerika von Mexiko (31˚ n. Br.) bis Alaska (62˚ n. Br.). Sie ist ein Baum der feuchten Moränen- und Überschwemmungsstandorte, wo sie in Reinbeständen oder sozialisiert mit anderen Laub- und Nadelhölzern wächst. Optimale Wuchsbedingungen findet P. trichocarpa in den von feuchter Pazifikluft dominierten Flussniederungen des Nordwestens (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). In vom Ozean dominierten Klimaregionen kommt sie bis zu einer Höhe von 1500 m vor. Im Landesinneren kann man sie auch noch auf 2100 m (British Columbia) bzw. 2700 m (Sierra Nevada) finden (ROLOFF & SCHÜTT, 1999).

Die *Westliche Balsam-Pappel* (*P. trichocarpa)* ist die größte nordamerikanische Pappelart und kann Baumhöhen von 50 m und Durchmesser um 1,50 m erreichen (WEISGERBER, 1999). Einzelne Exemplare erreichen noch erstaunlichere Ausmaße von 60 m Höhe und bis zu 4 m Durchmesser (SCHENCK, 1939; VIERECK & FOOTE, 1970). An der Basis älterer Stämme entwickelt sich eine graue Borke, die erst in papierartigen Schichten abblättert und schließlich durch tiefe, ungleichmäßige Längsrisse geprägt wird (HESMER, 1951; WEISGERBER, 1951). Im Bestand gewachsene Altbäume bestechen durch gerade und walzenförmige Stämme, schlanke, zylindrische Kronen und wenige starke, aufwärtsgerichtete Hauptäste. *P. trichocarpa* lässt sich sehr gut durch Steckhölzer vermehren, sie treibt leicht aus abgeschnittenen Stümpfen aus und produziert reichlich Wurzelschösslinge (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014).

Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften wurde und wird *P. trichocarpa* in zahlreichen Ländern der gemäßigten Klimazonen intensiv züchterisch bearbeitet (WEISGERBER, 1999). Nach anfänglichen Misserfolgen gelang es, durch eine Erweiterung der Sortenbasis und die Selektion leistungsstarker Klone und Mehrklonsorten, auch Pappelzüchtern in Europa das Potenzial des Taxons nutzen (FRÖHLICH & GROSSCURTH, 1973; MÜLLER & SAUER, 1972). Es entstanden Klone der reinen Art und Hybride, die ertragreichere Alternativen zu den traditionellen euramerikanischen Klonen sein können (DICKMANN & KUZOVKINA, 2014). Derzeit sind 16 Klone von *P. trichocarpa* (u.a. ***Fritzi-Pauley***) und 12 Klone von *P. x generosa* bei der *International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment* registriert (IPC, 2021).

2.2 Agrarholzanbau

Als Agrarholzanbau bezeichnet man den Anbau von Forstpflanzen auf landwirtschaftlichen Flächen (BÖHM & VESTE, 2018a). Es handelt sich also um die Kombination zweier klassischer Landnutzungsformen. Die Sonderstellung des Agrarholzanbaus als Landnutzungsform wird im Folgenden anhand der rechtlichen Rahmenbedingungen verdeutlicht.

2.2.1 Rechtliche Einordnung

Die Ausgestaltung von Agrarholzbeständen wird maßgeblich durch rechtliche Rahmenbedingungen bestimmt. In der Vergangenheit war oftmals die Komplexität des rechtlichen Rahmens ein Hinderungsgrund für die Anlage neuer Agrarholzflächen (BÄRWOLFF et al., 2013). Es gibt eine Vielzahl von rechtlichen Bestimmungen, die von bundeseigenen Gesetzen und der gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union bzw. deren Richtlinien zur EU-Agrarförderung definiert werden (BÖHM & VESTE, 2018b). Dabei sind die nachfolgend geschilderten Richtlinien von besonderer Relevanz für diese Arbeit.

Agrarholzbestände sind landwirtschaftliche Kulturen und kein Wald im Sinne des Bundeswaldgesetzes (BwaldG). Agrarholzbestände dürfen in Deutschland nur auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden. Die Umwandlung von klassischem Wald in einen Agrarholzbestand ist gesetzlich ausgeschlossen (BMJV, 2021a).

Landwirtschaftliche Flächen, für die Zahlungsansprüche geltend gemacht werden sollen, müssen gemäß §18 der Verordnung über die Durchführung von Stützungsregelungen und des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsystems eine Mindestgröße von 0,3 ha aufweisen (BMJV, 2021b). Diese Regelung ist auch für Agrarholzflächen, einschließlich Agroforstsysteme, maßgebend. Um eine Förderfähigkeit zu gewährleisten, müssen folglich auch kleinflächige Agrarholzareale, die z.B. Teil eines größeren Agroforstsystems sind, diese Mindestgröße erfüllen (BÖHM & VESTE, 2018b).

Die Anlage 1 der Direktzahlungen-Durchführungsverordnung führt die „für Niederwald mit Kurzumtrieb geeigneten Arten" auf, für die ein Anspruch auf Flächenprämie besteht. Hierzu zählen alle Weiden- und Pappelarten (*Salix spec., Populus spec*.) und ihre Hybride, alle Birken- und Erlenarten (*Betula spec., Alnus spec*.), Stiel-, Trauben- und Roteiche (*Quercus robur, Q. petraea, Q. rubra*) sowie die Robinien (*Robinia spec*.) und die Gemeine Esche (*Fraxinus excelsior*). Eine Besonderheit bildet der Agrarholzanbau auf ökologischen Vorrangflächen. Auf diesen Flächen sind nur autochthone Weiden- und Pappelarten einschließlich ihrer Hybride zulässig. Ebenfalls förderfähig auf ökologischen Vorrangflächen sind die Hängebirke (*Betula pendula*), Schwarz- und Grauerle (*Alnus glutinosa, A. incana*), die Gemeine Esche sowie Stiehl und Traubeneiche (BMJV, 2021c). Das für den Agrarholzanbau verwendete Saat- und Pflanzgut unterliegt generell dem Forstvermehrungsgutgesetz (FoVG). Das FoVG berücksichtigt mit Ausnahme der Weide alle o.g. Baumarten (BMJV, 2021d).

Auch in Bezug auf die Umtriebszeit existieren rechtliche Beschränkungen, die bei Anlage und Bewirtschaftung von Agrarholzbeständen zu beachten sind. Damit Agrarholzbestände ihren Status als landwirtschaftliche Dauerkulturen behalten, darf die maximale Rotationsdauer 20 Jahre nicht überschreiten (BMJV, 2021b). Entscheidend ist hierbei die rechtzeitige Ernte der oberirdischen Bestandesteile. Die Wurzelstöcke können als Basis für den nächsten Umtrieb auf der Fläche verbleiben. Folglich kann die Gesamtnutzungsdauer einer Agrarholzfläche durch Nutzung des Stockausschlagsvermögens der jeweiligen Baumart mehrere Rotationen umfassen und einige Jahrzehnte betragen (BÖHM &VESTE, 2018b).

2.2.2 Begriffsklärung „Kurzumtriebsplantage“

Der Begriff Kurzumtriebsplantage tauchte in Deutschland erstmals auf, als in den 1970er Jahren in Hessen Pappel-Versuchsflächen zur Biomassegewinnung angelegt wurden (WEISGERBER, 1975). Eine Definition für Baumplantagen allgemein, die häufig analog für Kurzumtriebsplantagen angewendet wird, liefert THOMASIUS (1991): „Baumplantagen sind der Produktion spezieller Forsterzeugnisse dienende, nach geometrischen Prinzipien geordnete Anpflanzungen besonders dafür geeigneter Baumarten, Rassen oder Sorten auf von Natur aus oder durch künstliche Zubereitung sehr produktiven Standorten, die bei hinreichendem Schutz und entsprechender Pflege in kurzen Produktionszeiträumen nach Quantität und/oder Qualität über dem natürlichen Niveau liegen.“ Kurzumtriebsplantagen sind demnach intensive Produktionssysteme zur Erzeugung von Agrarholz in kurzen Zeiträumen. Das produzierte Agrarholz ist holzartige Biomasse, die der stofflichen, energetischen und chemischen Verwertung zugeführt werden kann (KNUST, 2009). Eine moderne Kurzumtriebsplantage erreicht dies durch die Verwendung genetisch überlegenen Pflanzguts, eine hohe Pflanzdichte und die vollmechanisierte Ernte in Abständen von wenigen Jahren (DICKMANN, 2006). Charakteristika wie die Regeneration des Bestandes aus Stockausschlägen und die angestrebte Maximierung des Holzertrages, sind Gemeinsamkeiten mit historischen Niederwaldsystemen, als deren Weiterentwicklung Kurzumtriebsplantagen bezeichnet werden können (SPLECHTNA & GLATZEL, 2005; DICKMANN, 2006). In der vorliegenden Arbeit werden unter dem Begriff Kurzumtriebsplantagen (KUP) Anbauten leistungsfähiger Pappelhybriden verstanden, deren maximale Umtriebszeit 20 Jahre beträgt.

2.3 Autovegetative Vermehrung

Bei der autovegetativen Vermehrung handelt es sich um eine Form der vegetativen (ungeschlechtlichen) Vermehrung von Pflanzen. Sie beruht ausschließlich auf der mitotischen Zellteilung. Die Tochtergeneration unterscheidet sich in ihrem genetischen Material nicht von der Muttergeneration (BÄRTELS, 2008). Um eine Pflanze autovegetativ zu vermehren, werden Teile einer Mutterpflanze abgetrennt und anschließend zu vollständigen Pflanzen regeneriert. Die so entstehenden Tochterpflanzen werden als Klone bezeichnet. Der Vorteil dieser Verklonung besteht darin, dass

selektierte Genotypen oder bestehende Sorten erbgleich vermehrt werden können (SPETHMANN, 2000).

2.3.1 Verklonung in der Kurzumtriebswirtschaft

In der Kurzumtriebswirtschaft stellt die Verklonung die wichtigste Vermehrungsart dar. Hierbei wird wiederum die Steckholzvermehrung am häufigsten eingesetzt. Steckhölzer sind unbelaubte Sprossstücke die durch Rutenschneiden in Zeiten der Vegetationsruhe aus einjährigen Trieben geeigneter Mutterquartiere gewonnen werden (LIEBHARD, 2007). Sorgt man nun durch „Stecken“ der Sprossstücke für Substratkontakt, setzt man den Regenerationsvorgang in Gang (ROLOFF, 2010). Die Omnipotenz der Pflanzengewebe ermöglicht es den unbelaubten Triebteilen, neue Sprosse und Wurzeln auszubilden. Diese können aus bereits vorhandenen Knospenanlagen oder über die Neubildung von Knospen aus proventivem oder adventivem Meristem entstehen (SPETHMANN, 2000).

Die Verringerung der genetischen sowie phänotypischen Variabilität im Vergleich zur generativen Vermehrung ist Vor- und Nachteil zugleich. Einerseits ist es durch die Verklonung im Zuge der Steckholzvermehrung möglich, eine große Anzahl von Nachkommen höchster Uniformität (Qualität), weil gleichen Genotyps, zu produzieren. Andererseits steigt das Ausfallrisiko aufgrund biotischer oder abiotischer Schadfaktoren infolge der genetischen Einengung. Ob ein autovegetativer Vermehrungsprozess erfolgreich verläuft, ist primär abhängig von den genetischen, sowie physiologischen Gegebenheiten der Mutterpflanze (SPETHMANN, 1990; 2000).

2.3.2 Eigenschaften der Mutterpflanzen

Zu den wichtigsten Eigenschaften der Mutterpflanzen gehört ihre Juvenilität, also ihr physiologisches Alter (SPETHMANN, 1990). Es hat Einfluss auf die Bewurzelungsfähigkeit, den Zeitpunkt der Wurzelbildung, die Neutriebbildung der Steckhölzer und ihre Überwinterungsfähigkeit (BÄRTELS, 2008). Der Ernährungszustand und die Vitalität der Mutterpflanzen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Untersuchungen von MOE & ANDERSEN (1988) haben gezeigt, dass sowohl ein Nährstoffmangel als auch eine Überversorgung der Mutterpflanzen mit einzelnen Nährstoffen negative Auswirkungen auf den Vermehrungserfolg der Steckhölzer hat. Krankheiten können die Vitalität der Mutterpflanzen, und somit auch den Anwuchserfolg

der Steckhölzer, verringern oder sogar auf diese übertragen werden (SPETHMANN, 2000).

2.3.3 Eigenschaften der Steckhölzer

Ein Steckholz ist ein blattloses, komplett verholztes Teilstück eines sommergrünen Gehölzes. Gewonnen werden Steckhölzer durch das sogenannte Rutenschneiden. Hierbei erntet man die letztgeschobenen Jahrestriebe der Mutterpflanzen. Es erfolgt innerhalb der Vegetationsruhe (Oktober-März) und nach der ersten Frosteinwirkung. Durch die Vernalisation (Kälteeinwirkung) wird die Austriebshemmung der Blattknospen überwunden. Von den geschnittenen Ruten verwendet man die kräftigen unteren und mittleren Partien. Ein Steckholz sollte mindestens zwei, besser aber mehr Nodien aufweisen. Die optimale Länge des Steckholzes (15-30cm) richtet sich dementsprechend nach der artspezifischen Anzahl der Nodien pro Dezimeter Trieblänge (BÄRTELS, 2008).

Betrachtet man nun die Anforderungen an qualitativ hochwertige Steckhölzer und die pflanzenphysiologischen Merkmale der Populus-Arten, lassen sich die Abmessungen eines geeigneten Pappel-Steckholzes ableiten: 20-30 cm Länge, 10 bis 20 mm Durchmesser (WEISGERBER, 1999). Weiterhin sind ein ordnungsgemäßer und termingerechter Schnitt neben frostfreiem und kühlem Einschlag Grundvoraussetzungen für einen guten Anwuchserfolg der jeweiligen Kultur. Die sich bildenden Wurzeln sowie der Spross stellen bereits in der frühen Entwicklungsphase eine Gefäßverbindung zum Steckholz her. Das Steckholz fungiert hierdurch als Bindeglied zwischen Wurzel und Spross und ermöglicht den Stofftransport zwischen beiden Grundorganen (SMITH & WAREING, 1972). Für die frühe Wurzel- und Sprossentwicklung sind auch die vorhandenen Kohlenhydratreserven im Steckholz ein Faktor (DICKMANN et al., 2001).

2.4 Pflanzenentwicklung aus Steckhölzern

Wie alle anderen höheren Pflanzen besitzen auch im Kurzumtrieb genutzte Holzpflanzen die drei Grundorgane Spross, Wurzel und Blätter. Diese üben verschiedene elementare Funktionen im pflanzlichen Organismus aus (MATYSSEK et al., 2010). Ihre Entstehung soll in der Folge kurz erläutert werden.

2.4.1 Knospenbildung

Der Ausbildung einer Wurzel oder eines Sprosses geht im Zuge der autovegetativen Vermehrung die Knospenbildung voraus. Die Knospen können einerseits als spezifisch angelegte Spross- bzw. Wurzelknospen vorliegen oder sich als bipotente Knospen, reaktiv, entsprechend den vorherrschenden externen Bedingungen, zu einem Spross oder einer Wurzel entwickeln (FINK, 1980). Neben den voll entwickelten regulären Knospen, die nach Aufhebung der Dormanz (Keimruhe) im Folgejahr austreiben, findet man zusätzlich zwei Sonderformen der Knospenanlage:

- Adventivknospen, entstehen spontan aus dem Kambium und an Pflanzenabschnitten, an denen zuvor keine speziellen Knospenanlagen vorgesehen waren. Ihre Bildung und der Austrieb wird durch äußere Einflüsse wie starken Rückschnitt, Verlust höherstehender Äste oder plötzliche Freistellung initiiert (MATYSSEK et al., 2010; SPETHMANN, 2000).
- Proventivknospen („schlafende Augen“) sind ruhende Knospenanlagen, die in den Achseln der Blattanlagen schon im Knospenstadium im Vegetationskegel vorgeformt werden. Sie werden durch äußere Einwirkungen zum Austrieb angeregt (HAISSIG, 1974; SPETHMANN, 2000).

2.4.2 Wurzelentwicklung

Die Initiierung der Wurzelbildung erfolgt durch spezifische Veränderungen an der Pflanze (Verletzung, Abtrennen von Pflanzenteilen) oder ihrer Umgebung (Erdkontakt). Bei Steckhölzern regt meist eine Kombination dieser Einflüsse die Wurzelbildung an (SMITH & WAREING, 1972; SPETHMANN, 2000). Werden Individuen der Gattung *Populus* mittels Steckhölzern vegetativ vermehrt, bilden sie überwiegend ein sprossbürtiges, adventives Wurzelsystem aus (ZALESNY et al., 2005). Nach FINK (1980) & SPETHMANN (2000) können drei Formen der adventiven Bewurzelung anhand des Bildungsortes der neugebildeten Knospenanlagen unterschieden werden. Einerseits kann die Abtrennung von Meristeminseln durch das Kambium im Zuge des sekundären Dickenwachstums erfolgen. Andererseits können neue Meristeme sekundär, durch die Remeristematisierung (Entdifferenzierung) ausdifferenzierter Gewebezellen (z.B. aus Rinden-, Mark- oder Holzstrahlparenchymzellen), gebildet werden. Die dritte, seltenere

Möglichkeit der Neubildung von Wurzelknospenanlagen erfolgt durch die (Meristem-) Reorganisation aus Kallusgewebe (Wundgewebe).

Die adventiven Wurzelknospenanlagen, die aus dem Kambium bzw. aus remeristemisiertem Gewebe hervorgehen, bezeichnet man auch als laterale adventive Bewurzelung. Von basaler adventiver Bewurzelung spricht man bei der Wurzelbildung aus Kallusgewebe. Die Meristeme, aus denen die Wurzelinitialen hervorgehen, sind die wichtigste Voraussetzung für die erfolgreiche Anlage eines adventiven Wurzelsystems an einem Steckholz (ZALESNY & ZALESNY, 2009).

2.4.3 Frühe Sprossentwicklung

Bei Steckhölzern geht der Spross aus proventiven und adventiven Sprossanlagen hervor. In den Sprossanlagen (Knospen) befinden sich die Apikalmeristeme, die zum Schutz von Blattprimordien, abgestorbenen Haaren und Knospenschuppen umgeben sind. Aus den Initialen des apikalen Sprossmeristems gehen die primären Meristeme Urmark (Plerom), Urrinde (Periblem), Prokambium und Protoderm hervor (KÜCK & WOLFF, 2014). Aus dem Prokambium entwickeln sich anschließend das Protoxylem und Protophloem sowie das Kambium. Durch Differenzierung entsteht aus dem Urmark ein parenchymatisches Gewebe, das Mark. Aus der Urrinde gehen das primäre Abschlussgewebe (Epidermis) und die Rinde hervor (LÜTTGE et al., 2010).

Das sekundäre Dickenwachstum geht bei Dikotyledonen von der Aktivität eines zylinderförmigen Meristems, dem Kambium, aus. Durch die fortwährende Teilung der Kambiumzellen in tangentialer Richtung erfolgt das sekundäre Dickenwachstum. Hierbei werden wechselweise nach innen Elemente des sekundären Xylems (Gefäße, Tracheiden, Holzparenchymzellen, Holzfasern) und nach außen Elemente des sekundären Phloems (Siebröhren, Bastparenchymzellen, Geleitzellen, Bastfasern) abgegeben (KÜCK & WOLFF, 2014; LÜTTGE et al., 2010).

2.4.4 Frühe Blattentwicklung

Laubblätter sind Anhangsorgane des Sprosses. Die Blattprimordien gehen aus dem Scheitelmeristem an der Spitze des Sprosses (Tunica) hervor. Das Spitzenwachstum wird jedoch rasch eingestellt und ein basales Meristem an der Blattbasis bildet neue Zellen für das Längenwachstum. Für die seitliche (flächige) Ausdehnung der Blattprimordien sind

randständige Meristeme zuständig. Hinter den Meristemen findet die Vergrößerung der restlichen Blattspreite durch Streckung der neu gebildeten Zellen statt (KÜCK & WOLFF, 2014; LÜTTGE et al., 2010; MATYSSEK et al., 2010).

2.5 Wasserhaushalt der Pflanze

Pflanzen bestehen größtenteils aus Wasser und ein ausgeglichener Wasserhaushalt ist die Voraussetzung für einen geregelten Ablauf ihrer Lebensvorgänge (LARCHER, 2001). KOZLOWSKY & PALLARDY (1997) bezeichnen Wasser als wichtigsten Einflussfaktor auf das Pflanzenwachstum. Eine kurze Einordnung der hydrologischen Prozesse in Pflanzen ist obligatorisch.

2.5.1 Wasserpotenzial der Zelle

In der Zelle kommt Wasser chemisch gebunden als Konstitutionswasser vor. Als Hydratationswasser ist es an Ionen, gelöste organische Substanzen oder Makromoleküle angelagert. Als Depotwasser füllt es die Zellvakuolen und dient als Lösungsreservoir. Liegt es als interstitielles Wasser vor, übernimmt es die Transportfunktion in den Zellwänden, Zellzwischenräumen und Leitbahnen (HEß, 2008; LARCHER, 2001).

Die Differenz zwischen dem thermodynamischen Zustand von Wasser in der Zelle und dem chemischen Potenzial reinen Wassers (freie Enthalpie) kann als Arbeitsvermögen ausgedrückt werden. Das Wasserpotenzial $\boldsymbol{\Psi}$ beschreibt die Arbeit die nötig ist, um gebundenes Wasser auf das Potenzialniveau reinen Wassers ($\Psi = 0$) zu heben. Das Wasserpotenzial $\boldsymbol{\Psi}$ setzt sich aus den drei Teilpotenzialen hydrostatischer Druck ($\boldsymbol{P}$), osmotischer Druck ($\boldsymbol{\pi}$) und dem Gravitationspotenzial ($\boldsymbol{g\ h\ \rho_{H_2O}}$) zusammen, wie Gleichung 1 beschrieben ist (LARCHER, 2001; SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

$$\Psi = P - \pi + g\ h\ \rho_{H_2O} \qquad (1)$$

Die Kenntnis über die Wasserpotenzialdifferenz zwischen zwei Orten erlaubt Aussagen über die Richtung der Wasserbewegung, denn Wasser strömt nur entlang eines abfallenden Wasserpotenzial-Gradienten, d.h. nur von Orten mit höherem zu Orten mit niedrigerem Wasserpotenzial. Ein Transport von Wasser in umgekehrter Richtung ($\Psi\downarrow$ zu $\Psi\uparrow$) ist nur durch Energiezufuhr möglich. Das Wasserpotenzial Ψ wird durch eine

Zunahme von $\boldsymbol{P}$ oder $\boldsymbol{h}$ erhöht und durch eine Zunahme von $\boldsymbol{\pi}$ erniedrigt (SCHOPFER & BRENNICKE, 2010).

2.5.2 Wasserpotenzial der Pflanze

Pflanzen verlieren ständig Wasser durch Verdunstung ihrer oberirdischen Kompartimente. Dieses Wasser muss aus dem Boden oder dem Grundwasserkörper nachgeliefert werden. Transpiration (Abgabe von Wasserdampf), Wasseraufnahme und Wassertransport von den Wurzeln zu den transpirierenden Pflanzenteilen sind die untrennbar miteinander gekoppelten Grundvorgänge des Wasserhaushalts. Die treibende Kraft der Verdunstung ist das Wasserdampfdruckdefizit der Atmosphäre, das Bodenwasser die entscheidende Versorgungsgröße (LARCHER, 2001).

Die Pflanze überbrückt das Wasserpotenzialgefälle zwischen den Systemen Boden und Atmosphäre. Zwischen den Systemen besteht ein abfallender Wasserpotenzial-Gradient:

$$\Psi_{Atmosphäre} < \Psi_{Pflanze} < \Psi_{Boden}$$

Dieses Wasserpotenzial-abhängige Leitsystem wird als hydraulisches Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuum (*SPAC – Soil Plant Atmosphere Continuum*) bezeichnet (MATYSSEK et al., 2010).

Die oberirdischen Pflanzenkompartimente sind dem Dampfdruckdefizit der Atmosphäre ausgesetzt und verlieren Wasser durch Transpiration. Das Wasser wird einerseits über die Kutikula (kutikuläre Transpiration), andererseits über Spaltöffnungen, die Stomata (stomatäre Transpiration) abgegeben (NULTSCH, 2012). Die kutikuläre Transpiration ist für zehn Prozent der Wasserabgabe verantwortlich und ist, im Gegensatz zur stomatären Transpiration, nicht regulierbar. Die Regulierung der stomatären Transpiration erfolgt durch die Schließzellen der Stomata (HEß, 2008).

Neben der Regelung der Transpiration sind die Stomata auch für den Gasaustausch von Sauerstoff (O_2) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) zuständig. Wasserabgabe und CO_2-Aufnahme sind durch die Stomataaktivität fest aneinandergekoppelt. Durch das Öffnen der Stomata wird der Diffusionswiderstand gegenüber der kutikulären Transpiration erheblich verringert. Kommt es zu Wassermangel oder einer Herabsetzung der

Photosyntheseleistung, wird der Diffusionswiderstand durch das Schließen der Stomata erhöht (BRESINSKY et al., 2008).

2.5.3 Reaktionen auf ein Überangebot an Wasser

Wassermangel und Wasserüberschuss können gleichermaßen limitierend auf das Pflanzenwachstum wirken. Die Mehrheit der Landpflanzen gedeiht nicht gut auf staunassen oder überfluteten Böden. Durch die Überflutung der unterirdischen Organe wird die Vitalität der ganzen Pflanze in Mitleidenschaft gezogen, wobei es zwischen den höheren Pflanzen erstaunliche Resistenzunterschiede gibt (BRÄNDLE, 1996).

Überflutete Böden sind sauerstoffarm oder, noch häufiger, sauerstofffrei. Durch das Eindringen des Wassers wird die Luft aus den Porenräumen verdrängt. Der verbleibende Restsauerstoff wird rasch von Mikroorganismen und Pflanzen verbraucht. Die ursprünglich oxidierte Umgebung wird sukzessive durch chemische Reaktionen und mikrobielle Aktivität reduziert. Essentielle Pflanzennährstoffe treten in reduzierter Form auf, Sulfat und Kohlendioxid werden zu Sulfid und Methan. Schwermetallionen werden ebenfalls reduziert und gehen in Lösung (BRÄNDLE, 1996). Reduzierte Ionen und Pflanzennährstoffe sowie Abbau- und Ausscheidungsprodukte wirken auf die unterirdischen Pflanzenorgane ein. Die Pflanzenorgane werden einerseits durch Sauerstoffmangel oder -absenz, andererseits durch veränderte chemisch-physikalische Bodeneigenschaften gestresst (JACKSON et al., 1991). Der Stress nimmt mit der Abnahme des Sauerstoffgehaltes zu. Eine ungenügende Sauerstoffversorgung der nicht photosynthetisch aktiven Organe führt zu einer Verringerung aller energie- und sauerstoffabhängigen Stoffwechselschritte. Die Phytohormone Gibberelin, Absiscinsäure und Ethylen fungieren als Transkriptionsfaktoren, d.h. sie aktivieren Gene für die pflanzlichen Anpassungsreaktion (MUSTROPH et al., 2016).

Die Reaktionen von Pflanzen auf Sauerstoffmangel können den folgenden Strategien zugeordnet werden: Die Vermeidungsstrategie zielt darauf ab, Sauerstoffmangel bei Überflutung oder hoch anstehendem Grundwasser durch anatomische und morphologische Anpassungen zu verhindern. Eine Anpassung infolge von Sauerstoffmangel ist die Bildung luftgefüllter Hohlräume in der Pflanze, sogenannter Aerenchyme. Aneinandergereihte Aerenchyme bilden eine Versorgungskette von den belüfteten Pflanzenteilen zu den Geweben, die keinen Sauerstoff produzieren können

oder durch Wasser am Gasaustauch mit der Atmosphäre gehindert werden (SAUTER, 2013; VOESENEK & BAILEY-SERRES, 2013). Die Durchhaltestrategie besteht darin, den Sauerstoffmangel bestmöglich zu erdulden und auf bessere Bedingungen zu warten. Die Pflanzen versuchen ihre Energieressourcen möglichst zu schonen, indem sie auf anaerobe Stoffwechselwege der Energiegewinnung (Gärung) umschalten und den übrigen Stoffwechsel einschränken. Die Durchhaltestrategie funktioniert für kürzere Stresssituationen von einigen Tagen (MUSTROPH et al., 2016; VOESENEK & BAILEY-SERRES, 2013).

Postanoxischer bzw. oxidativer Stress tritt durch die rasche Wiederzufuhr von Sauerstoff zu anaeroben Geweben auf. Aktivierte Sauerstoffmoleküle können durch geschwächte Entgiftungssysteme nicht rechtzeitig beseitigt werden und verursachen gravierende Schäden (GUTTERIDGE & HALLIWELL, 1990; CRAWFORD, 1992).

Irreparable Schädigungen der Pflanze treten immer erst nach Überschreiten der jeweiligen Resistenzgrenze auf (ARMSTRONG, et al., 1994). Nach ROLOFF (2021) sind sowohl *Populus nigra* als auch *P. maximowiczii* und *P. trichocarpa* tolerant gegenüber hoch anstehendem Grundwasser.

2.5.4 Ansprüche an den Wasserhaushalt durch Hybrid-Pappeln

Unterschiede in der Transpirationsleistung verschiedener Pflanzenarten sind auf die Anordnung, Dichte, Größe und Geometrie der Stomata zurückzuführen. Während sich die Spaltöffnungen der meisten Laubbäume lediglich in der Epidermis der Blattunterseite befinden (abaxiale Stomata), können die Stomata bei Pappelhybriden amphistomatisch, d.h. sowohl adaxial (auf der Blattoberseite) als auch abaxial vorkommen (BRESINSKY, 2008; REICH, 1984). Hybrid-Pappeln sind, aufgrund der Anzahl und Anordnung ihrer meist weit geöffneten Stomata, effizienter im Gasaustausch als andere Gehölze. Der effiziente Gasaustausch macht ihr schnelles Wachstum möglich, bedingt aber auch den relativ hohen Wasserverbrauch (DICKMANN et al., 2001).

Die vergleichende Untersuchung von PETZOLD et al. (2009) kam zu dem Ergebnis, dass eine achtjährige, mit Max-1 bestockte, Pappelplantage 3,3 mm Wasser pro Tag via Evapotranspiration abgibt. Damit verbraucht die Max-1 Fläche ungefähr doppelt so viel Wasser wie ein Fichten-Altbestand (1,6 mm) und liegt auf dem Niveau von Winterweizen (3,4 mm) oder Zuckerrüben (3,0 mm). Bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist zu

beachten, dass die Ernte der Ackerkulturen ein bis zwei Monate vor dem Laubfall der Pappeln geschieht. Eine Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers unter einer Pappelkultur kann dementsprechend erst später beginnen. Im Vergleich mit Waldbeständen muss einerseits in die Betrachtung eingehen, dass die Verdunstungsraten in jungen Waldbeständen bedeutend höher liegen, andererseits die ganzjährige Benadelung zu hohen Interzeptionsraten auch außerhalb der Vegetationsperiode führen kann (PETZOLD et al., 2009).

Aufgrund der hohen Transpirationsraten sind Pappeln auf eine gute Wasserversorgung angewiesen (SCHMITZ-LENDERS, 1956; PETZOLD, 2013). Rechnet man die Werte von PETZOLD et al. (2009) auf eine fünfmonatige Vegetationsperiode um, erhält man Transpirationsraten von 300 bis 450 mm. Ursächlich für die hohe Transpiration ist die sehr große Blattfläche (BUNGART & HÜTTL, 2004) in Verbindung mit der nahezu unkontrollierbaren Stomataleitfähigkeit. Nur wenige Klone vermögen den Wasserbedarf durch eine Stomataschließung zu optimieren, wie dies beispielsweise bei Muhle Larsen (*P. trichocarpa*) der Fall ist (GRIESE et al. 1993). Als ertragsfördernd werden hohe Jahresniederschlagssummen über 800 mm und eine günstige Verteilung der Niederschläge in der Vegetationsperiode (v.a. Mai und Juni) angesehen (SCHMITZ-LENDERS, 1956; ALI, 2009). In der Literatur werden Mindestniederschlagssummen innerhalb der Vegetationsperiode von 250 mm (DÖHRER, 2010) bzw. 300 mm (HOFMANN, 1999) genannt. Folglich eignen sich frische Standorte sehr gut für den KUP-Anbau, dagegen gelten mäßig trockene bis trockene Standorte als ungeeignet. Die Zuwächse von Hybrid-Pappeln können auch durch Bewässerung signifikant gesteigert werden. Dies ist allerdings mit erheblichen Kosten verbunden und muss meist als unwirtschaftlich angesehen werden (DICKMANN et al., 2001).

Wenn eine optimale Wasserversorgung nicht durch ausreichende Niederschläge oder Bewässerung bewerkstelligt werden kann, können Standorte durch Grundwassereinfluss in Verbindung mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität (nFK) dennoch für sehr gute Wuchsbedingungen sorgen (MÜLLER, 1951).

2.6 Topfversuche mit Gehölzen

In-Situ Versuche (Feldstudien) finden unter natürlichen Bedingungen statt und sind daher oft kostengünstiger als Topfversuche. Der Erfolg von In-situ-Versuchen hängt jedoch stark von den vorherrschenden Umweltbedingungen ab. Lässt sich der Einfluss einzelner Umweltfaktoren nicht gut quantifizieren, können Feldversuche fehlerhafte oder zweideutige Ergebnisse liefern (KAWALETZ et al., 2014). Durch Topfversuche können Störfaktoren wie Unterschiede in der Bodenqualität, Wasserverfügbarkeit oder Herbivorie entweder ausgeschlossen oder konstant gehalten werden (GIBSON et al., 1999). Die Verringerung der Umweltheterogenität bietet die Möglichkeit, gezielt den Einfluss eines oder mehrerer Umweltfaktoren auf das Pflanzenwachstum sichtbar zu machen (KRABEL et al., 2018). Weiterhin können Topfversuche beliebig oft unter ähnlichen oder gleichbleibenden Bedingungen wiederholt werden (GIBSON et al., 1999).

Der begrenzte Wuchsraumes im Gewächshaus führt zu multiplen Restriktionen für Versuche mit holzigen Pflanzen. Die Dauer der Versuche und somit auch die Größe bzw. das Alter der untersuchten Pflanzen ist erheblich einschränkt (KAWALETZ et al., 2014). Lange galt die Annahme, dass sich Gehölzarten aufgrund ihrer langen Entwicklungsphase und ihrer Größe nicht für die Untersuchung via Gewächshausversuch eignen. Dies konnte für Untersuchungen an Pappelstecklingen beispielsweise von WIESE et al. (2006), ZALESNY et al. (2005), ZALESNY & ZALESNY (2009) oder KRABEL et al. (2015, 2018, 2021) widerlegt werden. Selbst die experimentelle Dauer von nur 65 Tagen (z.B. bei KRABEL et al. 2015, 2018, 2021) reicht aus, um vom Genotyp abhängige und umweltbedingte Unterschiede der Spross- und Wurzelentwicklung an jungen Pflanzen deutlich werden zu lassen.

Topfversuche schaffen kontrollierte, aber künstliche Bedingungen. Folglich müssen sich die Pflanzen nach Versuchsbeginn erst an die neue Umgebung gewöhnen. Um gleiche Ausgangsbedingungen für alle Individuen zu gewährleisten, wird in immer mehr Studien (vgl. MEIER, 2007; MEYER et al., 2015, 2019; KRABEL et al., 2015, 2018, 2021) mit einer obligatorischen Anpassungsphase zu Beginn des Versuchs gearbeitet. Hierdurch lassen sich Abweichungen aufgrund unterschiedlicher Etablierungszeiträume minimieren (KAWALETZ et al., 2014).

Da sich Topfexperimente auf frühe Stadien der Baumentwicklung beschränken (müssen), ist eine Übertragung der Ergebnisse auf ausgewachsene Bäume nur begrenzt möglich (WEIH & NORDH, 2005). Die Auswirkungen der Versuchsparameter auf die Pflanzenleistung müssen immer mit Bezug zur Pflanzengröße und dem Pflanzenalter betrachtet werden (KAWALETZ, 2014).

Folglich sind Topfversuche mit Gehölzen immer nur begrenzt in der Lage, natürliche Feldbedingungen abzubilden. Die Übertragung der Ergebnisse von Topfversuchen auf natürliche Bedingungen ist eine Herausforderung, bei der viele verschiedene Faktoren berücksichtigt werden müssen. Ein Weg diesen Unzulänglichkeiten zu begegnen, ist die Kombination von Topf- und Feldversuchen.

3. Material und Methoden

Nachdem das vorangegangene Kapitel einen Überblick über die notwendigen Grundlagen zur Untersuchung der Forschungsfrage geliefert hat, wird im Folgenden der Versuchsaufbau samt verwendeter Materialien und Methoden geschildert.

3.1 Gewächshausversuche

In den Jahren 2020 und 2021 wurden Experimente zum Wuchsverhalten der beiden Pappel-Hybride Max 3 (*Populus nigra x P. maximowiczii)* und Fritzy Pauley (*P. trichocarpa*) durchgeführt. Die Experimente fanden im Versuchsgewächshaus „VLO Hetzdorf“ (50,96°N, 13,45°O) der Technischen Universität Dresden über einen Zeitraum von jeweils 64 Tagen statt.

3.1.1 Sortenwahl

Die Sorte Max 3 zählt zu den geprüften Standardklonen in Deutschland und dient als eine Standardsorte des Instituts für Forstbotanik der TU Dresden (BLE, 2021). Eine Sorte aus der Reihe der Max-Hybride (Max 1,…, Max 5) wird stets in die Untersuchungen des Instituts mit einbezogen (z.B. KRABEL et al., 2018, 2021; MEYER et al., 2015, 2019). So können einerseits die Wuchsleistungen anderer Hybride im Versuch mit Max 3, andererseits die Versuche untereinander mit Blick auf das Wachstum der Max 3-Klone verglichen werden. Entsprechend des Institutsstandards wurde die Sorte Max 3 in den Gewächshausversuchen der Jahre 2020 und 2021 affiliiert.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse des Gewächshausversuches mit denen des Feldversuches zu gewährleisten, wurde für den Gewächshausversuch 2021 die Sorte Fritzy Pauley analog zur Bestockung der Untersuchungsfläche in Peickwitz ausgewählt.

3.1.2 Pflanzenmaterial

Bei dem Pflanzenmaterial handelte es sich um kommerziell erworbene Steckhölzer. Die Max 3 Steckhölzer wurden von der *Lignovis GmbH* (Hamburg), die Fritzi Pauley Steckhölzer von der *WALD21 GmbH* (Uffenheim) bezogen. Die Steckhölzer hatten jeweils eine Länge von 35cm und einen Durchmesser von 9-18mm. Die Stecktiefe betrug

ca. 30cm. Beschädigte Steckhölzer wurden vor der Pflanzung aussortiert und nicht in die Untersuchung miteinbezogen. Zusätzlich wurde das Gewicht mittels Feinwaage (Modell Scout-Pro 602, max. 600g, d=0,01g, Fa. Ohaus, Greifensee-Schweiz,) bestimmt und der Durchmesser mit einer handelsüblichen Schieblehre am unteren und oberen Ende des Steckholzes ermittelt.

3.1.3 Versuchsaufbau

Der Versuch begann mit dem Stecken der Hölzer am 17.05.2021. Die Ernte erfolgte am 19.07.2021. Bepflanzt wurden Töpfe, die aus einem halbierten und mit Paketband wieder zusammengefügten KG-Rohr nach DN100 (Durchmesser: innen 104mm; Länge: 50cm) bestanden (siehe Abbildung 1). Die Töpfe wurden im Zuge der Ernte entlang des Paketbandes aufgeschnitten, sodass die Pflanzen nicht aus den Töpfen gezogen, sondern mitsamt Substrat aus den Töpfen entnommen werden konnten. Dieses Vorgehen erleichtert die Ernte und reduziert Beschädigungen der Wurzeln. Die Unterseite der Töpfe wurde mit Baumschulgewebe bedeckt. Dieses Gewebe hält das Substrat im Topf und gewährleistet die Wasserdurchlässigkeit.

Abb. 1: Pappel in KG-Rohr

Das Pflanzsubstrat bestand aus zwei Teilen gewaschenem Sand (Sorte 123, Körnung 0-2 mm, EÜ WPK 12620, Kieswerk Ottendorf-Okrilla GmbH & Co. KG; ph-Wert 6,39), einem Teil von grobem Torf befreiter Pflanzerde (Einheitserde Typ ED 73; Hermann Meyer KG, Nossen; Substratzusammensetzung: Boden pH 5,7; Na 0,2 mg/l, K 2,2 - 2,5 mg/l, Ca 25,2 - 27,8 mg/l, Mg 2,5 - 2,7 mg/l, Mn 0,1 mg/l) und einem halben Teil Wasser.

Der Versuchsaufbau der Gewächshausversuche 2020 und 2021 war identisch. Jedoch wurden im Gewächshausversuch 2020 drei Gruppen mit jeweils 20 Individuen der Sorte Max 3 gesteckt und unterschiedlich bewässert. Der Gewächshausversuch 2021 wurde mit 30 Steckhölzern der Sorte Fritzi Pauley und als Vergleichsgruppe wiederum mit 30 Individuen der Sorte Max 3 in drei Bewässerungsstufen durchgeführt. Alle Töpfe wurden nummeriert und nach dem Zufallsprinzip auf den Pflanztischen verteilt.

3.1.4 Wachstumsbedingungen

Das Gewächshaus „VLO Hetzdorf“ verfügt über keine automatische Temperaturregelung. Der Temperaturverlauf während des Versuches steht dementsprechend in direkter Abhängigkeit von den Außentemperaturen des jeweiligen Jahres. Der Klimacomputer (Typ CC600, RAM GmbH Mess- und Regeltechnik, Herrsching) maß alle 12 Minuten die Temperatur in ˚C und die relative Luftfeuchte in %. Der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsverlauf in den Kabinen 1 und 2 ist in den Abbildungen 2 und 3 ersichtlich. Um bei allen Versuchspflanzen für gleiche Startbedingungen zu sorgen und zunächst ein Wurzel- und Sprosswachstum zu induzieren, wurden alle mit Steckhölzern bestückten Pflanztöpfe während der ersten 22 Tage nach dem Stecken automatisch optimal in Kabine 1 bewässert

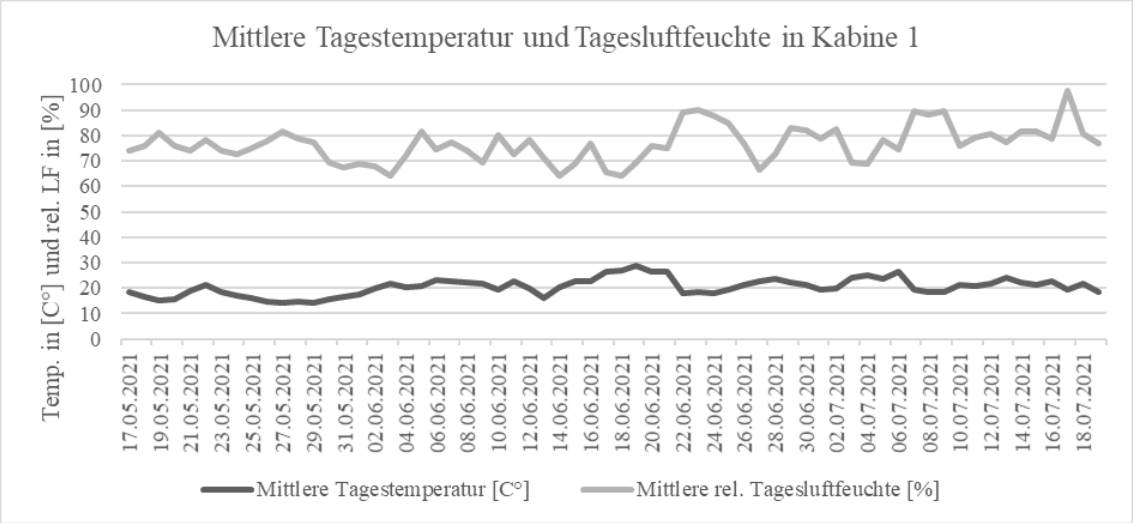

Abb. 2: Temperaturverlauf [C°] und relative Luftfeuchte [%] der durchschnittlichen Tageswerte in Kabine 1

(Bodenwassergehaltes [Vol% BWG] zwischen 17 und 23 Vol.%, relative Luftfeuchte [rH] von ca. 90 %).

Nach abgeschlossener Anwuchsphase begann der Bewässerungsversuch. Die Versuchsgruppen „normal“ verblieben für den restlichen Verlauf des Versuches in Kabine 1 des VLO Hetzdorf, die automatisch optimal „über Kopf“ bewässert wird. Die Versuchsgruppen „1/3“ und „2/3“ wurden in Kabine 2 des VLO Hetzdorf umgesetzt und es erfolgte keine „über Kopf“ Bewässerung mehr. Ein Einfluss durch abweichende Temperaturen in beiden Kabinen kann nahezu ausgeschlossen werden, da die

Durchschnittstemperatur über den gesamten Versuchszeitraum in beiden Kabinen bei 19,48˚C lag.

Die Versuchsgruppe „1/3“ wurde in Gruppen a vier Pflanztöpfe in Kunststoffgefäße (IKEA, Trofast-Box, L:42cm B: 30cm H: 36cm) gesetzt und der Wasserstand über den gesamten Versuchszeitraum auf ca. einem Drittel der Pflanztopfhöhe gehalten. Hierfür wurde manuell Wasser nachgegeben. Analog wurde mit der Versuchsgruppe „2/3“ verfahren, allerdings standen die Pflanztöpfe dauerhaft mit ca. zwei Dritteln ihrer Gesamthöhe im Wasser.

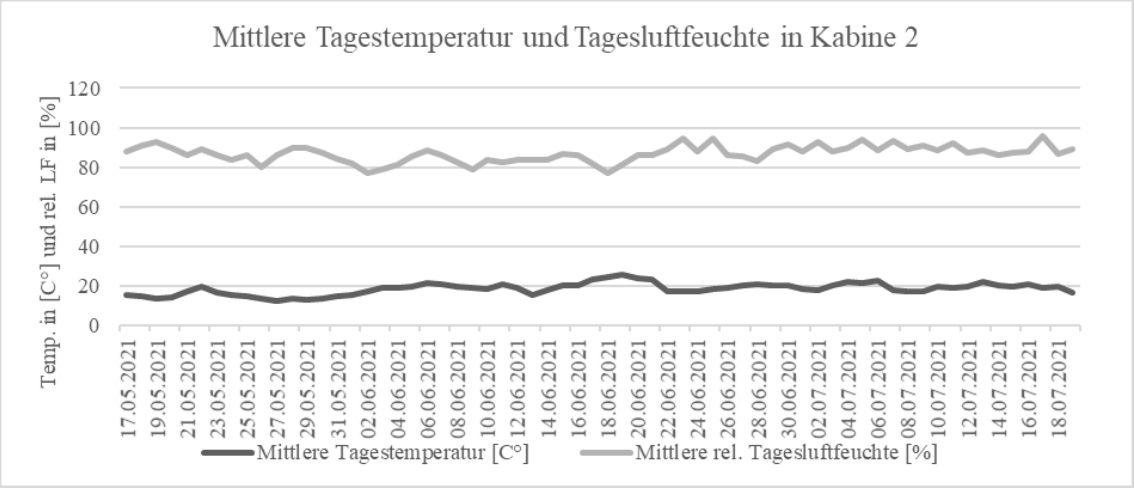

Abb. 3: Temperaturverlauf [C°] und relative Luftfeuchte [%] der durchschnittlichen Tageswerte in Kabine 2

3.1.5 Aufnahme der Wuchsparameter

Die Frischgewichte der Triebe und Blätter wurden sofort nach der Ernte erfasst (Feinwaage Scout Pro SPU 602, max. 600g, d= 0,01g, Fa. Ohaus, Greifensee – Schweiz). Die Blattflächen [cm²] wurden, mittels mobilem Blattflächenscanner (Portable Area Meter, Model LI-3000A, Fa. LICOR, Bad Homburg) ebenfalls noch im „VLO Hetzdorf“ bestimmt. Außerdem wurde der längste Trieb mit einem Gliedermaßstab (Adga 230, Adolf Gampper GmbH, Mainhardt) gemessen. Die bewurzelten Steckhölzer wurden grob von anhaftendem Substrat befreit und sofort einer Kühlung zugeführt. Gelagert wurden die Proben in einem Gefrierschrank (-18˚C) des Instituts für Forstbotanik und Forstzoologie der TU Dresden.

Im nächsten Schritt wurden die Wurzeln vom Steckholz abgetrennt und im Wasserbad mit Pinsel und Pinzette vom noch anhaftenden Substrat befreit. Im Zuge dessen wurde der höchstgelegene Wurzelansatz am Steckholz und die längste Wurzel mit einem

Stahlmaßstab (Stahlmaßstab 50 cm, toom Baumarkt GmbH, Köln) erfasst. Die Aufnahme der Frischgewichte der Wurzeln erfolgte mit einer Feinwaage (Precision Standard, Modell TS120S, max. 120g, d= 0,001g, Fa. Ohaus, Greifensee – Schweiz). Anschließend wurden die o.g. Pflanzenkompartimente getrocknet. Im Trockenschrank (Heraeus Function Line, Model B12, Thermo Fisher Scientific Messtechnik GmbH) wurde den Trieben, Blättern und den Wurzeln über 72 Stunden bei 60˚C jegliches Wasser entzogen. Im Anschluss an die Trocknung wurden, mittels Präzisionswaage (Precision Standard, Modell TS120S, max. 120g, d= 0,001g, Fa. Ohaus, Greifensee – Schweiz), die Trockengewichte bestimmt.

3.2 Feldversuch

Für den Feldversuch wurde ein Agrarholzstreifen auf den Flächen des *Landwirtschaftsbetrieb Domin* genutzt. Der Betrieb wird nach den Grundsätzen der Agroforstwirtschaft bewirtschaftet. Als Agroforstwirtschaft bezeichnet man Landnutzungssysteme, bei denen Gehölze mit Ackerkulturen und/oder Tierhaltung so auf einer Fläche kombiniert werden, dass zwischen den verschiedenen Komponenten ökologische und ökonomische Vorteilswirkungen entstehen (NAIR, 1993). Bei der untersuchten Fläche handelt sich um ein silvoarables System, also um die Kombination von Bäumen mit Ackerkulturen (NAIR, 1985), welche streifenartig erfolgt.

3.2.1 Standortwahl

Als Versuchsfläche konnte die Fritzi Pauley-Teilfläche eines 2015 begründeten Agrarholzbestandes genutzt werden. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, wird der nördliche

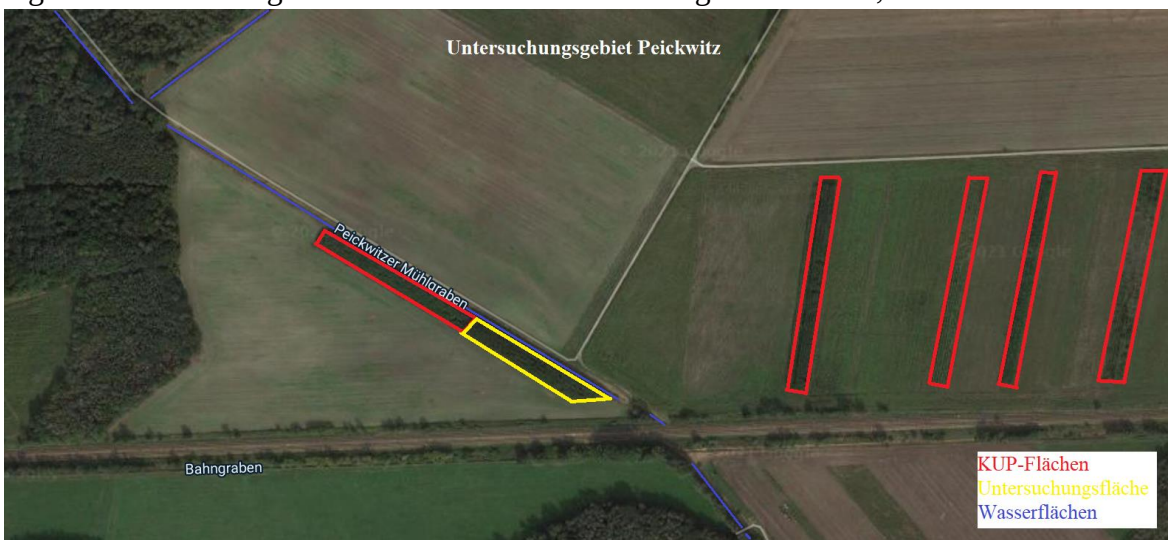

Abb. 4: Untersuchungsgebiet Peickwitz (GOOGLE, 2021; verändert)

Teil der Fläche durch den dauerhaft wasserführenden Peickwitzer Mühlgraben begrenzt. An der Südseide der Kultur schließt sich ein Acker an.

3.2.2 Wachstumsbedingungen

Die Untersuchungsfläche liegt auf 100,5m ü. NN und nahe des Ortes Peickwitz (Stadt Senftenberg) (OPEN STREET MAP, 2021). Der vieljährige Mittelwert der Temperatur (1981-2010) beträgt 9,6 ˚C (DWD, 2021b). Der durchschnittliche Jahresniederschlag (1971-2000) liegt bei 551-600 mm (DWD, 2018). Beide Werte wichen im Untersuchungsjahr vom langjährigen Mittel ab. Während die Temperatur mit 9,8 ˚C geringfügig höher war, lag die Niederschlagsmenge des Jahres mit 538,3 mm knapp unter dem langjährigen Mittelwert (DWD, 2022).

Der rote Punkt auf nebenstehender Abbildung 5 markiert den Standort der Untersuchungsfläche Peickwitz. Bei dem vorliegenden Boden handelt es sich um vergleyte Braunerde (15) bzw. Braunerde-Gley (16) (jeweils: GG-BB: p-s(Sp)/f-s(Sf)) aus Sand über Urstromtalsand (LGB, 2001). Talsande in Brandenburg sind sehr nährstoffarm und durchlässig. Die Pufferkapazität dieser Standorte gegenüber Schadstoffeinträgen ist als sehr gering einzustufen. Gleye in Urstromtälern unterliegen häufig der Grünlandnutzung, können aber, wie in vorliegendem Fall, in entwässertem Zustand auch ackerbaulich genutzt werden. Die hohe Wasserdurchlässigkeit der Gley-Standorte unter landwirtschaftlicher Nutzung führt im Vergleich zu Waldflächen zu einer erhöhten Grundwasserneubildungsrate (MLUV, 2005).

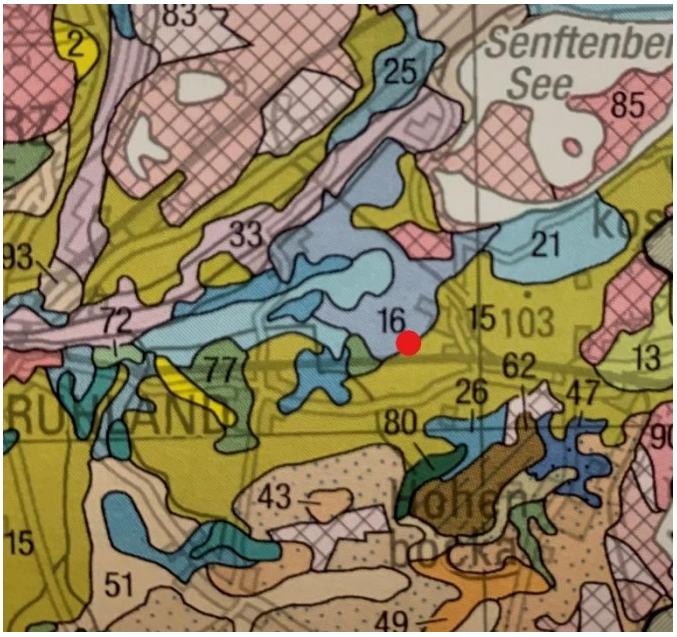

Abb.5: Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1:300 000 - Grundkarte Bodengeologie, LGB (2001)

Die Bodenklimazahl (BKZ) ist eine landwirtschaftliche Maßeinheit, um die Wertigkeit von Acker- und Grünlandböden auszudrücken. Die besten Äcker Deutschlands werden mit einer BKZ von 100, die besten Grünlandflächen mit einer BKZ von 88 bewertet (ROTHKEGEL & HERZOG, 1928; SCHRÖDTER & ALTERMANN, 2019). Die Untersuchungsfläche, als sehr ertragsschwacher Sandstandort, rangiert mit einer BKZ von 16-23 am unteren Ende der Skala (LGB, 2021; HÜWE & ROUBITSCHEK, 2004). Auf solchen Standorten kann, abgesehen von Roggen, Mais und Hafer, kaum eine Ackerfrucht gewinnbringend angebaut werden (KRUG, 2013). Vor der Etablierung der KUP wurden auf der Untersuchungsfläche und umliegenden Agrarflächen o.g. annuellen Kulturen im jährlichen Wechsel kultiviert (DOMIN, 2021).

Begründet wurde die Fläche mit 20 cm langen Steckhölzern, die aus einjährigen Ruten geschnitten wurden. Das Mutterquartier befand sich im Landkreis Elbe-Elster. Der Pflanzabstand betrug 2,7 m x 1 m das entspricht ca. 3700 Bäume/ha. Die Fläche wurde vor der Pflanzung gepflügt und die Pflanzbettbereitung wurde mit der Kurzscheibenegge durchgeführt. Nach dem Stecken im März, wurde im Vorauflauf *StompAqua* (Fa. BASF Agricultural Solutions Deutschland, Limburgerhof) und *Boxer* (Syngenta Agro GmbH, Maintal) als erste Pflanzenschutzmaßnahme ausgebracht. Danach wurde die Begleitwuchsregulierung auf der Fläche nur noch mechanisch durchgeführt. Hierfür wurde zwischen den Reihen dreimal mit Grubber und Scheibenegge sowie einmal in der Reihe per Hand gearbeitet (DOMIN, 2021).

3.2.3 Versuchsaufbau

Der mit Fritzi Pauley bestockte Teil der Agrarholzfläche ist 0,4299 ha groß. Die Untersuchungsfläche sollte möglichst homogen sein und eine geringe Ausfallrate aufweisen. Die folgende Beschreibung der Untersuchungsfläche ist weitestgehend anhand von Abbildung 6 nachzuvollziehen. Das Untersuchungsraster erstreckt sich über alle neun Pflanzreihen und beinhaltet zehn fortlaufende Pflanzplätze je Reihe. Die Start- und Endbäume der Reihen wurden mit ihrer jeweiligen Identifikationsnummer von 1 bis 89 markiert.

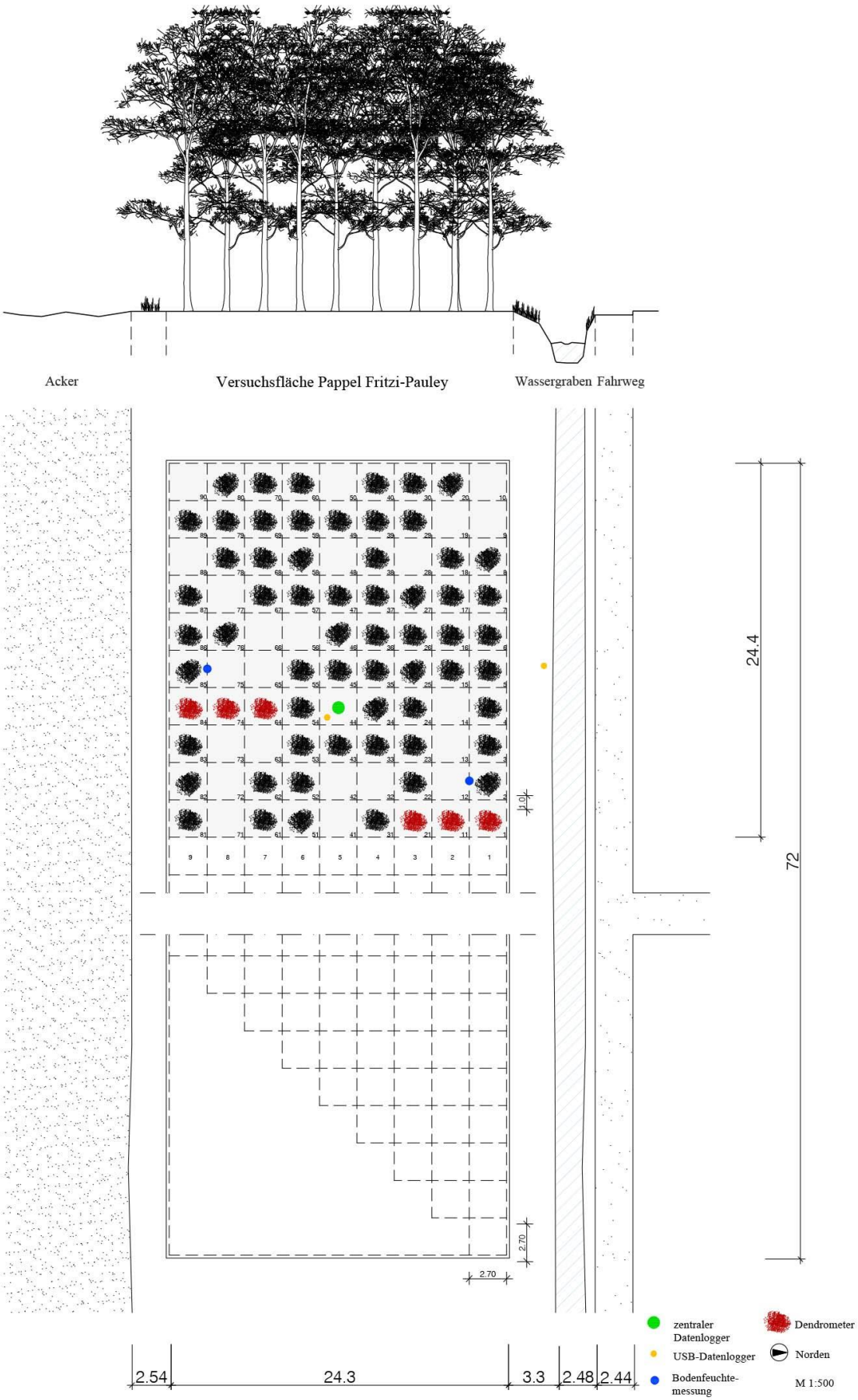

Abb. 6: Lageplan der Untersuchungsfläche

Am 03.11.2020 erfolgte eine Einstandsmessung durch Kreuzkluppung aller in der Untersuchungsfläche liegenden Pappeln. Zuerst wurde an allen Untersuchungsbäumen eine Markierung auf Brusthöhe (1,30 m) angebracht. Anschließend erfolgte die Messung mittels einer Kluppe (Modell Mantax Blue, Fa. Haglöf Sweden AB, Långsele, Schweden) erst in Nord/Süd-, dann in Ost/West-Ausrichtung. Diese Messwerte wurden addiert und anschließend durch zwei geteilt. Die Temperatur (˚C), Luftfeuchte (%) und Luftdruck (hPa) im Bestand wurden über den gesamten Untersuchungszeitraum mit USB-Datenloggern (Modell LOG32 THP, Dostmann electronic GmbH, Wertheim, +/- 0,5 °C (-10..40 °C), +/- 3% (40..60 % rF), +/- 1 hPa (900...1100 hPa), sonst 0,5 %) in 20 cm, sowie 2 m Höhe aufgenommen (siehe Abbildung 7). Weitere USB-Datenlogger wurden direkt am Peickwitzer Mühlgraben, sowie in 200m Abstand zur Fläche, mitten auf einem Acker positioniert. Die Niederschlagsmenge wurde mit Regenmessern nach Hellmann (Doppelwandiger Regenmesser, 200 cm² Auffangfläche, Messzylinder nach DIN 58667B, Fa. R.Fuess, Berlin) ermittelt.

Abb. 7: USB-Datenlogger und zentraler Datenlogger

Um den Zuwachs der Pappeln über den Zeitverlauf zu ermitteln, wurden die Individuen 1, 21, 31, in Gewässernähe und 64, 74 und 84, in Ackernähe, mit Dendrometern (Typ DD-L2, Fa. Ecomatik GmbH, Messbereich: 25,4mm, Auflösung: 0,03µm, Genauigkeit: +- 1,97% des Messwertes) ausgestattet (siehe Abbildung 8). Der zentrale Datenlogger (Modell GP2 Advanced, Fa. Delta-T Devices Limited, Cambridge, United Kingdom) erfasste die Daten

Abb. 8: Baum 64 mit Dendrometer

der sechs Dendrometer, sowie der vier Bodenfeuchte-Sonden. Die Bereitstellung der Geräte sowie Unterstützung bei deren Installation und Wartung erfolgte durch die UP GmbH (Ibbenbüren). Mit dem Ende der Vegetationsperiode des Jahres 2021 (27.10.2021) erfolgte erneut eine Kreuzkluppung auf Brusthöhe aller Pappeln im Untersuchungsplot.

3.2.4 Phänologie und Aufnahme der Wuchsparameter

Um mögliche Abweichungen im Beginn des Blattaustriebes innerhalb des Bestands festzustellen und den Beginn der Vegetationsperiode 2021 genau terminieren zu können, erfolgten im Frühjahr 2021 wöchentlich phänologische Aufnahmen. Hierfür wurden jeweils zehn Bäume innerhalb sowie fünf östlich und westlich des Untersuchungsrasters ausgewählt und markiert. Untersucht wurden pro Plot jeweils zwei Individuen in den Reihen 1, 3, 5, 7 und 9. Die Bonitur des Blattaustriebes erfolgte angelehnt an das Schema von LÖFFLER et al. (2009) und ist anhand des bebilderten Boniturschemas im Anhang nachzuvollziehen (Anlage 1). Der Zeitpunkt des Laubfalls der einzelnen Individuen wurde ebenfalls beobachtet und hierdurch das Ende der Vegetationsperiode 2021 baumspezifisch festgestellt. Die Vegetationsperiode wurde ab einem prozentualen Laubfall von 50 % für das jeweilige Baumindividuum als beendet angesehen.

3.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte für die Gewächshausversuche der Jahre 2020 und 2021 mit der Open Source-Software „R“ (Version 4.1.1) bzw. der Variante „R Studio“ (Version 1.4.1717). Anfangs wurde sortenspezifisch mit dem nicht-parametrischen Kruskal-Wallis Test überprüft, ob der jeweilige Parameter signifikant von der Bewässerungsvariante abhängt. Anschließend wurde für die verschiedenen aufgenommenen Parameter eine mehrfaktorielle Varianzanalyse mit der „model“-Funktion durchgeführt sowie die dazugehörige Nullhypothese getestet. Um die Unterschiede zwischen den Varianten sortenübergreifend auf Signifikanz zu testen wurde eine zweifaktorielle ANOVA mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($\alpha = 0{,}05$) ausgewählt. Eine Varianzanalyse setzt normalverteilte und varianzhomogene Daten voraus. Da diese Eigenschaften durch den „Shapiro-Wilk-Test“ auf Normalverteilung und den Bartlett-Test auf Varianzhomogenität nicht nachgewiesen werden konnten, wurden die Daten logarithmiert (YAP & RAZALI, 2011; ARSHAM & LOVRIC, 2011). Das Logarithmieren führt zu einer Normalverteilungsangleichung der Daten. Als Faktorstufen

der ANOVA wurden für die Gewächshausversuche die Bewässerungsvariante (1/3, 2/3, normal) und die Sorte (Max3, Fritzi Pauley) angenommen. Die zu prüfenden abhängigen Variablen waren die aufgenommenen Parameter:

- Wurzelentwicklung/-biomasse: Längste Wurzel, Wurzeltrockenmasse, Wurzelvolumen
- Oberirdische Entwicklung und Biomasse: Längster Trieb, Triebtrockenmasse, Blatttrockenmasse, Blattfläche

Diese Parameter wurden in der Folge kombiniert und in ein multivariables Modell („cbind"-Funktion) eingesetzt und ebenfalls auf Signifikanz überprüft. Um die Ergebnisse deskriptiv darzustellen, wurden der Übersichtlichkeit und einfachen Darstellung wegen ausschließlich Boxplots verwendet.

Aufgrund der geringen Datenmenge, dem Mangel an Variablen und des damit einhergehenden Verzichts auf eine Varianzanalyse, wurden die Daten des Feldversuchs mittels Microsoft Excel (Version 2108) ausgewertet und grafisch dargestellt.

4. Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Gewächshausversuche 2020 und 2021 sowie des Feldversuches auf der Untersuchungsfläche in Peickwitz vorgestellt.

4.1 Gewächshausversuch Max3

Der Gewächshausversuch mit der Sorte Max3 erfolgte in den Jahren 2020 und 2021. Die Ergebnisse dieser Versuche werden in diesem Teil gegenübergestellt und Unterschiede herausgearbeitet.

4.1.1 Wurzelentwicklung

Das Jahr 2020 hat im Mittel längere Wurzeln hervorgebracht als das Jahr 2021. In Abbildung 9 sind die Messwerte der längsten Wurzel der jeweiligen Pflanze, gruppiert nach Bewässerungsvariante und Versuchsjahr, abgebildet. Unter Einbeziehung aller Bewässerungsvarianten beträgt der Mittelwert der längsten Wurzel im Jahr 2020 39,65 cm und 32,36 cm im Jahr 2021.

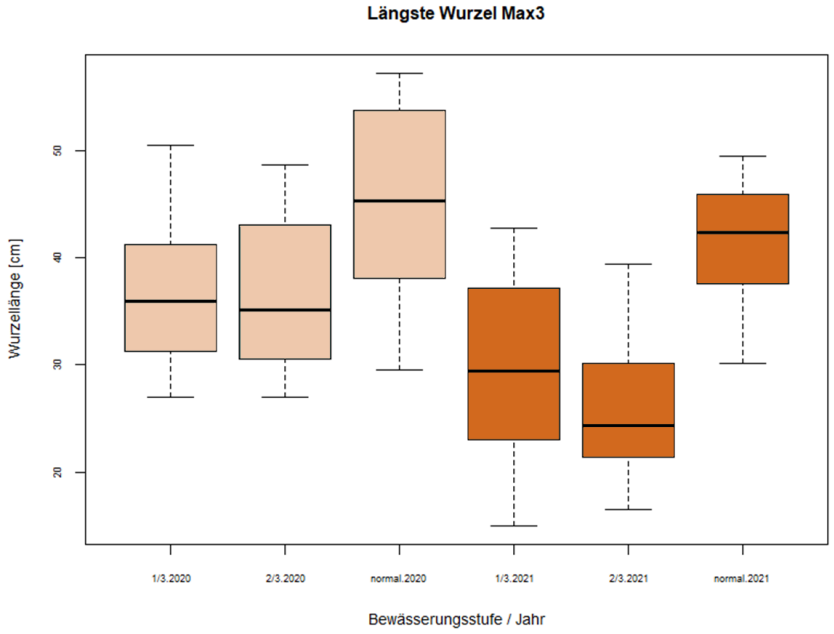

Abb. 9: Längste Wurzel Max3

Die Bewässerungsvarianten unterscheiden sich zum Teil deutlich. Die Bewässerungsvariante „normal“ bringt in beiden Jahren die längsten Wurzeln mit einer Länge von 45,4 cm im Jahr 2020 sowie 41,6 cm im Jahr 2021 hervor. Damit liegt sie im

Gegensatz zu den Varianten „1/3“ und „2/3“ in beiden Jahren auf ähnlichem Niveau. Die Varianten „1/3“ und „2/3“ unterscheiden sich im Jahr 2020 mit Werten von 36,7 cm („1/3“-Variante) und 36,9 cm („2/3“-Variante) kaum und liegen auch im Jahr 2021 auf ähnlichem Niveau („1/3“-Variante: 29,7 cm, „2/3“-Variante: 25,8 cm).

Betrachtet man die in Abbildung 10 dargestellte Trockenmasse der Wurzeln zeigt sich ein vergleichbares Bild. Die Wurzeltrockenmassen des Jahres 2020 liegen mit durchschnittlich 0,539 g deutlich vor dem Mittelwert des Jahres 2021 von 0,323 g. Die Trockenmasse variiert mit Werten zwischen 0,446 g („1/3“-Variante) und 0,602 g („2/3“-Variante) im Versuchsjahr 2020 nur geringfügig. Die Varianz innerhalb der Bewässerungsvarianten ist jedoch relativ hoch. Im Gegensatz dazu finden sich im Versuchsjahr 2021 große Unterschiede zwischen den Varianten, deren mittlere Trockenmasse von 0,167 g („2/3“-Variante) bis 0,594 g („normal“-Variante) rangiert. Die einer simulierten Überflutung ausgesetzten Versuchsgruppen bringen hier jeweils nur eine durchschnittliche Wurzelmasse von rund einem Drittel der „normal“-Variante (0,594g) hervor.

Der nicht parametrische Kruskal-Wallis Test hat gezeigt, dass sowohl der Parameter „längste Wurzel“ (p-Wert= $1{,}043*e^{-05}$) als auch die Wurzeltrockenmasse (p-Wert= 0,002731) statistisch signifikant auf die Bewässerungsvariante reagieren.

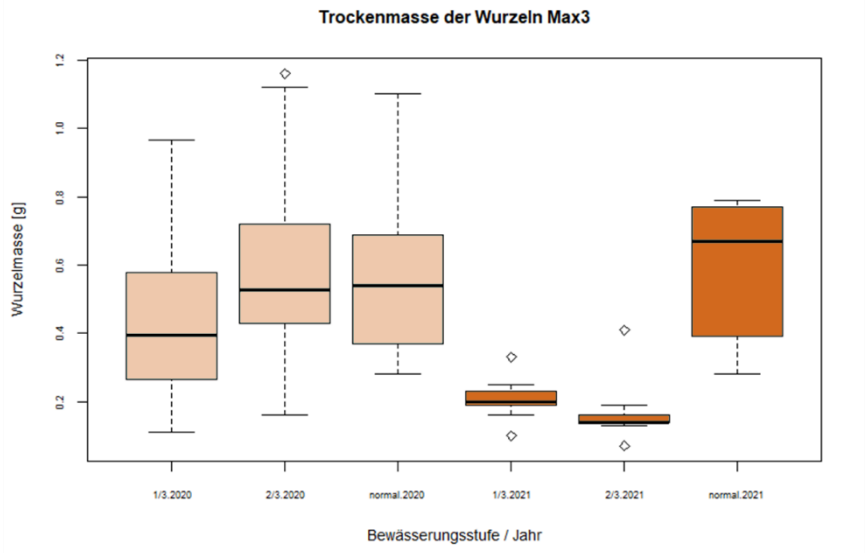

Abb. 10: Trockenmasse der Wurzeln Max3

4.1.2 Oberirdische Entwicklung und Biomasse

Wie in Abbildung 11 zu sehen ist, unterscheiden sich die Mittelwerte der längsten Triebe deutlich zwischen den Jahren 2020 und 2021. Die längsten Triebe des Jahres 2021 waren mit einer Länge von 111,23 cm durchschnittlich 20 cm länger als im Jahr 2020 (91,21cm). Die Unterschiede zwischen den drei Bewässerungsstufen zeigen in beiden Jahren die gleiche Tendenz. Die Bewässerungsstufen „1/3“ und „2/3“ bringen in beiden Jahren längere Triebe als „normal“ hervor, jedoch im Jahr 2021 auf deutlich höherem Niveau. Die „normal“-Variante des Jahres 2021 fällt deutlich ab und liegt mit ihrem Mittelwert von 88,3 cm nur knapp über dem Vergleichswert aus dem Jahr 2020 von 79,0 cm.

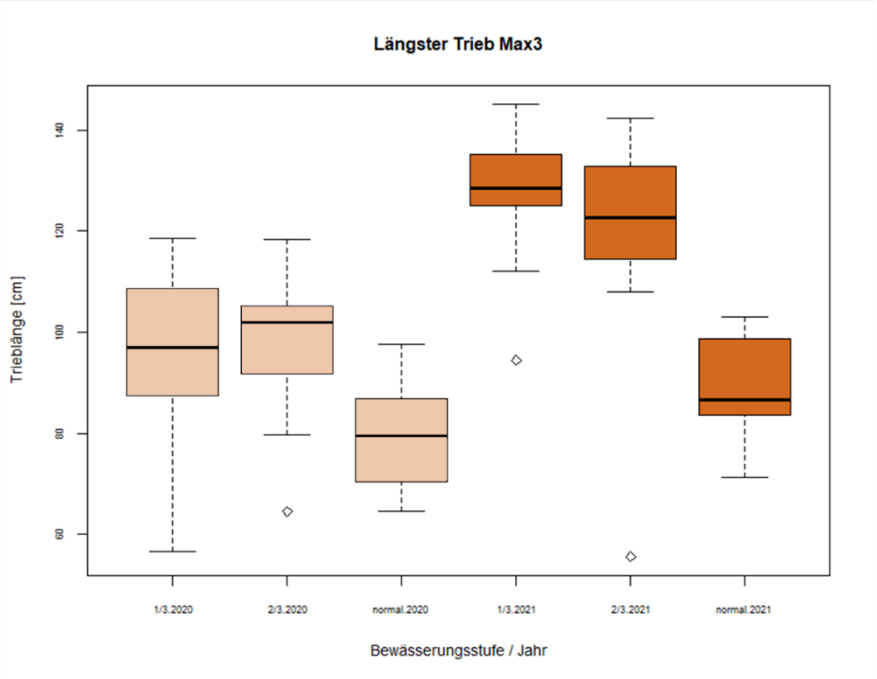

Abb. 11: Längster Trieb Max3

Betrachtet man die Trockenmasse der Triebe in Abbildung 12 zeigt sich ein anderes Bild. Die Jahresmittelwerte unterscheiden sich ebenfalls, allerdings weist das Jahr 2020 mit einer durchschnittlichen Trockenmasse von 5,99 g höhere Werte auf als 2021 mit 4,56g. Zudem zeigen die manuell bewässerten Varianten des Jahres 2020 deutlich höhere Trockenmassen als die „normal“-Variante des gleichen Jahres und alle Versuchsgruppen des Jahres 2021. Entgegen dem Trend aus 2020, produzierte die „normal“-Variante die höchste Trieb-Trockenmasse des Jahres 2021 mit durchschnittlich 5,28 g.

Der Kruskal-Wallis Test hat gezeigt, dass der Parameter „längster Trieb“ mit einem p-Wert von 2,087*e^{-07} statistisch hoch signifikant auf den Faktor „Bewässerungsvariante“ reagiert. Die Trockenmasse der Triebe reagierte nicht signifikant (p-Wert = 0,05486), näherte sich der 5%-Irrtumswahrscheinlichkeit aber stark an.

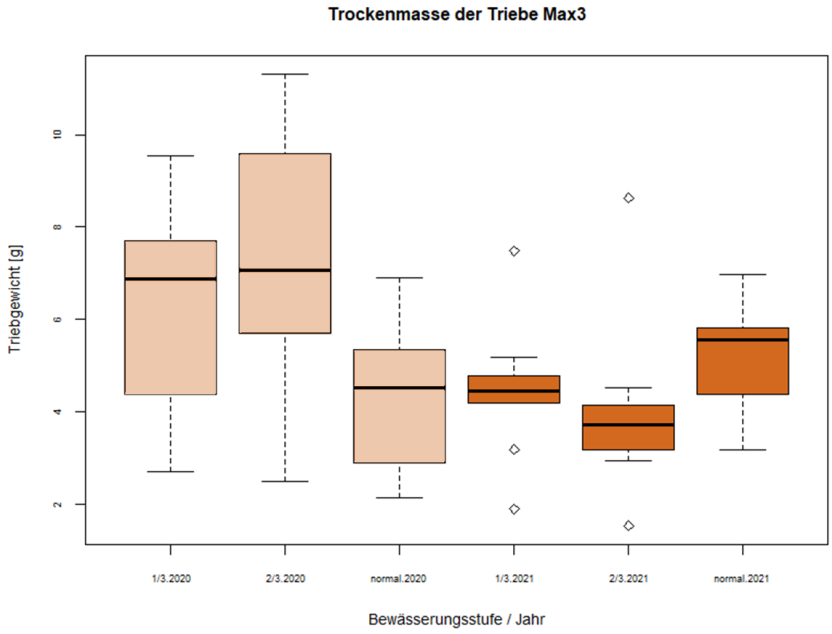

Abb. 12: Trockenmasse der Triebe Max3

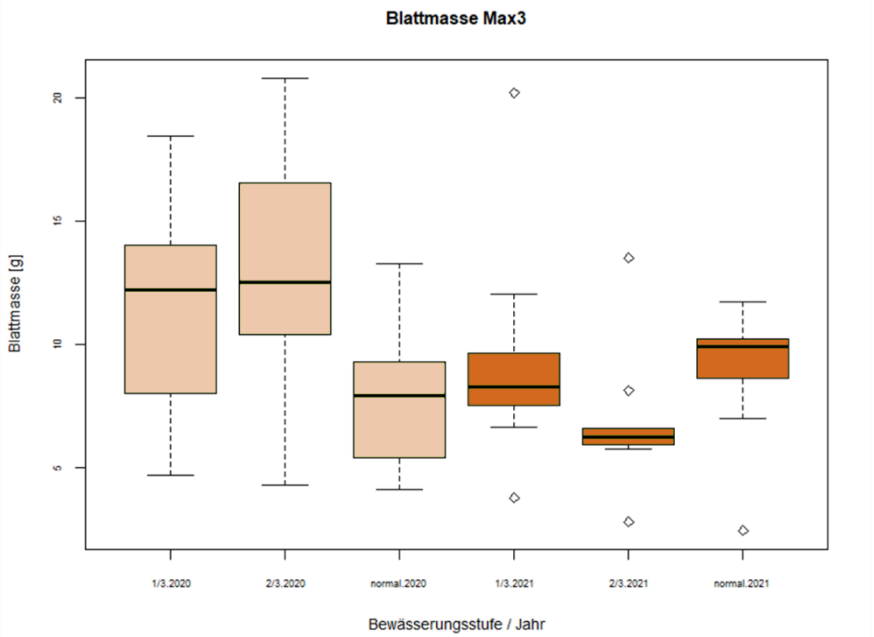

Abb. 13: Trockenmasse der Blätter Max3

Wie in Abbildung 13 dargestellt, verhält sich die Blatttrockenmasse relativ kongruent zu der gerade betrachteten Trockenmasse der Triebe. Der Mittelwert für das Jahr 2020

beträgt 10,7 g. Im Jahr 2021 lag die durchschnittliche Blatttrockenmasse bei 8,32 g. Die manuellen Bewässerungsvarianten des Jahres 2020 haben die größte Blattmasse zu verzeichnen, während die „normal“-Variante abfällt. Im Jahr 2021 zeigt sich das umgekehrte Bild: die „normal“-Variante erreicht die höchsten Werte, die Varianten „1/3“ und „2/3“ weisen geringere Mittelwerte mit einigen Ausreißern nach oben und unten auf.

Die durchschnittliche Blattfläche aller Bewässerungsvarianten des Jahres 2020 liegt bei 2.846,78 cm². Das Jahr 2021 brachte im Mittel 2.505,57cm² Blattfläche hervor. Da bei den untersuchten Pflanzen eine Abhängigkeit zwischen Blattfläche und Blattmasse besteht, sind korrespondierende Ergebnisse für beide Parameter zu erwarten. Dies bestätigen auch die Ergebnisse, weswegen auf eine separate Darstellung der Blattmasse verzichtet wird.

Die Blatttrockenmasse steht mit einem p-Wert von 0,04164 in statistisch signifikanter Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante. Die 5 %-Irrtumswahrscheinlichkeit wird im Falle der Blattfläche knapp überschritten (p-Wert = 0,06695).

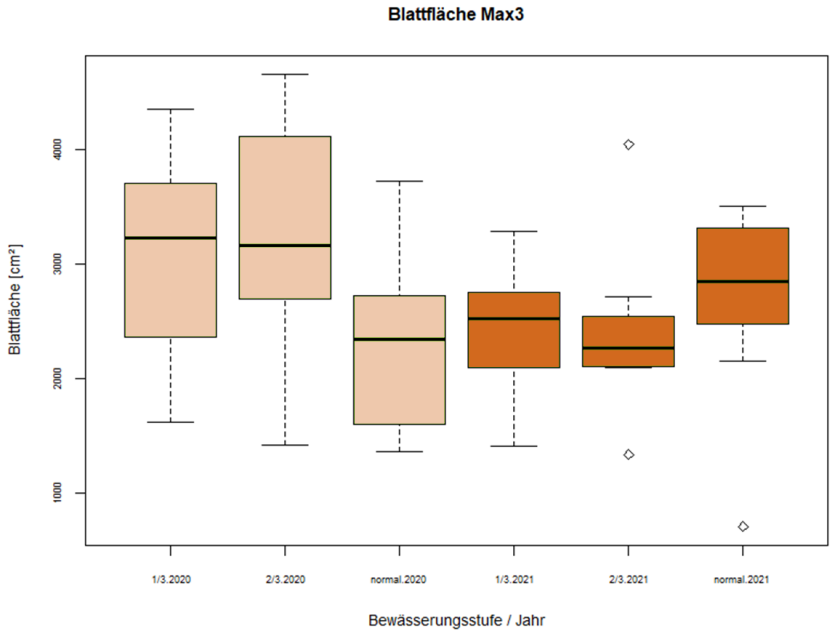

Abb. 14: Blattfläche Max3

4.1.3 Wurzel-Spross-Verhältnis Max3

In Abbildung 15 ist das Wurzel-Spross-Verhältnis dargestellt. Der Wert auf der y-Achse gibt an, um welchen Faktor die Wurzelmasse kleiner ist als die Sprossmasse (alle oberirdischen Pflanzenteile). Eine Pflanze mit geringer Sprossmasse und verhältnismäßig hoher Wurzelmasse ist demnach im unteren Skalenbereich der y-Achse angesiedelt. Das durchschnittliche Wurzel-Spross-Verhältnis des Jahres 2020 beträgt 33,74. Im Versuchsjahr 2021 lag der Faktor mit durchschnittlich 52,44 deutlich darüber. Während die „normal"-Varianten beider Jahre sehr ähnliche Werte hervorbringen, variiert das Wurzel-Spross-Verhältnis der Bewässerungsvarianten „1/3" und „2/3" deutlich zwischen den Jahren.

Das Wurzel-Spross-Verhältnis reagiert mit einem p-Wert von $4{,}241*e^{-12}$ statistisch hoch signifikant auf den Faktor „Bewässerungsvariante".

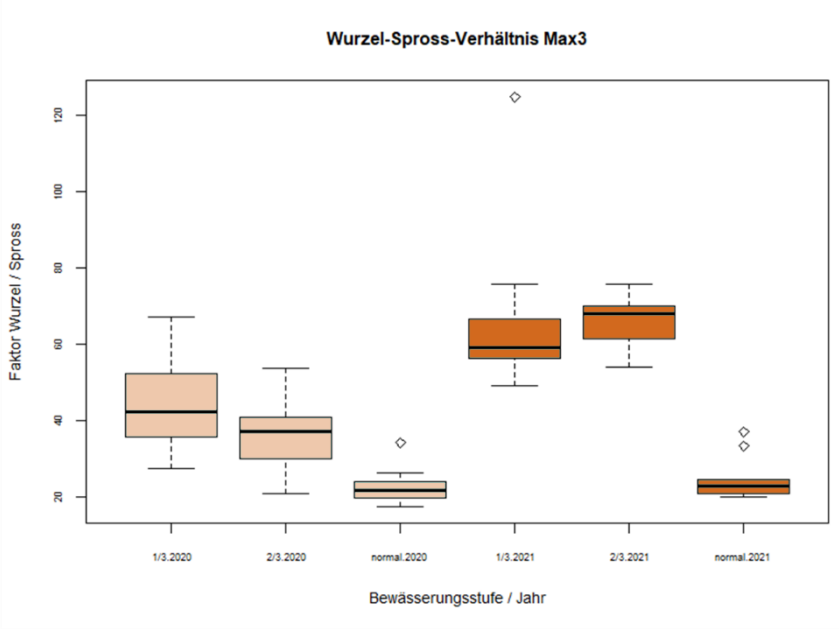

Abb. 15: Wurzel-Spross-Verhältnis Max3

4.2 Gewächshausversuch Fritzy Pauley

Ein Versuchsaufbau unter Einbeziehung der Sorte Fritzi Pauley erfolgte im Jahr 2021 im VLO Hetzdorf. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden im folgenden Abschnitt vorgestellt.

4.2.1 Wurzelentwicklung

In Abbildung 16 werden die Messwerte der durchschnittlich längsten Wurzel, nach Bewässerungsvariante gruppiert, dargestellt. Die längsten Wurzeln wurden mit 21,61 cm in der Bewässerungsgruppe „1/3“ ausgebildet. Die mit 45,7 cm längste Wurzel aller Fritzi Pauley Pappeln findet sich in der „normal“-Variante. Durchschnittlich bildet diese Bewässerungsvariante allerdings kleinere Wurzellängen aus (20,65 cm). Die Variante „2/3“ bringt mit durchschnittlich 18,3 cm die geringsten Wurzellängen hervor.

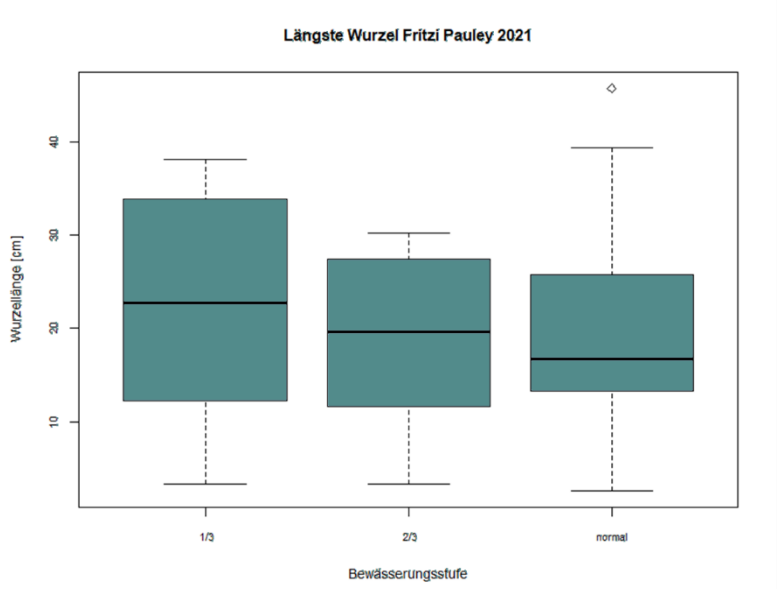

Abb. 16: Längste Wurzel Fritzi Pauley

Die in Abbildung 17 dargestellte Trockenmasse der Wurzeln, ist bei der Bewässerungsvariante „normal“ mit durchschnittlich 0,274 g pro Baumindividuum am größten. Die zwei produktionsstärksten Individuen OLG-4 und OLG-6 aus der Gruppe der „normal“ bewässerten Klone sind in der Abbildung 17 als Ausreißer dargestellt. Sie verfälschen die von „R“ errechnete Mittelwertlinie. Die „1/3“-Variante produzierte mit durchschnittlich 0,264 g geringfügig weniger Wurzelmasse als die „normal“-Variante, jedoch deutlich mehr als die „2/3“-Variante, welche mit 0,156 g Wurzeltrockenmasse deutlich abfällt.

Unter Anwendung einer Varianzanalyse konnte für die längste Wurzel (p-Wert = 0,9378) wie auch für die Trockenmasse der Wurzeln (p-Wert = 0,6096) keine statistisch signifikante Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante nachgewiesen werden.

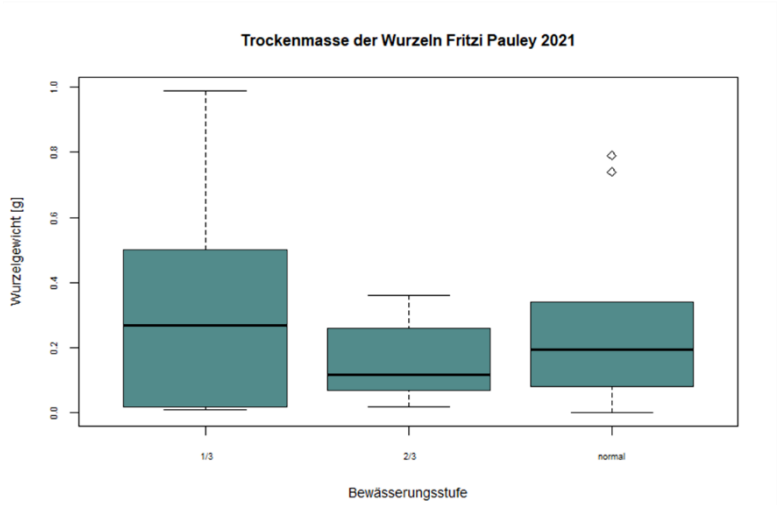

Abb.17: Trockenmasse der Wurzeln Fritzi Pauley

4.2.2 Oberirdische Entwicklung und Biomasse

Wie in Abbildung 18 ersichtlich, gilt für die Sorte Fritzi Pauley, dass mit einer Zunahme der Wasserverfügbarkeit auch die durchschnittliche Länge der Triebe zunimmt. Während die Unterschiede zwischen den Bewässerungsvarianten „1/3“ und „2/3“ eher gering sind, fällt die „normal“-Variante deutlich zurück.

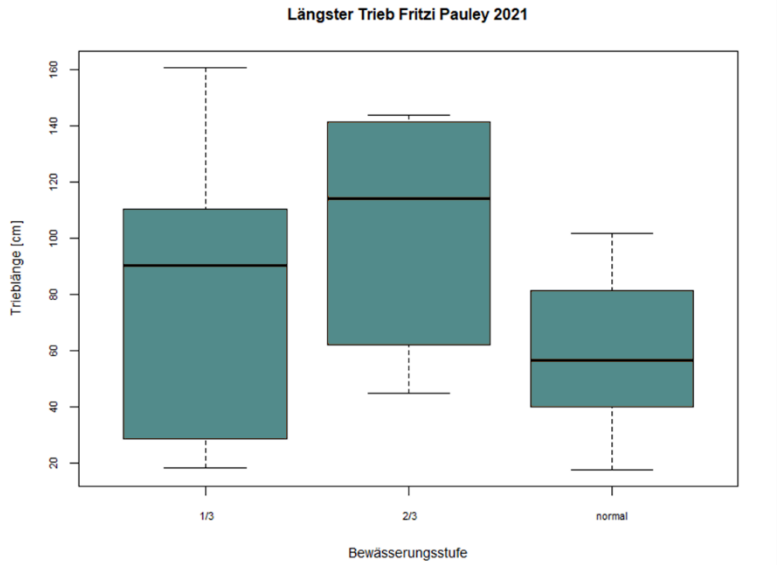

Abb. 18: Längster Trieb Fritzi Pauley

Betrachtet man die Trockenmasse der Triebe in der Abbildung 19, zeigt sich eine ähnliche Tendenz. Wobei die „1/3“-Variante mit durchschnittlich 4,53 g vor der „2/3“-Variante mit 3,03 g liegt, folglich eine um etwa 30 % größere Triebmasse hervorbringt. Erwähnenswert ist ein Ausreißer innerhalb der „1/3“-Variante, der mit einer Triebtrockenmasse von 20,33 g mehr als das Vierfache der durchschnittlichen Triebmasse produziert hat. Die Normalvariante fällt mit einer durchschnittlichen Triebtrockenmasse von 1,89 g wiederum deutlich hinter die Varianten mit simuliert hoch anstehendem Grundwasser zurück.

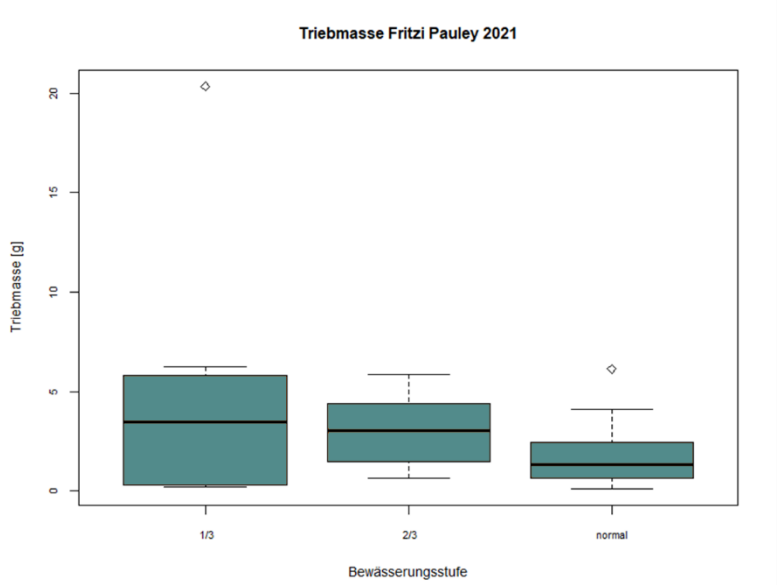

Abb. 19: Trorckenmasse der Triebe Fritzi Pauley

Der Parameter „längster Trieb“ steht mit einem p-Wert von 0,04229 in statistisch signifikanter Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante. Die Trockenmasse der Triebe erreicht lediglich einen p-Wert von 0,3396, womit eine statistisch signifikante Abhängigkeit negiert werden kann.

Die Reihenfolge der Bewässerungsvarianten im Massenvergleich wird mit Blick auf die in Abbildung 20 dargestellte Blatttrockenmasse bestätigt. Die Abstände zwischen den Gruppen sind jedoch wesentlich geringer. Der Eindruck der unten stehenden Boxplots täuscht, da der Ausreißer innerhalb der „2/3“-Variante (18,77 g) nicht in die Darstellung der Mittelwert-Linie einbezogen wird. Von den Individuen der „2/3“-Variante wurden durchschnittlich 5,78 g Blatttrockenmasse produziert. Die Bewässerungsvariante „1/3“ und „normal“ folgen mit 5,30 g, sowie 4,85 g.

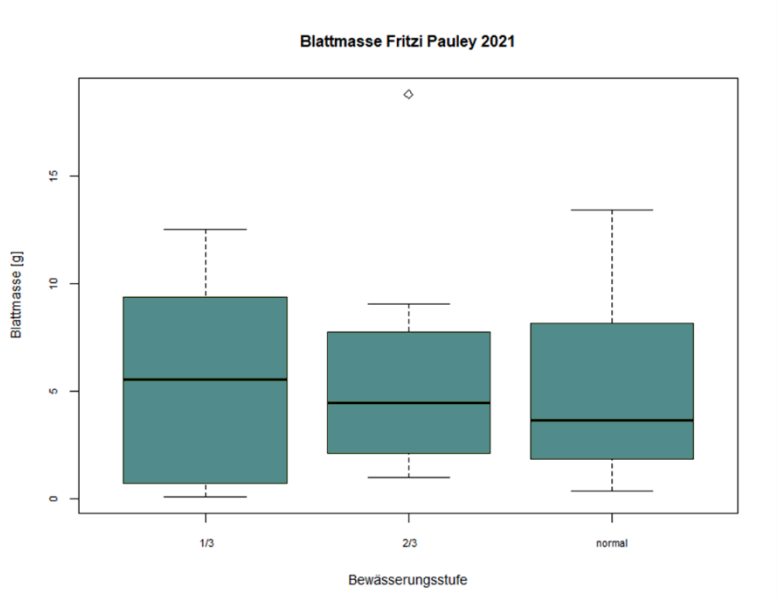

Abb. 20: Trockenmasse der Blätter Fritzi Pauley

Wie mit Blick auf die Abbildung 21 ersichtlich, ist die durchschnittliche Blattfläche der Varianten „1/3“ und „2/3“ nahezu identisch („1/3“: 1.415,2 cm², „2/3“: 1.406,73 cm²). Die Bewässerungsvariante „normal“ liegt mit einer durchschnittlichen Blattfläche von 894,52cm² ein weiteres Mal deutlich darunter.

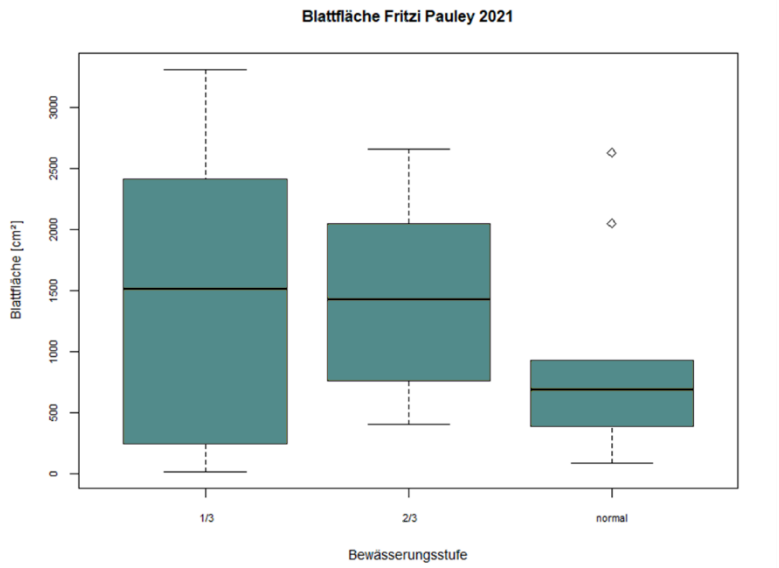

Abb. 21: Blattfläche Fritzi Pauley

Durch eine Varianzanalyse war sowohl für die Trockenmasse der Blätter (p-Wert = 0,9291) als auch für die Blattfläche (p-Wert = 0,3418) keine statistisch signifikante Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante nachweisbar.

4.2.3 Wurzel-Spross-Verhältnis

In Abbildung 22 ist das Wurzel-Spross-Verhältnis in Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante dargestellt. Die Ausreißer innerhalb der „normal“-Variante lassen mit Blick auf die Mittelwertlinien falsche Schlüsse zu. Den geringsten Faktor von 39,48, also die verhältnismäßig größte Wurzelmasse, entwickelte die „1/3“-Variante. Die „normal“-Variante folgt mit einem Faktor von 46,05. Die Individuen der “2/3”-Variante investierten erwartungsgemäß überwiegend in das oberirdische Wachstum und kamen lediglich auf einen Faktor von 69,11.

Mit einem errechneten p-Wert von 0,0119 besteht eine statistisch signifikante Abhängigkeit des Wurzel-Spross-Verhältnisses von der Bewässerungsvariante.

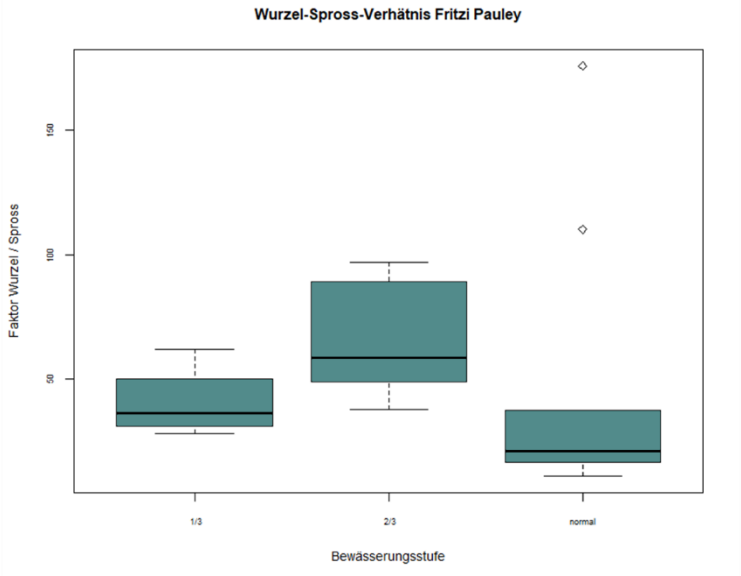

Abb. 22: Wurzel-Spross-Verhältnis Fritzi Pauley

4.3 Vergleich Max3 / Fritzi Pauley 2021

Durch den Versuchsaufbau des Jahres 2021 war es möglich, dass die jeweiligen Bewässerungsvarianten der Sorten Max3 und Fritzi Pauley unter exakt denselben Bedingungen aufwuchsen. Dies macht einen direkten Vergleich zwischen den Sorten möglich, der im folgenden Abschnitt in geschriebener und grafischer Form erfolgt.

4.3.1 Wurzelentwicklung

Bei der Ausbildung der durchschnittlich längsten Wurzel besteht zwischen den Sorten ein deutlicher Unterschied, wie mit Blick auf Abbildung 23 deutlich wird. Die Individuen der Sorte Max3 bringen mit einer Länge von 32,36 cm versus 20,19 cm (Fritzi Pauley) über alle drei Bewässerungsvarianten hinweg durchschnittlich längere Wurzeln hervor. Während die Varianz zwischen den Bewässerungsvarianten bei der Sorte Max3 größer ist, ist die Varianz innerhalb der jeweiligen Variante bei der Sorte Fritzi Pauley deutlicher ausgeprägt. Bemerkenswert ist, dass die Normalvariante der Sorte Max3 deutlich vor den Varianten „1/3“ und „2/3“ liegt, die Normalvariante der Sorte Fritzi Pauley wiederum hinter den sorteneigenen Varianten „1/3“ und „2/3“ zurückfällt. Durch die Anwendung einer Varianzanalyse konnte jedoch gezeigt werden, dass nur der Parameter „Sorte“ einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Wurzellänge hat.

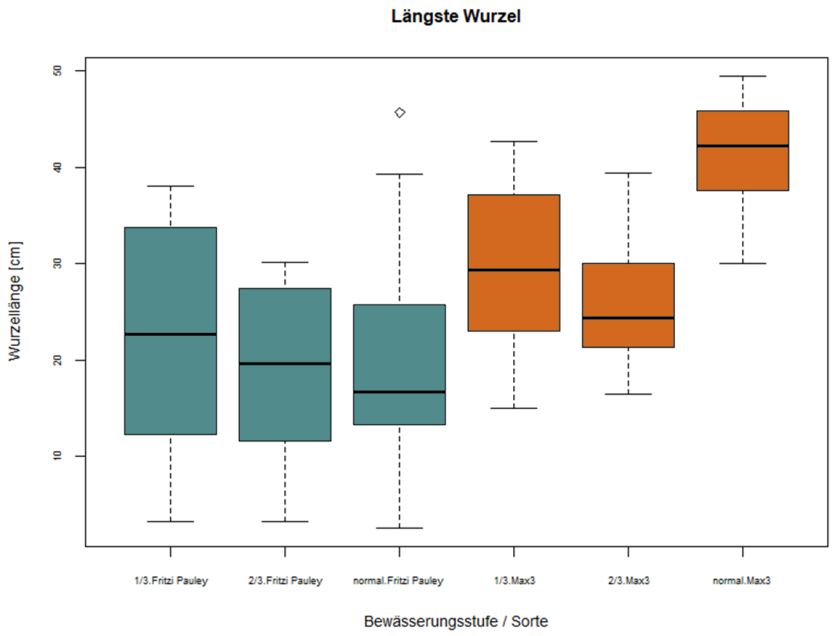

Abb. 23: Längste Wurzel Max3 & Fritzi Pauley

Die Abbildung 24 zeigt die ausgebildeten Wurzeltrockenmassen nach Sorte und Bewässerungsvariante gruppiert. Die Sorte Max3 bildet Varianten übergreifend durchschnittlich 0,323 g Wurzelmasse aus. Der Mittelwert aller Fritzi Pauley Individuen liegt mit 0,231 g dahinter. Auffällig ist, dass die Max3 „normal“-Variante mit 0,594 g deutlich vor den Fritzi Pauley- sowie den sorteneigenen Varianten liegt. Die Entwicklung von Wurzelmasse ist bei den „2/3“-Varianten beider Sorten stark gehemmt (Fritzi Pauley: 0,156 g; Max3: 0,167 g). Die Wurzelgewichte der Bewässerungsgruppen „normal“ und „1/3“ der Sorte Fritzi Pauley unterscheiden sich mit 0,274 g und 0,264 g nur minimal, während die Max3-Variante „1/3“ mit 0,209 g deutlich hinter der sorteneigenen „normal“-Variante zurückbleibt.

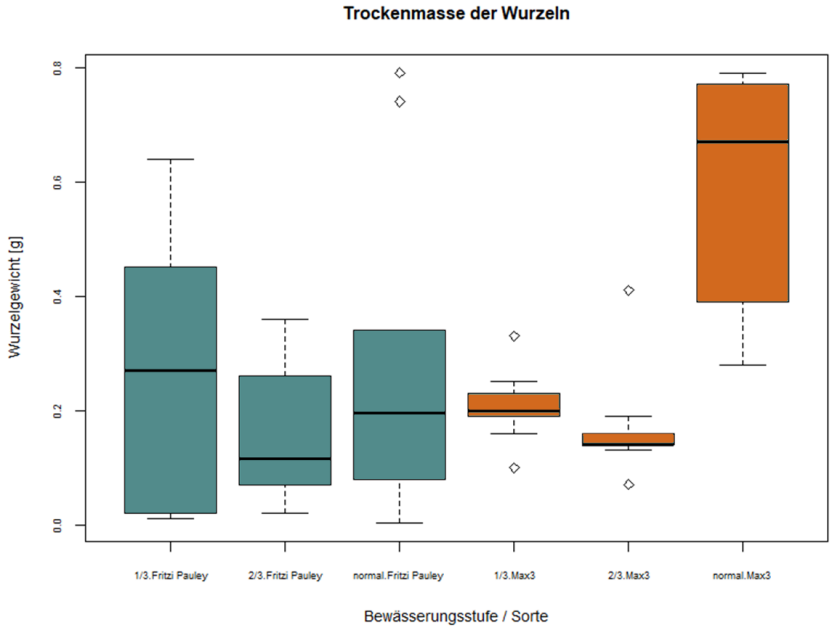

Abb. 24: Trockenmasse der Wurzeln Max3 & Fritzi Pauley

4.3.2 Oberirdische Entwicklung und Biomasse

Wie in Abbildung 25 dargestellt, bildet die Sorte Max3 mit 111,23 cm durchschnittlich längere Triebe aus als die Sorte Fritzi Pauley mit 82,28 cm. Die Bewässerungsvarianten „1/3“ und „2/3“ beider Sorten sind jeweils auf ähnlichem Niveau. Die ausgebildeten Trieblängen der „normal“-Variante bleiben bei der Sorte Max3 um ~ 30 %, bei der Sorte Fritzi Pauley gar um ~ 40 % hinter den anderen sorteneigenen Bewässerungsvarianten zurück. Außerdem bemerkenswert ist die große Varianz, die Fritzi Pauley zwischen und v.a. innerhalb der Bewässerungsgruppen aufweist.

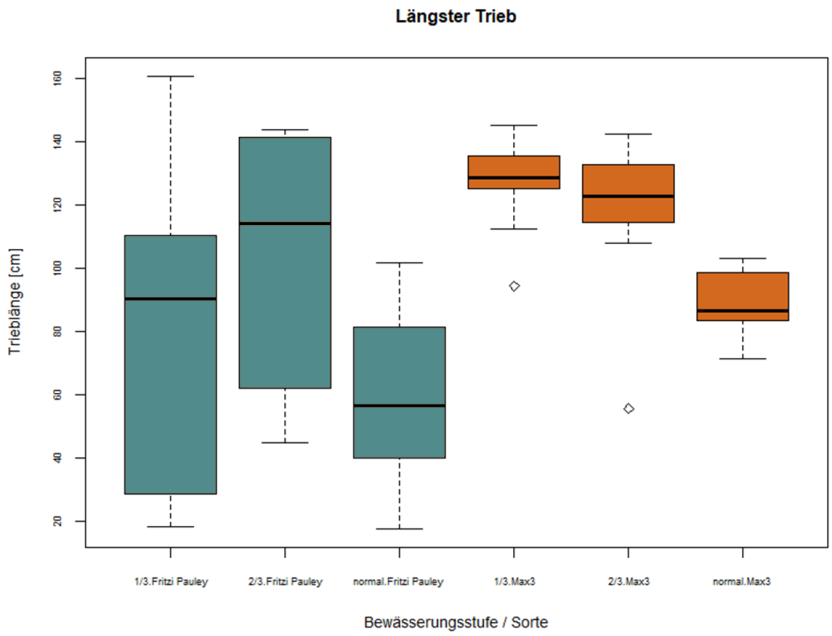

Abb. 25: Längster Trieb Max3 & Fritzi Pauley

Wie auf Abbildung 26 ersichtlich, ist die durchschnittliche Triebtrockenmasse der „1/3“-Varianten beider Sorten nahezu identisch (Fritzi Pauley: 4,54 g, Max3: 4,44 g). Die „2/3“-Varianten sind mit 3,03 g bei der Sorte Fritzi Pauley und 3,96 g bei der Sorte Max3 ebenfalls auf ähnlichem Niveau. Die „normal“-Variante verhält sich differenziert. Liegt sie bei der Sorte Fritzi Pauley mit 1,89 g deutlich hinter den beiden Bewässerungsvarianten, weisen die Triebe der „normal“ bewässerten Max3 Individuen mit durchschnittlich 5,28 g die größte Masse aller Untersuchungsgruppen auf. Über die Bewässerungsvarianten hinweg bildet die Sorte Max3 mit durchschnittlich 4,56 g mehr Triebmasse aus als die Sorte Fritzi Pauley mit 3,15 g. Die Varianz innerhalb sowie die Unterschiede zwischen den Bewässerungsvarianten sind bei der Sorte Fritzi Pauley abermals stärker ausgeprägt.

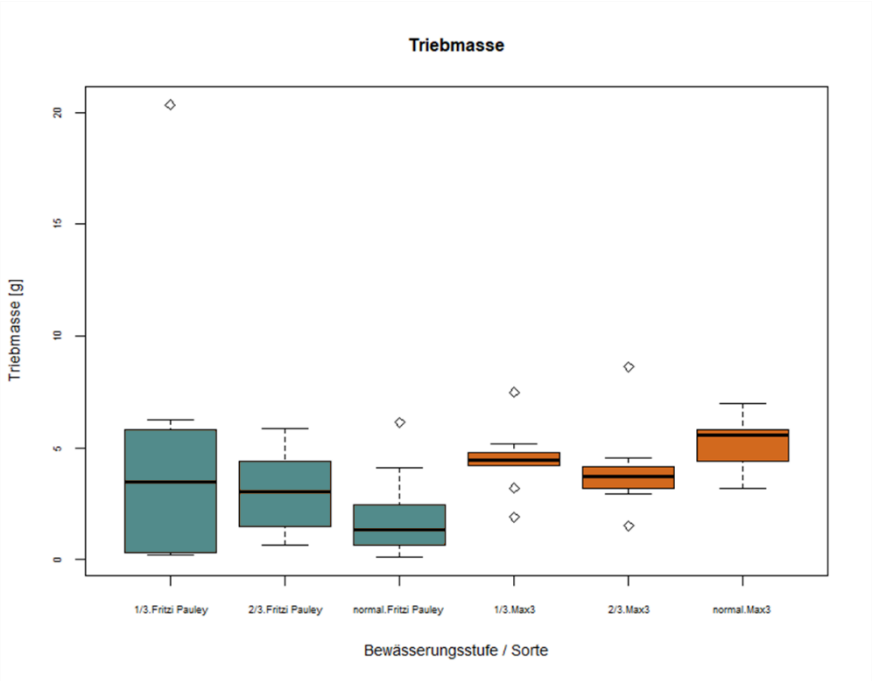

Abb. 26: Trockenmasse der Triebe Max3 & Fritzi Pauley

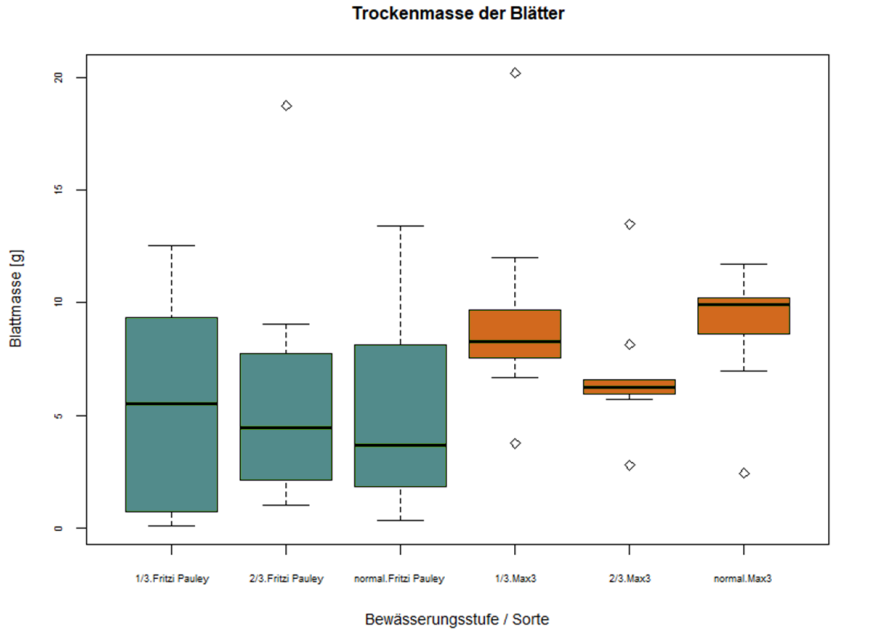

Abb. 27: Trockenmasse der Blätter Max3 & Fritzi Pauley

Abbildung 27 zeigt die von der jeweiligen Sorte und Bewässerungsvariante ausgebildete Trockenmasse der Blätter. Die Max3-Individuen produzierten über die Bewässerungsvarianten hinweg durchschnittlich 8,22 g Blattmasse. Das ist deutlich mehr als die Fritzi Pauley-Pflanzen mit 5,31 g entwickelten. Überraschenderweise variiert die Trockenmasse der Blätter zwischen den drei Bewässerungsvarianten der Sorte Fritzi

Pauley nur geringfügig („1/3“: 5,3 g, „2/3“: 5,78 g, „normal“: 4,85 g), während die Varianten „1/3“ mit 9,29 g und „normal“ mit 8,91 g der Sorte Max3 auf ähnlichem Niveau liegen und die Variante „2/3“ mit durchschnittlich 6,76 g dahinter zurückbleibt.

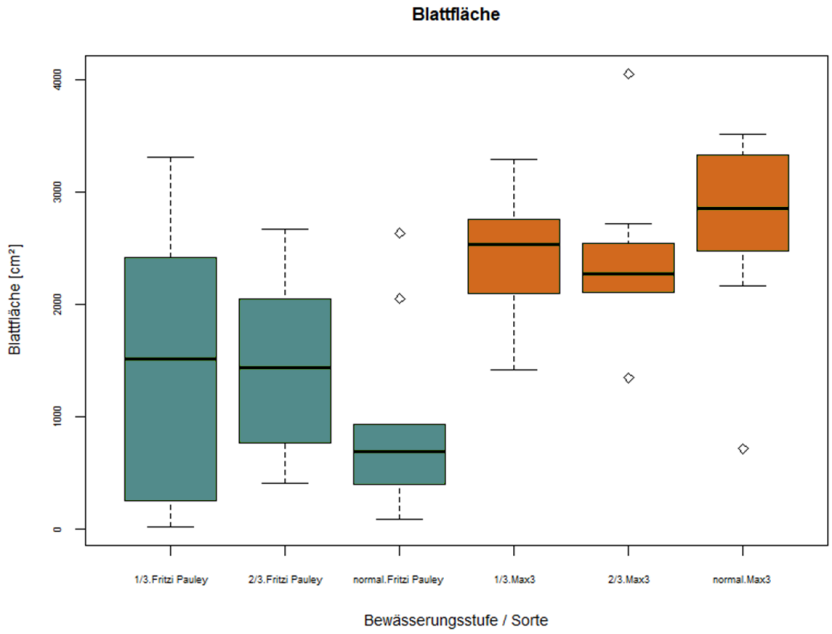

Abb. 28: Blattfläche Max3 & Fritzi Pauley

Analog zur Blattmasse liegt die Sorte Max3 auch bei der Blattfläche deutlich vor Fritzi Pauley, wie in Abbildung 28 dargestellt wird. Die durchschnittliche Blattfläche der Max3-Klone beträgt mit 2.505,55 cm² nahezu das Doppelte der von der Sorte Fritzi Pauley durchschnittlich ausgebildeten Blattfläche von 1.238,82 cm². Hervorzuheben ist, dass die „normal“-Variante der Sorte Max3 die größten und die „normal“ Variante der Sorte Fritzi Pauley die geringsten Blattflächen entwickelt hat. Folglich führt die Simulation hochanstehenden Grundwassers sortenspezifisch zu sehr unterschiedlichen Wuchsreaktionen.

4.3.3 Wurzel-Spross-Verhältnis

Mit Blick auf die Abbildung 29 werden die sorten- und variantenspezifischen Unterschiede im Wurzel-Spross-Verhältnis deutlich. Während die „2/3“-Varianten beider Sorten nahezu identisch sind, unterscheiden sich die „normal“- und „1/3“-Varianten stark. Die „normal“-Variante der Sorte Max3 liegt mit einem Faktor von 24,77 deutlich unterhalb der Fritzi Pauley „normal“-Variante mit 46,05. Die Betrachtung der Bewässerungsvariante „1/3“ zeigt, dass die Sorte Fritzi Pauley mit einem Faktor von

39,48 ein ausgewogeneres Wurzel-Spross-Verhältnis als die Sorte Max3 (66,37) aufweist. Die Varianz innerhalb der Bewässerungsgruppen ist bei der Sorte Fritzi Pauley abermals stärker ausgeprägt. Die größere Varianz zwischen den Bewässerungsgruppen zeigt die Sorte Max3. Variantenübergreifend erreicht die Sorte Max3 einen Faktor von 52,44. Die Sorte Fritzi Pauley liegt mit einem durchschnittlichen Faktor von 50,21 leicht darunter.

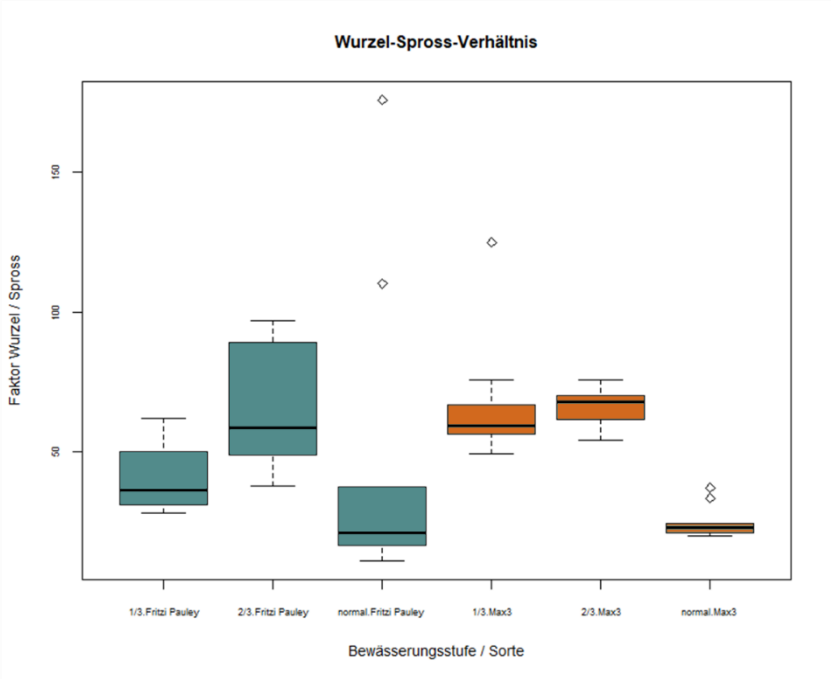

Abb. 29: Wurzel-Spross-Verhältnis Max3 & Fritzi Pauley

Abschließend ist herauszustellen, dass der Faktor „Sorte“ unter Anwendung einer Varianzanalyse auf alle getesteten Parameter einen statistisch signifikanten Einfluss hat. Die p-Werte bewegen sich zwischen 0,01969 für die Wurzeltrockenmasse und 0,000115 für die Blattfläche. Die Bewässerungsvariante hat lediglich auf die Ausprägung des Parameters „längster Trieb“ (p-Wert = 0,01696) und das Wurzel-Spross-Verhältnis (p-Wert = 0,0213) einen statistisch signifikanten Einfluss. In der Konsequenz wurden einzelne Parameter kombiniert und mit einem multivariablen Modell auf Signifikanz getestet (p-Wert ≤ 0,05), um durch Kombination Signifikanzen aufzuzeigen.

Tab. 1: Signifikanzen von Parameterkombinationen

Kombination	p-Wert
Trockenmasse Blätter + Blattfläche	0,1406
Trockenmasse Triebe + längster Trieb	1,242*e^-06
Trockenmasse Triebe + Trockenmasse Blätter	0,03989
Längster Trieb + längste Wurzel	0,0007634
Trockenmasse Triebe + Trockenmasse Wurzeln	9,454*e^-07
Trockenmasse Wurzeln + längste Wurzel	0,4017
Trockenmasse Triebe + Trockenmasse Blätter + Trockenmasse Wurzeln	3,23*e^-07

4.4 Feldversuch Peickwitz

Eine mit Fritzi Pauley bestockte Agrarholzfläche wurde über eine Vegetationsperiode hinweg beobachtet und vermessen. Es erfolgten phänologische Aufnahmen um die Länge der Vegetationsperiode zu bestimmen und Bestimmungen des Biomassezuwachses durch Messung der Brusthöhendurchmesser (BHD). Die Ergebnisse werden nachfolgend vorgestellt.

4.4.1 Phänologische Aufnahmen

Die phänologischen Aufnahmen wurden durchgeführt, um einen eventuellen Zusammenhang zwischen dem Gewässerabstand und der Länge der Vegetationsperiode festzustellen. Hierfür wurden der Austriebsbeginn und der Blattfall baumindividuell aufgenommen. Die Aufnahmen erfolgten innerhalb der vollaufgenommenen Untersuchungsfläche (Plot) sowie östlich und westlich des Plots im Restbestand der Agrarholzfläche.

In den Abbildungen 30 und 31 werden die prozentualen Anteile der jeweiligen Austriebsphase (P1 – P5) nach Bestandesreihen (1, 3, 5, 7, 9) geordnet über den Zeitverlauf dargestellt. Eine bebilderte Beschreibung der Austriebsphasen findet sich im Appendix (Anhang 1).

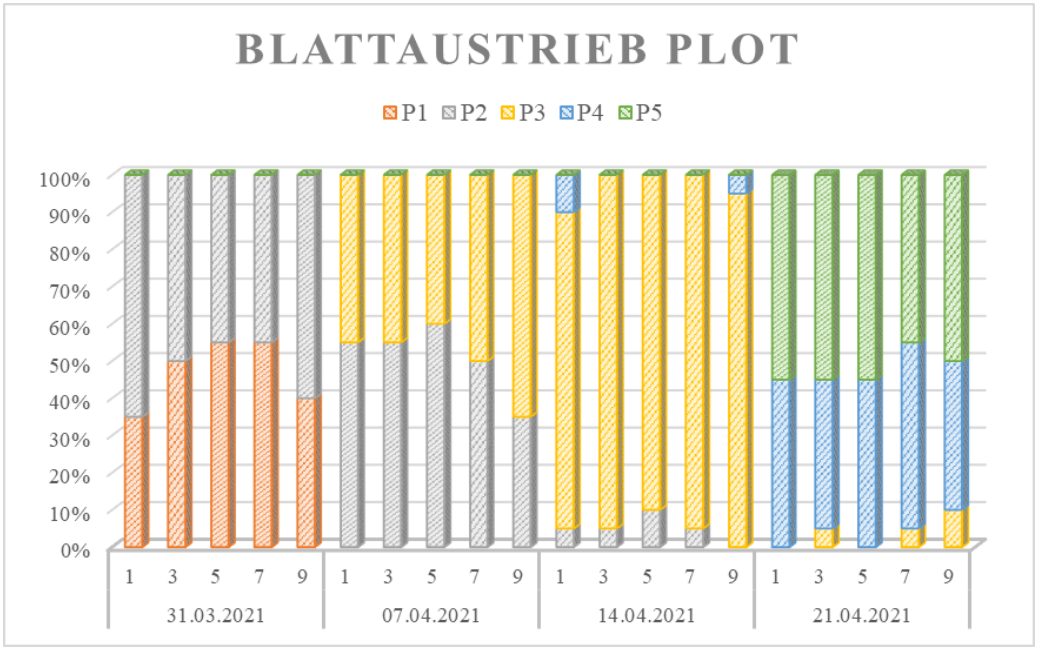

Abb. 30: Anteil der Austriebsphasen im Zeitverlauf innerhalb des Plots

Betrachtet man die Abbildungen 30 und 31 zum Blattaustrieb wird ersteinmal deutlich, dass kein Unterschied in der Entwicklung innerhalb des Plots und des Restbestandes festzustellen ist.

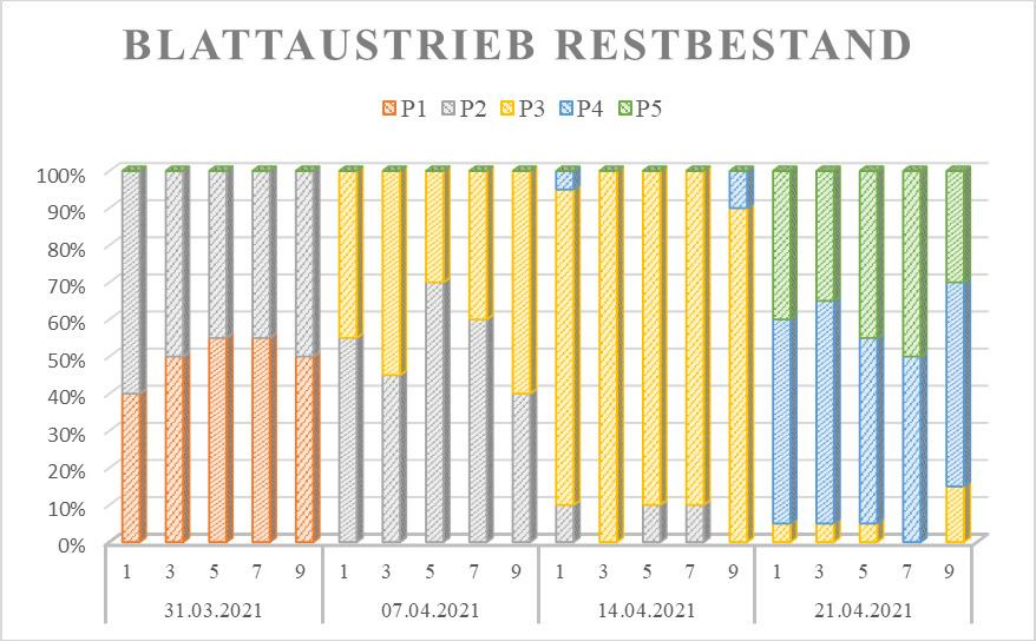

Abb. 31: Anteil der Austriebsphasen im Zeitverlauf innerhalb des Restbestandes

Der Austrieb ist am 31.03.2021 in Reihe 1 sowohl im Plot als auch im Restbestand am weitesten fortgeschritten. Die ackerseitige Reihe 9 ist allerdings nur geringfügig schlechter entwickelt. Am nächsten Aufnahmetermin (07.04.2021) liegt Reihe 9 in der Entwicklung vorne, Reihe 1 ist nur noch auf dem Niveau der Reihen im Bestandesinneren. Bei der folgenden Austriebsbonitur am 14.04.2021 konnte festgestellt werden, dass in den Reihen 1 und 9 die ersten Individuen Knospen in Phase 4 aufweisen. Ansonsten zeigten sich keine eindeutigen Unterschiede mehr zwischen den Bestandesteilen. Der Bestand tritt homogen in die Vegetationsperiode ein. Der Austriebsbeginn für den Gesamtbestand konnte auf den 21.04.2021 terminiert werden, da sich über 50 % der Individuen vollständig in der Entwicklungsphase >P4 befanden.

Um die Länge der Vegetationsperiode für einzelne Bestandesteile festzustellen wurde die Entwicklung des Blattfalls ebenfalls baumindividuell erfasst. Die im Plot und im Restbestand untersuchten Individuen entsprachen den Bäumen aus dem Frühjahr. Abbildung 32 zeigt die zeitliche Entwicklung des Blattfalles innerhalb des Plots.

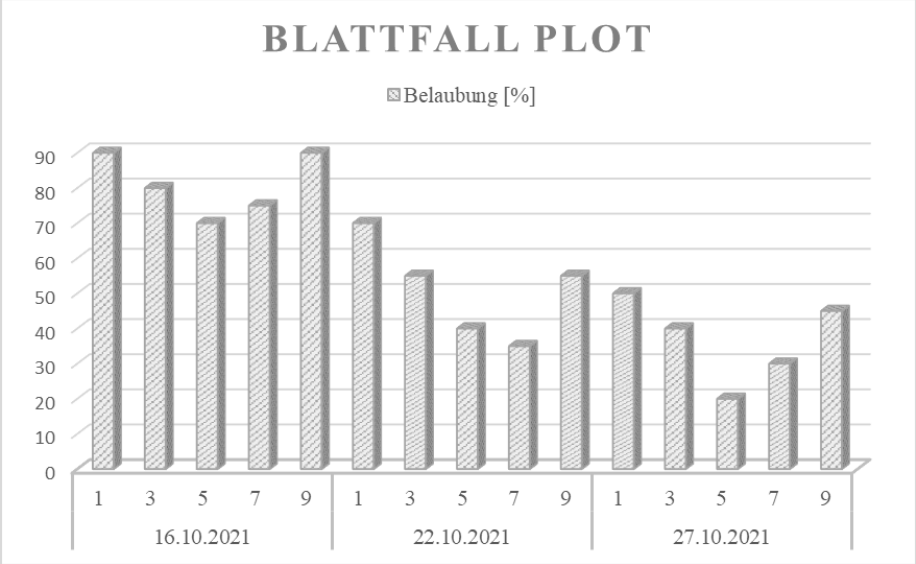

Abb. 32: Zeitliche Entwicklung des Blattfall innerhalb des Plots

Abbildung 33 veranschaulicht das Fortschreiten des Blattfalles im Restbestand. Die kritische Schwelle für den Eintritt in die Vegetationsruhe (Ende der Vegetationsperiode) wurde mit ≤ 50 % Belaubung definiert. Die Ergebnisse zeigten bestandesübergreifend die gleiche Tendenz. Die Bäume in den Randreihen 1 (Gewässerseite) und 9 (Ackerseite) verloren ihr Laub am langsamsten.

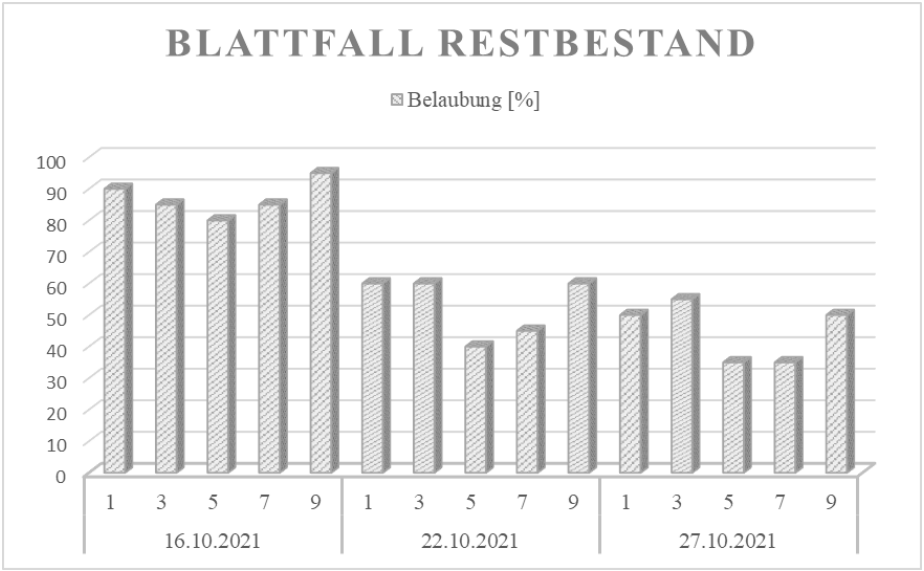

Abb. 33: Zeitliche Entwicklung des Blattfalls innerhalb des Restbestandes

Das Ende der Vegetationsperiode konnte für die Individuen in den Randreihen erst am 27.10.2021 festgestellt werden. Die Reihen 5 und 7 im Bestandesinneren fielen in beiden Gruppen schon am 22.10.2021 unter die 50 % Schwelle. Das Ende der Vegetationsperiode wurde für die inneren Bestandesteile auf den 22.10.2021 terminiert. Die Reihe 3 auf der Gewässerseite verhielt sich differenziert. Abweichend von der vergleichbaren Reihe 7 auf der Ackerseite, verlieren die Individuen der Reihe 3 ebenfalls langsam ihr Laub. Ein Extremfall ist hier der Baum W4 (Reihe 3). Als einziger untersuchter Baum wies W4 am 27.10.2021 noch >50 % Belaubung auf. Das Ende der Vegetationsperiode für W4 konnte erst am 02.11.2021 festgestellt werden. Ein Sturmereignis am 21./22.10.2021 führte zu rapidem Blattverlust in allen Bestandesteilen. Leider fiel im Zuge dieses Sturmereignisses der Untersuchungsbaum W5 (Reihe 1) im westlichen Teil des Restbestandes durch Stockbruch aus und konnte nicht mehr in die Aufnahmen vom 22.10. und 27.10.2021 einbezogen werden.

Die Individuen in den Acker- sowie Gewässerrandbereichen des Bestandes beginnen zwar etwas früher mit dem Austrieb, die für die Bonitur ausschlaggebende Phase P4 erreichen aber alle Bestandesteile zum gleichen Zeitpunkt (21.04.2021). Das Ende der Vegetationsperiode erreichen die Bäume im Bestandesinneren insgesamt etwa fünf Tage früher als in den Randbereichen. Die Länge der Vegetationsperiode variiert folglich nur marginal und beträgt für die untersuchten Bestandesmitglieder zwischen 184 (Reihe 5 und 7) und 195 Tage (W4, Reihe 3).

4.4.2 Biomasseproduktion und Wachstumsparameter

Um den Biomassezuwachs der einzelnen Baumindividuen zu observieren, erfolgte im Herbst des Jahres 2020 sowie 2021 eine Kreuzkluppung des gesamten Untersuchungsplots. Die Werte wurden reihenweise zusammengefasst und der Durchschnitt berechnet. In Abbildung 34 sind die Brusthöhendurchmesser am Ende der Vegetationsperiode 2020 dargestellt. Der durchschnittliche Brusthöhendurchmesser aller untersuchten Individuen zum Ende der Vegetationsperiode 2020 betrug 11,65 cm. Betrachtet man die Verteilung der unterschiedlichen Durchmesserklassen im Jahr 2020 fällt auf, dass die Individuen am Gewässer- sowie am Ackerrand höhere Durchmesser aufweisen. Die Reihen 2 und 9 sind besonders durchmesserstark, die Reihe 1 liegt nur geringfügig über dem Niveau des Bestandesinneren.

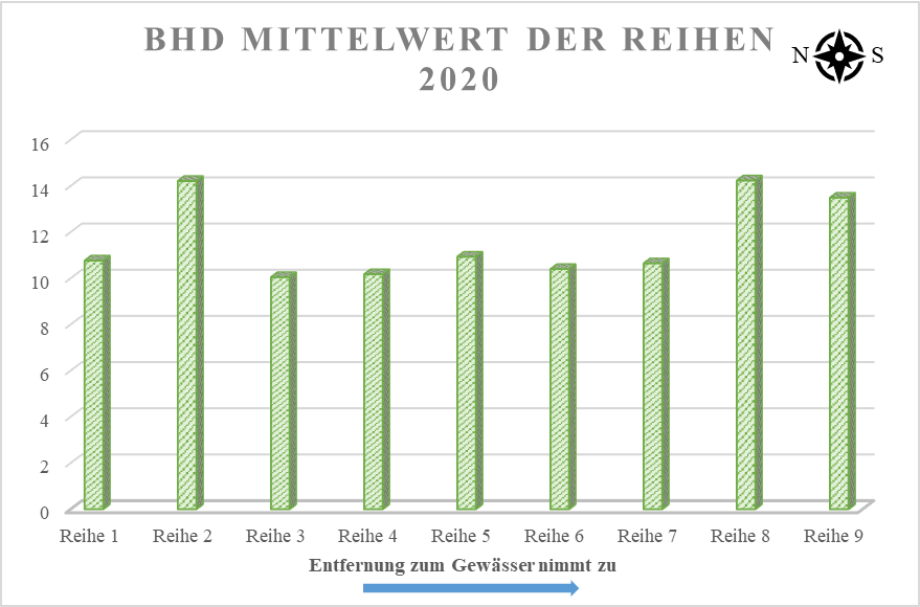

Abb. 34: BHD-Mittelwert der Reihen 2020

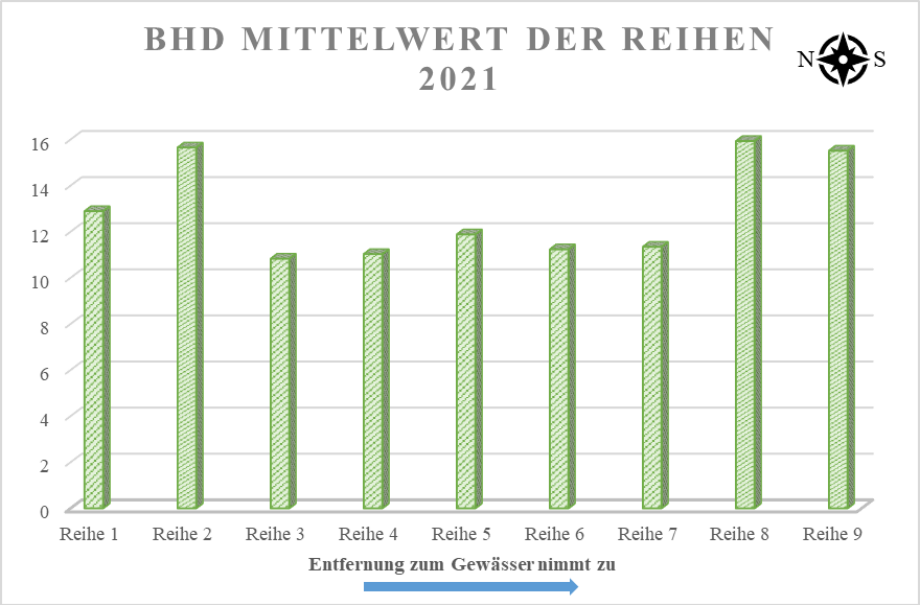

Abb. 35: BHD-Mittelwert der Reihen 2021

Die durchschnittlichen Brusthöhendurchmesser der Bestandesreihen am Ende der Vegetationsperiode 2021 sind in Abbildung 35 ersichtlich. Der mittlere BHD aller Individuen des Plots betrug 12,92 cm. Der durchschnittliche Zuwachs an Brusthöhendurchmesser aller untersuchten Individuen betrug 1,27 cm. Interessant sind die Unterschiede zwischen den Reihen. Erwartungsgemäß zeigten die Individuen in den Randbereichen der Untersuchungsfläche die größten Zuwächse, wie in Tabelle 2 ablesbar. Die Differenz in den Dimensionen zwischen Bestandesrand und

Bestandesinnerem wurde entsprechend vergrößert. Überraschend war, dass die Individuen der Reihe 1 die größten Zuwächse der Vegetationsperiode 2021 aufwiesen. Die Reihe 1 konnte hierdurch zu den anderen Randreihen aufschließen und sich deutlich von den Reihen im Inneren des Plots absetzen.

Tab. 2: BHD-Zuwachs der Reihen

Reihe	Ø BHD-Zuwachs (2020-2021)
1	2,13cm
2	1,44cm
3	0,78cm
4	1,06cm
5	0,95cm
6	0,84cm
7	0,70cm
8	1,70cm
9	2,03cm

5. Diskussion

Nachdem im vorherigen Kapitel die Ergebnisse aus den Versuchen präsentiert wurden, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse mit den anfangs aufgestellten Hypothesen verglichen und kritisch diskutiert.

Die den genetischen Faktor Sorte betreffenden Hypothesen, können alle positiv beantwortet werden. Es liegt ein statistisch signifikanter Einfluss des Genotyps auf alle im Gewächshausversuch untersuchten Parameter vor. Der Genotyp spielt bei der Frühentwicklung von Pappeln für den Kurzumtrieb folglich eine herausragende Rolle. Dies bestätigt die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen am Institut für Forstbotanik der Technischen Universität Dresden (FUCHS, 2016; GROSCHKE, 2017; KRABEL et al., 2015, 2018; MÜLLER, 2013; REICHE, 2015; SCHUSTER, 2017; WEIGAND, 2016) sowie die Ergebnisse internationaler Forschung (GUO et al., 2010; MONCLUS et al., 2005; PALLARDY & KOZLOWSKI, 1979; ROBINSON & RAFFA, 1998; ZALESNY et al., 2005; ZALESNY & ZALESNY, 2009). In einem Großteil dieser Untersuchungen wurde die Wasserfügbarkeit als zweiter wesentlicher Faktor für das frühe Wachstum von Pappelklonen identifiziert. Dieser Erkenntnis kann aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zugestimmt werden, gleichwohl ein signifikanter Einfluss der Bewässerungsvariante nur teilweise nachgewiesen werden konnte. Es gilt jedoch zu beachten, dass vorausgegangene Untersuchungen sich überwiegend mit der Reaktion von Pappelsteckhölzern auf Wasserverfügbarkeit im Sinne von Wassermangel (Trockenstress) beschäftigen. Die vorliegende Arbeit untersucht den Einfluss von Wasserverfügbarkeit auf das frühe Wurzel- und Sprosswachstum bei Pappelsteckhölzern im Sinne eines Überangebots (Staunässe).

Die Ergebnisse des Feldversuchs geben erste Anhaltspunkte für das Verhalten von Pappelklonen in Gewässerrandbereichen. Die Gewässernähe wirkt sich positiv auf den Biomassezuwachs der Pappeln aus. Dies entspricht dem erwarteten Verhalten, da alle Pappelarten, aber insbesondere die in Kurzumtriebsplantagen verwendeten Hochleistungsklone, hohe Zuwächse mit hohem Wasserverbrauch erkaufen (PETZOLD et al., 2009; PETZOLD, 2013; SCHILDBACH et al., 2009). Die Unterschiede in der Länge der Vegetationsperiode sind marginal und lassen sich nicht eindeutig mit der Entfernung zum Gewässer in Verbindung bringen.

5.1 Material und Methodik

Der folgende Abschnitt setzt sich kritisch mit dem verwendeten Material, der angewandten Methodik sowie den methodischen Unsicherheiten auseinander. Des Weiteren wird auf Limitationen der Forschung hingewiesen.

5.1.1 Gewächshausversuch

Das Alter der Mutterpflanzen, die Position sowie der Zeitpunkt der Steckholzentnahme mussten bei der vorliegenden Untersuchung unbeachtet bleiben, da keiner dieser Parameter bekannt war. Der Erfolg der Vermehrung mittels Steckhölzern sowie deren Entwicklungsgeschwindigkeit werden allerdings maßgeblich von den verwendeten Mutterpflanzen (MAC CÁRTHAIGH & SPETHMANN, 2000; MOE & ANDERSEN, 1988; SPETHMANN, 1990), dem Alter des verwendeten Triebes (BÄRTELS, 2008) sowie dem Zeitpunkt der Triebernte bestimmt (ZALESNY & WIESE, 2006). Einen Effekt der ursprünglichen Position am Mutterbaum des im Nachgang geschnittenen Steckholzes auf die Wurzel- und Sprossentwicklung beschreiben YING & BAGLEY (1977) und ZALESNY JR. et al. (2003). SCHROEDER & WALKER (1991) quantifizieren den Effekt gar und geben an, dass Steckhölzer aus basalen Teilen der Mutterpflanze einen Bewurzelungs- sowie Sprosswachstumsvorteil von etwa 10 % gegenüber Steckhölzern aus wipfelträchtigen Bereichen haben.

In den Versuchsjahren 2020 und 2021 wurden bei einigen Max3-Steckhölzern schon vor Beginn des Steckvorgangs Knospenaustriebe verzeichnet. Ursächlich ist wahrscheinlich eine Überschreitung der laut BÄRTELS (1996) optimalen Lagertemperatur für Pflanzenteile und Saatgut von 0-1 ˚C. Ein Teil dieser Knospen wurde wiederum während des Steckvorgangs beschädigt oder versehentlich entfernt. Der Verlust dieser Knospen wirkt sich negativ auf die weitere Entwicklung des Steckholzes aus, da die für den Knospenaustrieb aufgewendeten Ressourcen verloren gehen (WIESE et al., 2006). Eine Aufnahme der beim Steckvorgang vorhandenen, beschädigten oder entfernten Knospen erfolgte nicht.

Da das Gewächshaus im „VLO Hetzdorf“ keine automatische Temperatur- und Strahlungsregulierung besitzt, sind die Wachstumsbedingungen noch stark von Umwelteinflüssen geprägt. Dies gilt es bei einem Vergleich der Max3-Versuchsjahre

2020 und 2021 zu beachten. Während die Durchschnittstemperatur des Versuchszeitraumes im Jahr 2020 18,85 ˚C betrug, war es im Jahr 2021 mit einer Durchschnittstemperatur von 19,48 ˚C etwas wärmer. Die Bewässerung der Normal-Variante erfolgte standardisiert und automatisch, die Überflutungsvarianten „1/3“ und „2/3“ wurden manuell bewässert. Das Widerauffüllen der Pflanzbehälter bis zur entsprechenden Markierung erfolgte in sich ändernden Zeitabständen. Eine zumindest anteilige Überflutung war immer gegeben, ein geringer Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse ist jedoch nicht auszuschließen.

Außerdem erwähnenswert ist der Verlust an Feinwurzelmasse im Zuge der Ernte. Um den Verlust möglichst gering zu halten, wurden die Pappeln nicht aus den Pflanztöpfen herausgezogen, sondern der Pflanztopf der Länge nach aufgeschnitten und die Pflanze samt Substrat entnommen. Das bewurzelte Steckholz wurde anschließend im Labor unter Zuhilfenahme von Wasser, Pinsel und Pinzette über einem Sieb von noch anhaftendem Substrat befreit. Trotz des gründlichen Vorgehens muss von teils erheblichen Verlusten an Feinwurzelmasse ausgegangen werden. Diese Problematik ist in Wissenschaftskreisen bekannt und wird z. B. von DICKMANN & PREGITZER (1992) beschrieben. Grundsätzlich kann das methodische Vorgehen bei der Anlage, der Betreuung und schließlich der Beerntung des Gewächshausversuches als vielfach erprobt und bewährt bezeichnet werden (vgl. KRABEL et al., 2015, 2018, 2021; MEYER et al., 2015, 2019).

5.1.2 Feldversuch

In Baumbeständen kommt es zu inter- und intraspezifischer Konkurrenz (PRETZSCH, 2019). Da es sich bei der Untersuchungsfläche um einen Reinbestand handelt, ist fast ausschließlich mit intraspezifischer Konkurrenz zu rechnen. Neben den üblichen Konkurrenzeffekten in Beständen kommt es durch die Ausrichtung der Untersuchungsfläche zu großen Unterschieden in der Strahlungsverfügbarkeit. Pappeln sind Lichtbaumarten und gerade die für den Agrarholzanbau genutzten Hochleistungsklone erfordern für eine optimale Photosyntheseleistung ein hohes Strahlungsangebot (SCHILDBACH et al., 2009; PETZOLD, 2013). Für den nach Süden ausgerichteten, ackerseitigen Bestandesteil ist lediglich von einem marginalen Verlust an Strahlung durch die angrenzende annuelle Kultur auszugehen. Die nach Norden ausgerichteten, gewässernahen Bestandesreihen werden jedoch dauerhaft vom Restbestand beschattet. Der Strahlungsgenuss dürfte hierdurch deutlich vermindert sein.

Andererseits sind auch positive Einflüsse wie eine Abschirmung vor zu großer Sonnenhitze (Beschattung) oder eine gesteigerte Humusbildung nicht auszuschließen (CLINCH et al., 2009; VANDERMEER, 1989). Sowohl die Konkurrenz- als auch die Facilitations- (Förderungs-)effekte wurden in der vorliegenden Untersuchung nicht quantifiziert und entsprechend auch nicht in die Auswertung der Ergebnisse einbezogen.

Um den Austriebszeitpunkt zu terminieren, erfolgte die Einteilung in Austriebsphasen. Diese Einteilung erfolgte mittels Fernglas vom Erdboden aus. Gerade für Pappeln im Bestandesinneren war es z.T. schwierig, alle Kronenteile in Anblick zu bekommen und einzelne Zweige einwandfrei einem Individuum zuzuordnen. Die Einteilung in Austriebsphasen sowie die prozentuale Schätzung des Laubfalls müssen als eher subjektiv anzusprechende Parameter beschrieben werden. Dennoch ist hier von hoher Genauigkeit auszugehen, da die Messungen nur durch eine Person erfolgten. Eine gesteigerte Ungenauigkeit durch verschiedene messende Personen und eine jeweils individuelle Auslegung der Austriebsphasen konnte dadurch vermieden werden. Ein Baum des westlichen Restbestandes (W5) erlitt während eines Sturmereignisses am 21./22.10.2021 einen Stockbruch und konnte nicht mehr in die Aufnahmen des Blattfalls am 22.10. und 27.10.2021 einbezogen werden. Die Stichprobe der Reihe 1 des Restbestandes wurde hierdurch kleiner und das Ergebnis verfälscht.

Der Brusthöhendurchmesser aller Baumindividuen der Untersuchungsfläche wurde am Ende der Vegetationsperiode 2020 und 2021 mittels Kreuzkluppung bestimmt und hieraus die Zuwachsentwicklung der einzelnen Bestandesteile abgeleitet. Messungen des Brusthöhendurchmessers können als alleiniger Parameter aber lediglich einen Anhaltspunkt für den Zuwachs an Biomasse liefern (RÖHLE et al., 2009). Durch störende Äste, Begleitvegetation oder Mangel an Geradschaftigkeit können große Messungenauigkeiten auftreten. FUCHS & KENNEL (1994) sprechen für Bestände im Hochwald von Messabweichungen von bis zu 4 cm. Ferner standen die Daten der Hygrometer (Bodenfeuchte-Sonden) nicht termingerecht zur Verfügung. Hierdurch konnte lediglich mit der Annahme gearbeitet werden, dass gewässernahe Bestandesteile verbesserten Zugang zu Wasserressourcen besitzen.

5.2 Gewächshausversuch: Einfluss der Bewässerungsvariante

Die Sorte Fritzi Pauley verhält sich weitestgehend kongruent über alle untersuchten Parameter hinweg. Die Varianten mit simuliert hoch anstehendem Grundwasser („1/3“, „2/3“) liegen auf ähnlichem Niveau, die automatisch bewässerte „normal“-Variante fällt dahinter zurück. Die Sorte Max3 muss je nach Versuchsjahr und untersuchtem Merkmal differenziert betrachtet werden. In der Folge werden die Hypothesen H1, H2, H3 und H4 einzeln beantwortet.

Die Bewässerungsvariante hat in keinem Versuch bzw. keiner Versuchskombination einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der Triebmasse. Die Hypothese H1 ist folglich negativ zu beantworten.

Dies steht den Versuchsergebnissen von MÜLLER (2013) entgegen, die einen signifikanten Einfluss der Bewässerung auf das oberirdische Wachstum von Pappelsteckhölzern ausweist. Auch MONCLUS et al. (2006), GUO et al. (2010) und LÜTTSCHWAGER et al. (2016) beschreiben negative Auswirkungen auf das Sprosswachstum von Pappelsteckhölzern bei Wasserdefizit. Durch den Versuchsaufbau der vorliegenden Arbeit ist allerdings zu keinem Zeitpunkt der Untersuchung von regelrechtem Wassermangel auszugehen. Der angestrebte Erkenntnisgewinn bezieht sich auf den Einfluss eines Überangebots von Wasser (hoch anstehendes Grundwasser). GLENZ et al. (2006) und KREUZWIESER & RENNENBERG (2014) bescheinigen der Gattung *Populus* eine überdurchschnittliche, einigen Arten (z.B. *Populus nigra*) sogar eine sehr gute Überflutungstoleranz. GUO et al. (2011) beschreibt signifikante Auswirkungen der Überflutungsbehandlung auf die relative Wachstumsrate von neun seiner dreizehn untersuchten Pappelklone.

Auch wenn die Hypothese H1 aufgrund mangelnder Signifikanz abgelehnt werden musste, zeigten sich auch in der vorliegenden Untersuchung Wuchsunterschiede je nach Bewässerungsvariante. Max3 im Versuchsjahr 2020 sowie Fritzi Pauley im Versuchsjahr 2021 bringen in den Staunässe-Varianten „1/3“ und „2/3“ höhere Triebmassen als in der lediglich gut bewässerten „normal“-Variante hervor. Dies widerspricht den Untersuchungen von DU et al. (2008), HARRINGTON (1987), GONG et al. (2007) und YU et al. (2015) die jeweils einen negativen Einfluss der 20 Tage (HARRINGTON, 1987), 37 Tage (GONG et al., 2007), 45 Tage (DU et al., 2008) und 50 Tage (YU et al., 2015)

andauernden Überflutung auf den oberirdischen Biomassezuwachs von juvenilen Pappeln nachweisen konnten. Im Versuchsjahr 2021 liegt die „normal“-Variante der Max3-Klone deutlich vor den Überflutungsvarianten gleichen Jahres, Max3 verhält sich also antagonistisch zum Vorjahr. Dies ist ein Hinweis auf den Einfluss des Untersuchungsjahres. Zwischen der Triebtrockenmasse der untersuchten Fritzi Pauley Pappeln (30 Individuen) und der Bewässerungsvariante besteht keine statistisch nachweisbare Abhängigkeit (p-Wert = 0,3396). Auch für das Jahr 2021 ergibt sich sortenübergreifend (60 Individuen) keine Abhängigkeit der Triebtrockenmasse von der Bewässerungsvariante (p-Wert = 0,3057). Eine Verdopplung der Grundgesamtheit für das Versuchsjahr 2021 führt also lediglich zu einer geringen Steigerung der Signifikanz. Die Betrachtung des mehrjährigen Versuchs der Sorte Max3, zeigt ein anderes Bild. Die Erhöhung der Stichprobe auf 90 Individuen und die Kombination zweier Versuchsjahre (2020 + 2021) führt lediglich zu einer geringfügigen Überschreitung der Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (p-Wert = 0,0549). Hieraus lässt sich ein starker Einfluss des Untersuchungsjahres und den damit einhergehenden veränderten Witterungsbedingungen ableiten.

Die Hypothese H2 ist nicht eindeutig zu beantworten. Die ausgebildete Blatttrockenmasse steht in nur einem Fall (Max3: 2020 + 2021) in statistisch signifikanter Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante. Für die Blattfläche konnte keine statistisch signifikante Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante nachgewiesen werden.

Die im Versuchsjahr 2021 ausgebildete Blatttrockenmasse oder Blattfläche zeigt für die Sorte Fritzi Pauley, sowie sortenübergreifend keine signifikante Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante. Vor allem die Sorte Fritzi Pauley reagiert nur minimal auf eine veränderte Bewässerungssituation. GONG et al. (2007) kommen in ihrer Arbeit zu den Effekten von Überflutung auf verschiedene Pappel-Klone in Nord-China zu widerstreitenden Ergebnissen. Es reduzierten alle 14 Hybride (*Populus trichocarpa x P. deltoides, P. deltoides x P. nigra* und *P. nigra x P. maximowiczii*) als Reaktion auf die Überschwemmung einerseits die Etablierung neuer Blätter, andererseits das Wachstum bereits vorhandener junger Blätter. Übereinstimmende Untersuchungsergebnisse finden sich auch bei SMIT et al. (1989). Sie beobachteten eine gehemmte Blattexpansion durch Abnahme der Zelldehnbarkeit der Zellwände als Folge von Überflutung der untersuchten *Populus spec*. Sämlinge.

Eine bekannte Reaktion auf geringere Wasserverfügbarkeit ist die Verringerung von Blattfläche (BLAKE & TSCHAPLINSKI, 1992). Dies wird durch einen vergleichenden Blick auf die Max3-Versuchsjahre 2020 und 2021 bestätigt. Die „normal“-Variante bringt im strahlungsintensiveren Jahr 2020 deutlich weniger Blattmasse und -fläche hervor. Im strahlungsärmeren Jahr 2021 liegt sie jedoch vor den manuell bewässerten Feuchtvarianten, die weit hinter den Vorjahresergebnissen zurückbleiben. Dieser Einfluss der Bewässerungsvariante zeigt sich auch in einer Unterschreitung der 5 %-Irrtumswahrscheinlichkeit (p-Wert = 0,0416). Das Blattwachstum von Pflanzen ist stark strahlungsabhängig (HINCKLEY et al., 1992). Aus den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit könnte abgeleitet werden, dass ein negativer Einfluss des hoch anstehenden Wassers auf das Blattwachstum besteht, wenn das verfügbare Wasser durch verringerte Strahlungsverfügbarkeit nicht genutzt werden kann. Diese Annahme stünde in Übereinstimmung mit den Untersuchungsergebnissen von KOZLOWSKI (1997) und ROOD et al. (2010) die eine Reduktion der Blattanzahl, Blattfläche sowie Photosyntheseleistung bei länger andauernder Überschwemmung beschreiben.

Der Hypothese H3 kann grundsätzlich zugestimmt werden. Ein Überangebot an Wasser führt in allen Teilversuchen zur Ausbildung einer geringeren Wurzelmasse. Einschränkend muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass eine signifikante Abhängigkeit der Wurzeltrockenmasse von der Bewässerungsvariante nur im Falle der Sorte Max3 und in Kombination der Versuchsjahre 2020 und 2021 nachgewiesen werden konnte.

Im Versuchsjahr 2021 verhalten sich beide Sorten erwartungsgemäß und produzieren mit zunehmender Wasserverfügbarkeit weniger Wurzelmasse, wobei Fritzi Pauley das in dieser Untersuchung häufiger beobachtete Verhalten bestätigt und plastischer reagiert, also eine geringere Varianz zwischen den Bewässerungsgruppen aufweist. Dies bestätigt einerseits die Ergebnisse von HALLGREN (1989), da er ein stark reduziertes Wurzelwachstum bei Pappel-Klonen auf überfluteten Böden feststellte. Andererseits gelangt er in seiner Untersuchung zu dem Schluss, dass *Tacamahaca x Aigeiros* Kreuzungshybriden (z.B. Max3) eine höhere Resistenz gegen Staunässe aufweisen als reine *Tacamahaca*-Hybride (z.B. Fritzi Pauley). In der vorliegenden Arbeit konnte jedoch das gegenteilige Verhalten beobachtet werden.

MC CARTHY et al. (2018) untersuchten u.a. den Klon Max5, eine Fortzüchtung des hier verwendeten Klons Max3. Es konnten Wechselwirkungen zwischen der Bodenfeuchte und der Wurzeltrockenmasse festgestellt werden, wobei sich die von Max5 gebildete Wurzeltrockenmasse im wassergesättigten Boden im Vergleich zum (nur) feuchten Boden um 50% verringerte. DU et al. (2012) und PENG et al. (2017) untersuchten jeweils einen überflutungstoleranten, sowie einen sensibleren Pappelklon und bestätigten übereinstimmend das vorliegende Ergebnis, da beide Klone mit einer Reduktion der Wurzelbiomasse auf ein Überangebot von Wasser reagierten.

Die Hypothese H4 ging davon aus, dass eine geringe Wasserverfügbarkeit zur Ausbildung größerer Wurzellängen führt, um eventuell verfügbares Wasser in tieferen Bereichen zu erschließen. Diese Annahme muss für die Sorte Fritzi Pauley negativ und für die Sorte Max3 positiv beantwortet werden. Weiterhin steht die längste gebildete Wurzel der Max3 Klone in statistisch signifikanter Abhängigkeit von der Bewässerungsvariante.

Das Verhalten der Sorte Max3 bestätigt die Aussagen von LARCHER (2001), der ein erhöhtes Wurzellängenwachstum bei leichtem Trockenstress beschreibt. Es widerspricht jedoch den Erkenntnissen der Versuchsjahre 2012 und 2018, die KRABEL et al. (2018) in der Veröffentlichung „Topfversuche mit drei Pappelstandardsorten - Möglichkeiten und Herausforderungen“ zusammenfassen. Die untersuchten Sorten (u.a. Max3) zeigten konträres Verhalten und reagieren auf geringere Wasserverfügbarkeit mit einer verringerten maximalen Wurzellänge. MC CARTHY et al. (2018) konnten wiederum gar keinen Zusammenhang zwischen der Gesamtwurzellänge, der mittleren Wurzellänge und einer veränderten Wasserverfügbarkeit im Boden feststellen.

5.3 Gewächshausversuch: Einfluss der Sortenwahl

Im folgenden Abschnitt werden die den genetischen Faktor Sorte betreffenden Hypothesen H5, H6, H7 und H8 beantwortet. Die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit finden übereinstimmend Bestätigung in allen im Zuge der Literaturrecherche gesichteten Veröffentlichungen. Aufgrund dessen wird der Einfluss des genetischen Faktors Sorte in der Folge nicht so ausführlich diskutiert, wie dies für den Einfluss der Bewässerungsvariante geschehen ist.

Die Hypothese H5 nimmt an, dass der genetische Faktor Sorte einen Einfluss auf die Ausbildung von Triebmasse hat. In der vorliegenden Untersuchung bildete die Sorte Max3 durchschnittlich 31 % mehr Triebmasse aus als die Sorte Fritzi Pauley. Unter Zuhilfenahme einer Varianzanalyse wurde die statistische Signifikanz ($p \leq 0,05$) des Einflusses des Faktors Sorte überprüft und konnte bestätigt werden. Die Hypothese H5 kann demnach anhand der Untersuchungsergebnisse bestätigt werden. KOZLOWSKI & PALLARDY (1979) untersuchten vier Pappelklone unterschiedlicher Wachstumsrate und konnten einen Einfluss des Genotyps auf die Ausbildung von Triebmasse nachweisen. Auch DU et al. (2012) bestätigen den Einfluss des Genotyps auf die Triebmasse in ihrem Versuch mit zwei Pappelklonen unterschiedlicher Überflutungstoleranz. Die Untersuchungen von RODRIGUÉZ et al. (2021) kamen ebenfalls zu übereinstimmenden Ergebnissen, wobei sogar eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $p = 0,001$ angelegt wurde.

Der genetische Faktor Sorte hat einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der Blattfläche und -masse. Die Hypothese H6 ist demnach positiv zu beantworten. Der Einfluss wird durch die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung sehr deutlich. Die von den Max3-Klonen durchschnittlich ausgebildeten 2.505,55 cm² Blattfläche stehen lediglich 1.238,82 cm² der Sorte Fritzi Pauley gegenüber. Die Blattmassen der Sorten differieren zwar nicht ganz so stark, der Unterschied zwischen den Sorten ist aber immer noch beträchtlich. Die Sorte Fritzi Pauley entwickelt 65 % der Blattmasse des Max3-Äquivalents. Dies deckt sich mit den Untersuchungsergebnissen von KRABEL et al. (2018), deren Untersuchung einen signifikanten Einfluss der Sortenwahl auf die Ausbildung von Blatttrockenmasse ausweist. Weitere Bestätigung findet sich erneut bei RODRIGUÉZ et al. (2021), die signifikante genotypische Unterschiede für die Parameter „Blattanzahl“ und „Blattfläche“ nachweisen konnten.

Die Hypothese H7 sagt aus, dass der genetische Faktor Sorte einen Einfluss auf die Wurzellänge hat. Die Individuen der Sorte Max3 brachten Wurzeln mit einer durchschnittlichen Länge von 32,36 cm hervor. Die von den Individuen der Sorte Fritzi Pauley entwickelten Wurzeln hatten eine durchschnittliche Länge von 20,19 cm. Dieser in den Messergebnissen deutliche werdende Einfluss kann, durch eine Varianzanalyse abgesichert, als statistisch signifikant bezeichnet werden. MC CARTHY et al. (2018) untersuchten sieben *P. deltoides* x *P. nigra* Klone, sowie einen *P. deltoides* und einen *P. nigra x P. maximowiczii* (Max5) Klon. In ihren Untersuchungen war der Genotyp zwar

eine statistisch signifikante, aber schwache Quelle der Variation für die Gesamt- und die mittlere Wurzellänge. Signifikante Unterschiede in der Gesamtwurzellänge und der Trockenmasse der Wurzeln zwischen den zehn untersuchten Pappelklonen beschreiben auch McIVOR et al. (2014). In den Ergebnissen eines Gewächshaus- und Boden-Säulen-Versuchs mit sieben Hybridpappel-Klonen (u.a. Max3) von KRABEL et al. (2015) findet sich weitere Bestätigung für den Einfluss des Genotyps auf die Wurzellänge.

Die Hypothese H8 kann ebenfalls bestätigt werden, da der genetische Faktor Sorte einen Einfluss auf die in der Untersuchung gemessenen Wurzelmassen hatte. Dieser Einfluss konnte statistisch validiert werden. Die durchschnittlich ausgebildete Wurzelmasse der Sorte Max3 lag mit 0,323 g knapp 30 % über dem Mittelwert des Fritzi Pauley-Äquivalents (0,231 g). Die genetische Variation in der Bewurzelungsfähigkeit verschiedener Pappelklone beschreiben schon YING & BAGLEY (1977). In den Untersuchungen von KRABEL et al. (2021) war der Faktor Klon statistisch lediglich für den prozentualen Anteil der Wurzelbiomasse an der Gesamtmasse der Pflanze signifikant. ZALESNY & WIESE (2005) fanden eine breite genotypische Variation für die Anzahl der ausgebildeten Wurzeln und des Wurzelgewichts. MC CARTHY et al. (2018) und McIVOR et al. (2014) kamen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass eine statistische Abhängigkeit zwischen der Trockenmasse der Wurzeln und dem verwendeten Klon besteht.

Ergänzend zur individuellen Betrachtung der Wurzel- und Triebmasse kann es hilfreich sein, beide Parameter ins Verhältnis zu setzen, da das Wurzel-Spross-Verhältnis wichtige Aussagen über die Ressourcenallokation und Anpassungsfähigkeit von Pflanzen zulässt (MONK, 1966). STIMM et al. (2013) beschreiben eine harmonisch ausbalancierte, funktionale Beziehung zwischen Wurzel und Spross als elementar für ein optimales Pflanzenwachstum.

Die Sorte Max3 weist zwar in den „normal“-Varianten der Versuchsjahre 2020 und 2021 sehr geringe Wurzel-Spross-Verhältnisse auf, reagiert jedoch mit deutlichem Anstieg des Faktors auf das simulierte hoch anstehende Grundwasser. Dies widerspricht den Untersuchungen von LÜTTSCHWAGER et al. (2015), welcher ein erhöhtes Wurzelwachstum von Max2-Klonen bei gesteigerter Wasserversorgung nachweisen konnte. Es bestätigt allerdings die Untersuchungsergebnisse von GROSCHKE (2017), der ein kleineres Wurzel-Spross-Verhältnis bei verminderter Wasserverfügbarkeit für die

Sorte Max3 angibt. Die Individuen der Sorte Fritzi Pauley erweisen sich erneut als plastischer und reagieren weniger stark auf die veränderte Bewässerungssituation. Der Blick auf das Wurzel-Spross-Verhältnis bestätigt demnach die im Vorfeld diskutierten Untersuchungsergebnisse.

5.3 Feldversuch: Einfluss des Fließgewässers

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit war zu untersuchen, ob der Abstand zum Fließgewässer einen Einfluss auf die Wuchsparameter der Pappelbestockung hat. Die zur Klärung dieser Frage aufgeworfenen Hypothesen H9 und H10 werden im folgenden Abschnitt beantwortet und diskutiert.

Die Hypothese H9 nimmt an, dass der Abstand zum Fließgewässer einen Einfluss auf die Länge der Vegetationsperiode hat. Die Hypothese H9 kann anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht beantwortet werden.

Die Untersuchungsergebnisse machen deutlich, dass es eine Variation im Zeitpunkt der Austriebsinitiation und des Blattfalles zwischen den Bestandesrändern und dem Bestandesinneren gibt, wobei die Bestandesränder früher mit dem Austrieb beginnen und eine etwas längere Vegetationsperiode aufweisen. Ob und mit welcher Gewichtung ein Einfluss des Fließgewässers an der Gewässerseite besteht, kann allerdings aufgrund des Versuchsaufbaus und der zur Verfügung stehenden Daten nicht beantwortet werden. Inwieweit überhaupt ein Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf die Vegetationslänge bestehen kann, ist fraglich. BOLTE & DEGEN (2010) und AREND et al. (2016) beschreiben, dass die Kontrolle des Austriebszeitpunktes bei Bäumen auf zwei Wegen erfolgt. Zuerst benötigen Bäume einen „Kältereiz“, also ein bestimmtes Maß an Winterkälte. Zudem orientieren sie sich an der Tageslänge. Dieser Photoperiodismus basiert auf der Funktion des Phytochroms (eines Zellproteins), das seine Zustandsform in Abhängigkeit vom Tag-Nacht-Längenverhältnis ändert und die Disposition des Baumes für den Austrieb steuert. Eine bestimmte, genetisch bedingte Datumsschwelle muss erreicht sein, damit der Temperatureinfluss auf den Austrieb wirksam wird (KÖRNER & BASLER, 2010). Folglich ist es gemäß der Theorie abzulehnen, dass der Austriebszeitpunkt aufgrund unterschiedlicher Abstände zum Fließgewässer bzw. unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit überhaupt variieren kann.

Die herbstliche Phänologie ist primär durch Photoperiodismus gesteuert (RUTTINK et al., 2007). Die Vorbereitung auf den winterlichen Ruhezustand ist ein aktiver physiologischer Prozess, der entsprechende physiologisch wirksame Temperaturen erfordert. Im Herbst stimmt die sichtbare Phänologie der Blätter allerdings nicht mit der inneren Entwicklung des Baumes überein, wie dies im Frühjahr der Fall ist. Zudem ist sie sehr variabel und deshalb nur schwer mit bestimmten Umweltbedingungen zu erklären (ESTRELLA & MENZEL, 2006). Die Laubverfärbung und der Zeitpunkt des Laubfalls spiegeln nicht die innere Disposition des Baumes wider. Diese wird lange bevor eine herbstliche Blattverfärbung sichtbar ist auf die kommende Zeit der Ruhe umgestellt (AREND et al., 2016). Folglich ist ein Einfluss des Abstands zum Fließgewässer auf den Zeitpunkt des Blattfalls der herrschenden Lehrmeinung nach ebenfalls abzulehnen.

Die Hypothese H10 kann anhand der Untersuchungsergebnisse ebenfalls nicht beantwortet werden. Der Abstand zum Fließgewässer hat zwar einen Einfluss auf den oberirdischen Biomassezuwachs. Ob dieser Einfluss allerdings dem Fließgewässer selbst zuzuschreiben oder lediglich auf andere Umwelteffekte zurückzuführen ist, konnte in der vorliegenden Untersuchung nicht geklärt werden.

Die hohen Durchmesserzuwächse am Acker- und Gewässerrand (Reihe 9: 2,03 cm, Reihe 1: 2,13 cm) weisen darauf hin, dass Randeffekte wie eine verringerte intraspezifische Konkurrenz einen positiven Einfluss auf das Wachstum haben könnten. Denkbar wäre auch, dass eine gesteigerte Strahlungs- und Nährstoffverfügbarkeit durch den Geringwuchs und die Düngung der annuellen Kultur am Ackerrand und eine erhöhte Wasserverfügbarkeit am Gewässerrand sich positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken und das jeweils andere Defizit kompensieren. Aufgrund des in dieser Untersuchung nachgewiesenen überdurchschnittlichen Wachstums der Pappel-Individuen am Gewässerrand, kann zumindest als bestätigt angesehen werden, dass sich die Gewässernähe nicht negativ auf das Pappelwachstum auswirkt. Zu einer Wuchsdepression würden nicht ausreichend tiefgründige Böden (≤ 1 m bis zum Grundwassser) (BAKER & BROADFOOT, 1979) oder gesättigte bzw. staunasse Böden während der Vegetationsperiode führen (STANTURF et al., 2001). Dies bestätigt auch der Feldversuch von ŠTÍCHA et al. (2016). Dieser hat gezeigt, dass das Wachstum der Max4- und Max5-Pappeln (ausgedrückt durch Brusthöhendurchmesser und Baumhöhe) am

Standort mit Staunässe deutlich geringere Werte erreichte als am Standort ohne Staunässe.

Vor dem Hintergrund der deutlichen Limitierung der Biomasseerzeugung in Kurzumtriebsplantagen durch die Wasserverfügbarkeit und dem gegenteiligen Effekt, dass sich KUP wiederum deutlich auf den Landschaftswasserhaushalt auswirken (DIMITRIOU, et al. 2009; PERRY et al., 2001; ZACIOS & ZIMMERMANN, 2016), ist die Anzahl der Studien zum Bodenwassergehalt unter KUP und dessen Auswirkungen auf die Bestockung vergleichsweise gering (RASCHE et al., 2015). Unstrittig ist, dass mit Pappeln bestockte Kurzumtriebsplantagen deutlich mehr Wasser verbrauchen als andere Ackerkulturen (LAMERSDORF et al., 2010). Das Jahr 2021 war mit seiner Niederschlagssumme innerhalb der Vegetationsperiode nicht mit den vorhergehenden Jahren vergleichbar. Während die Niederschlagssumme des Sommers 2020 nur geringfügig unter dem Vergleichswert des Jahres 2021 lag (DWD, 2022). Entsprach die Niederschlagssumme des Frühjahrs 2020 mit 70,6 mm lediglich 55 % des langjährigen Mittels (1991 – 2010). Im Frühjahr des Jahres 2021 fielen hingegen 141,4 mm Niederschlag, was 110 % des langjährigen Mittels entspricht. Sollte am Gewässerrand der Untersuchungsfläche grundsätzlich eine höhere Wasserverfügbarkeit (Grundwasseranschluss) vorhanden sein, würde diese sich in Jahren mit geringen Niederschlagssummen in der Vegetationsperiode (wie z.B. 2020) stärker bemerkbar machen. Folglich wäre eine Untersuchung des Gewässereinflusses in einem Trockenjahr wünschenswert.

6. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die Effekte von hoch anstehendem Grundwasser auf die Pappelsorten Max3 und Fritzi Pauley untersucht.

Dabei zeigte sich im Gewächshausversuch zum einen ein statistisch signifikanter Einfluss der Bewässerungsvariante auf die Entwicklung der Sorte Max3 für die Parameter „längster Trieb“, „Blatttrockenmasse“, „längste Wurzel“, „Wurzeltrockenmasse“ und das Wurzel-Spross-Verhältnis. Die Entwicklung der Sorte Fritzi Pauley wurde lediglich im Hinblick auf den Parameter „längster Trieb“ und das Wurzel-Spross-Verhältnis signifikant von der Bewässerungsvariante beeinflusst. Der genetische Faktor „Sorte“ beeinflusste alle Untersuchungsparameter statistisch signifikant.

Aus den Untersuchungsergebnissen des Gewächshausversuches konnte abgeleitet werden, dass die Sorte Fritzi Pauley im Gesamtwachstum hinter Max3 zurückfällt. Allerdings reagierte sie weniger sensibel auf hoch anstehendes Grundwasser. Dies unterstreicht die Eignung der Sorte für gewässernahe Standorte, wie auch im Feldversuch der vorliegenden Arbeit dargestellt.

Weiterhin zeigte sich in der vorliegenden Untersuchung kein konkreter Einfluss der Gewässernähe auf die Länge der Vegetationsperiode und den Biomassezuwachs der einzelnen Bestandesteile. Um den Einfluss von Gewässernähe auf das Wachstum von Agrarholzbeständen zu untersuchen, wurde in einem mit der Sorte Fritzi Pauley bestockten gewässernahen Agrarholzstreifen ein Feldversuch angelegt.

Die Untersuchungen zum Biomassezuwachs der unterschiedlichen Bestandeskompartimente zeigten eine Variation zwischen den Bestandesrändern und dem Bestandesinneren. Ein direkter Einfluss der Gewässernähe durch unterschiedliche Wasserverfügbarkeit konnte aufgrund des Versuchsaufbaus und dem zeitlichen Ablauf der Datenerhebung allerdings nicht nachgewiesen werden.

Damit hat diese Arbeit dazu beigetragen, bestehende Wissenslücken hinsichtlich des Agrarholzanbaus auf grundwassergeprägten Böden zu schließen. Die Ergebnisse sind insofern interessant, da sie zeigen, dass - gemäß den diskutierten Limitationen – mit einer angepassten Sortenwahl und optimaler Wasserverfügbarkeit eine erhebliche Steigerung der Erträge von Agrarhölzern möglich ist. Angesichts der eingangs in dieser Arbeit

geschilderten aktuellen Transformation zu einer erneuerbaren Energielandschaft, deutet dies darauf hin, dass das Potenzial von Biomasse aus Agrarhölzern damit noch nicht ausgeschöpft ist. Im Gegenteil zeigen die Ergebnisse, dass Anpassungen der Sortenwahl und die Erweiterung der nutzbaren Standorte die Erträge von Biomasse aus Agrarhölzern steigern und damit einen größeren Beitrag zur Energiewende leisten könnten.

Für weitere Forschung wäre es interessant herauszufinden, wie sich die Wasserverfügbarkeit im Boden der Untersuchungsfläche im Jahresverlauf ändert und wie die einzelnen Bestandeskompartimente hierauf reagieren. Dazu haben bereits weitergehende Untersuchungen stattgefunden und ein weiteres Versuchsjahr auf der Untersuchungsfläche in Peickwitz ist bereits eingerichtet. Mit den Daten der Dendrometer, Bodentensiometer und USB-Logger aus dem letzten und dem folgenden Untersuchungsjahr wird es möglich sein, faktenbasierte Bezüge zwischen dem Standort auf der Untersuchungsfläche, der Wasserverfügbarkeit im Boden und dem individuellen Pflanzenwachstum über den Zeitverlauf herzustellen. Wünschenswert wäre die Möglichkeit einer Entnahme von 15 Probebäumen über das gesamte Brusthöhendurchmesser-Spektrum, um mit Hilfe der Regressionsmethode nach RÖHLE et al. (2009) eine Biomassefunktion für die Untersuchungsfläche aufstellen zu können. Diese würde es möglich machen, die Biomasseleistung der gesamten Kurzumtriebsplantage rasch und zerstörungsarm zu ermitteln.

7. Quellenverzeichnis

AAS, G. (2006): Die Schwarzpappel (Populus nigra) – zur Biologie einer bedrohten Art. In: Beiträge zur Schwarzpappel, LWF Wissen Nr. 52, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, 2006, S. 7-12

ALI, W. (2009): Modelling of biomass production potential of poplar in short rotation on agricultural lands of Saxony, Germany. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften, Technische Universität Dresden, Dresden.

AMTHAUER GALLARDO, D. (2014): Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weidenklonen in Kurzumtriebsplantagen. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften Technische Universität Dresden, Dresden

AREND, M.; BRAUN, S;, BUTTLER, A.; SIEGWOLF, R. T.; SIGNARBIEUX, C.; KÖRNER, C. (2016): 3.1 Ökophysiologie: Reaktionen von Waldbäumen auf Klimaänderungen. In: PLUESS, A.R.; AUGUSTIN, S.; BRANG, P.: Wald im Klimawandel – Grundlagen für Adaptionsstrategien. Bundesamt für Umwelt & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern & Birmensdorf, S. 77-91

ARMSTRONG, W.; BRÄNDLE, R.; JACKSON, M.B. (1994): Mechanisms of flood tolerance in plants. Acta Botanica Neerlandica, Volume 43, Issue 4, S. 307- 358

ARSHAM, H.; LOVRIC, M. (2011) Bartlett´s Test. https://www.researchgate.net/profile/Dr-Hossein-Arsham/publication/344731676_BARTLETT'S_TEST/links/5f8ce5cb299bf1b53e324a18/BARTLETTS-TEST.pdf (abgerufen am 02.09.2021)

BAKER, J.B.; BROADFOOT, W.M. (1980): A practical field method of site evaluation for commercially important hardwoods (Vol.26). USDA, Forest Service, Southern Forest Experiment Station

BÄRTELS, A. (1996): Gehölzvermehrung. 4. Auflage, Eugen Ulmer KG, Stuttgart

BÄRTELS, A. (2008): Gehölzvermehrung – Aussaat, Veredelung, Steckholz, Stecklinge. 5. Auflage, Eugen Ulmer KG, Stuttgart

BÄRWOLFF, M.; REINHOLD, G.; FÜRSTENAU, C.; GRAF, T.; JUNG, L.; VETTER, A. (2013): Gewässerrandstreifen als Kurzumtriebsplantage oder Agroforstsysteme. Verband für Agrarfoschung und Bildung, Thüringen e.V., Gutachten, Texte 94/2013, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

BENETKA, V.; NOVOTNÀ, K.; ŠTOCHLOVÀ, P. (2014): Biomass production of Populus nigra L. clones grown in short rotation coppice systems in three different environments over four rotations. In: iForest - Biogeosciences and Forestry (7), S. 233-239

BLAKE, T.J.; TSCHAPLINSKI, T.J. (1992): Water relations. In MITCHELL, C.P.; FORD-ROBERTSON, J.B.; HINCKLEY, T.; SENNERBY-FORSSE, L. (Hrsg.): Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops. Elsevier Science Publishers Ltd., London, S. 66-94

BLE - Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2021): Die Pappel – Klone, Klonmischungen und Familieneltern. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn

BMBV- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020): Forschung für Nachhaltigkeit - Eine Strategie des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Referat Grundsatzfragen, Digitalisierung und Transfer; Abteilung Zukunftsvorsorge – Forschung für Grundlagen und nachhaltige Entwicklung, Bonn

BMJV-Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2021a): Bundeswaldgesetz vom 2. Mai 1975 (BGBl. I S. 1037), das zuletzt durch Artikel 112 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist, Berlin

BMJV-Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2021b): InVeKoS-Verordnung vom 24. Februar 2015 (BGBl. I S. 166), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 19. Mai 2021 (BAnz AT 28.05.2021 V2) geändert worden ist, Berlin

BMJV-Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2021c): Direktzahlungen-Durchführungsverordnung vom 3. November 2014 (BGBl. I S. 1690), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. September 2020 (BAnz AT 24.09.2020 V1) geändert worden ist, Berlin

BMJV-Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2021d): Forstvermehrungsgutgesetz vom 22. Mai 2002 (BGBl. I S. 1658), das zuletzt durch Artikel 414 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist, Berlin

BMWI- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2021): Erneuerbare Energien. Referat Soziale Medien und Öffentlichkeitsarbeit, Berlin, https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html (abgerufen am: 04.10.2021)

BOEHMEL, C., LEWANDOWSKI, I., CLAUPEIN, W. (2008): Comparing annual and perennial energy cropping systems with different management intensities. Agricultural Systems 96, Issue 1-3, S. 224-236

BÖHM, C.; BUSCH, G.; KANZLER, M. (2018): Standörtlicher Wasserhaushalt und Wasserqualität. In: VESTE, M.; BÖHM, C. (Hrsg.): Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Springer Spektrum, Berlin, S.229-272

BÖHM, C.; VESTE, M. (2018a): Nachhaltige Holzproduktion in der Agrarlandschaft. In: VESTE, M.; BÖHM, C. (Hrsg.): Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Springer Spektrum, Berlin, S.1-16

BÖHM, C.; VESTE, M. (2018b): Agrarholzanbau im Kontext einer modernen Landwirtschaft. In: VESTE, M.; BÖHM, C. (Hrsg.): Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Springer Spektrum, Berlin, S.57-79

BOLTE, A.; DEGEN, B. (2010): Anpassung der Wälder an den Klimawandel: Optionen und Grenzen. Landbauforschung - vTI Agriculture and Forestry Research 3, (60), S. 111-118

BRÄNDLE, R. (1996): Überflutung und Sauerstoffmangel. In: BRUNOLD, Ch.; RÜEGSEGGER, A.; BRÄNDLE, R. (Hrsg.): Stress bei Pflanzen. Verlag Paul Haupt (UTB), Bern-Stuttgart-Wien, S.133-148

BRESINSKY, A.; KÖRNER, C.; KADEREIT, J.W.; NEUHAUS, G.; SONNEWALD, U. (2008): Strasburger - Lehrbuch der Botanik. 36. Auflage, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

BUNGART, R.; HÜTTL, R. (2004): Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in a short-rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. European Journal of Forest Research 123, S. 105-115

CLINCH, R.L.; THEVATHASAN, N.V.; GORDON, A.M.; VOLK, T.A.; SIDDERS, D. (2009) Biophysical interactions in a short rotation willow intercropping system in southern Ontario, Canada. Agriculture, Ecosystems and Environment 131, S. 61-69

CRAWFORD, R.M.M. (1992): Oxygen availability as an ecological limit to plant distribution. Advances in Ecological Research, Volume 23, S. 93-185

DGVN – Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen (2016): UN-Basis-Informationen 54 – Das UN-Klimaabkommen von Paris. Deutsche Gesellschaft für die Vereinten Nationen e.V., Berlin

DICKMANN, D.I.; PREGITZER, K.S. (1992): The structure and dynamics of woody plant root systems. In: MITCHELL, C.P.; FORD-ROBERTSON, J.B.; HINCKLEY. T.; SENNERBY-FORSSE, L. (Hrsg.): Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops. Elsevier Applied Science Publishers Ltd., Essex, S. 95-124

DICKMANN, D.I.; ISEBRANDS, J.G.; BLAKE, T.J.; KOSOLA, K.; KORT, J. (2001): Physiological ecology of poplars. In: DICKMANN, D.I.; ISEBRANDS, J.G.; ECKENWALDER, J.E.; RICHARDSON, J. (Hrsg.): Poplar Culture in North America. NRC Research Press, Ottawa, S. 77-118

DICKMANN, D.I. (2006): Sylviculture and biology pf short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. Biomass & Bioenergy 30, S. 696-705.

DICKMANN, D.I.; KUZOVKINA, J. (2014): Poplars and Willows of the World, With Emphasis on Silviculturally Important Species. In: ISEBRANDS, J.G., RICHARDSON, J.: Poplars and Willows – Trees for Society and the Environment. CAB International and FAO, Wallingford - Rom

DIMITRIOU, I., BUSCH, G., JACOBS, S., SCHMIDT-WALTER, P., LAMERSDORF, N. (2009): A review of the impacts of Short Rotation Coppice cultivation on water issues. Agriculture and Forestry Research 3, (59), S. 197–206.

DOMIN, T. (2021): Schriftwechsel via Email mit Herrn Thomas Domin (Inhaber des Landwirtschaftsbetrieb Domin und Eigentümer der Untersuchungsfläche Peickwitz)

DÖHRER, K. (2011): Erfahrungen mit der Anlage von Pappel-Kurzumtriebsplantagem auf landwirtschaftlichen Flächen. Karl Döhrer, Versuchs- und Bildungszentrum Landwirtschaft Haus Düsse, Diemelstadt

DU, K.; SHEN, B.; XU, L.; TU, B. (2008): Estimation of genetic variances in flood tolerance of poplar and selection of resistant F1 generations. Agroforestry systems (74), S. 243-257

DU, K.; XU, L.; WU, H.; TU, B.; ZHENG, B. (2012): Ecophysiological and morphological adaption to soil flooding of two poplar clones differing in floo-tolerance. Flora 207, S. 96-106

DWD – Deutscher Wetterdienst (2019): Nationaler Klimareport – Klima – Gestern, heute und in der Zukunft. Abteilung Klima- und Umweltberatung, Offenbach

DWD – Deutscher Wetterdienst (2018): Deutscher Klimaatlas: Normalwerte (Zeitraum 1971-2000). https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html (Abgerufen am: 20.09.2021)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2021a): Klimaatlas – Berlin, Brandenburg. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaatlas/klimaatlas_node.html (abgerufen am: 06.10.2021)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2021b): Temperatur: vieljährige Mittelwerte 1981–2010. https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_8110_fest_html.html?view=nasPublication (abgerufen am: 20.09.2021)

DWD – Deutscher Wetterdienst (2022): Climate Data Center. https://www.dwd.de/DE/leistungen/cdc_portal/cdc_portal.html?nn=17626 (abgerufen am 19.01.2022)

ECKENWALDER, J.E. (1996): Systematics and evolution of Populus. In: STETTLER, R.F. et al.: Biology of Populus and its implications for management and conservation. NRC Research Press, Ottawa, S. 7–32.

ENGLERT, H. (2009): Forstwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen. In: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, S. 75-88

ESTRELLA, N.; MENZEL, A. (2006): Responses of leaf colouring in four deciduous tree species to climate and weather in Germany. Climate Research 32, (3), S. 253-267

FANG, Z.-F.; ZHAO, S.-D.; SKVORTSOV, A.K. (1999): Salicaceae. In: WU, Z.-Y., RAVEN, P.H. (Hrsg.): Flora of China, Vol. 4 Science Press, Beijing and Missouri Botanical Garden Press, St Louis, Missouri, S. 162-274

FINK, S. (1980): Anatomische Untersuchungen über das Vorkommen von Spross- und Wurzelanlagen im Stammbereich von Laub- und Nadelbäumen. Dissertation, Universität Freiburg,

FNR - Fachagentur für Nachwachsende Rohstoffe e.V. (2020): Rahmenvereinbarung für den Rohholzhandel in Deutschland (RVR), 3. Auflage, Gülzow-Prüzen

FRISON, E.; LEFEVRE, S. et al. (Hrsg.) (1995): Populus nigra Network. EUFORGEN, Rep. First meeting Oct. 3-5, 1994, Izmit (Türkei), Intern. Plant Gen. Res. Inst. (IPGRI), Rom

FRÖHLICH, H.J.; GROSSCURTH, W. (1973): Züchtung, Anbau und Leistung der Pappeln. Mitteilungen der Hessischen Landesforstverwaltung, Band 11, J.D. Sauerländer Verlag, Frankfurt am Main

FUCHS, F. (2016): Darstellung des Wurzel- und Sprosswachstums von Pappelsteckhölzern der Max3 im Gefäßversuch bei unterschiedlicher Bewässerung. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden

FUCHS, A.; KENNEL, E. (1994): Erste Wiederholungsaufnahme einer permanenten Betriebsinventur im bayerischen Staatswald. Forstwissenschaftliches Centralblatt 113, Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin, S. 224-235

GIBSON, D.J., CONNOLLY, J., HARTNETT, D.C., WEIDENHAMER, J.D. (1999): Designs for greenhouse studies of interactions between plants. Journal of Ecology 87, S. 1–16.

GLENZ, C.; SCHLAEPFER, R.; IORGULESCU, I.; KIENAST, F. (2006): Flooding tolerance of Central European tree and shrub species. Forest Ecology and Management 235, S. 1-13

GONG, J.; ZHANG, X.; HUANG, Y.; ZHANG, C. (2007): The effects of flooding on several hybrid poplar clones in Northern China. Agroforestry Systems, Vol. 69, Springer Science, S. 77-88

GOOGLE (North Dakota) (2021): Untersuchungsgebiet Peickwitz. https://www.google.de/maps/place/Peickwitz,+Senftenberg/@51.4589099,13.9603953,588m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x47083e9fa6ca8503:0xa212048d681d030!8m2!3d51.4553023!4d13.9818248 (abgerufen am: 20.09.2021)

GRIESE, C.; LEONHARDT, A.; LARSEN, B.J. (1993): Ökophysiologische Untersuchungen an verschiedenen Pappelklonen. In: HÜTTERMANN, A. (Hrsg.): Anbau von Pappel bei mittlerer Umtriebszeit – Produktionsbiologie, Nutzungstechnologien und Ökonomie. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt Band 110, Sauerländer, Frankfurt am Main, S. 20-37.

GROSCHKE, M. (2017): Frühe Entwicklung von Pappelhybriden in Abhängigkeit von Bewässerung und Substrat. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden

GUO, X.; HUANG, Z.; XU, A.; ZHANG, X. (2011): A comparison of physiological, morphological and growth responses of 13 hybrid poplar clones to flooding. Forestry, Vol. 84, No. 1, S. 1-12

GUO, X., ZHANG, X., HUANG, Z. (2010): Drought tolerance in three hybrid poplar clones submitted to different watering regimes. Journal of Plant Ecology 3 (2), S. 79-87

GUTTERIDGE, J.M.C.; HALLIWELL, B. (1990): Reoxygenation injury and antioxidant protection - a tale of two paradoxes. Archiv. Biochemical Biophysics (283), S. 223-226

HALLGREN, S.W. (1989): Growth response of *Populus* hybrids to flooding. Annales des sciences forestières 46, S. 361-372

HARUKI, M., TSUYUZAKI, S. (2001): Woody plant establishment during the early stages of volcanic succession on Mount Usu, northern Japan. Ecological Research 16, S. 451–457

HARRINGTON, C.A. (1987): Responses of red alder and black cottonwood seedlings to flooding. Physiology Plantarum 69, S. 35-48

HESMER, H. (1951): Das Pappelbuch. Verlag des Deutschen Pappelvereins, Bonn, S. 1-62

HEß, D. (2008): Pflanzenphysiologie. 11. Auflage, Eugen Ulmer KG, Stuttgart

HINCKLEY, T.M.; BRAATNE, J.; CEULEMANS, R.; CLUM, P.; DUNLAP, J.; NEWMAN, D.; SMIT, B.; SCARACASCIA-MUGNOZZA, G.; VAN VOLKENBURGH, E. (1992): Growth dynamics an canopy structure. In: MITCHELL, C.P.; FORD-ROBERTSON, J.B.; HINCKLEY, T.; SENNERBY-FORSSE, L. (Hrsg.): Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops. Elsevier Science Publishers Ltd., London, S. 1-34

HOFMANN, M. (1995): Schnellwachsende Baumarten für den Kurzumtrieb - Aspekte der Pflanzenzüchtung und Ergebnisse zur Kloneignung auf verschiedenen Standorten. Die Holzzucht 49, S. 3-8

HÜWE, R.; ROUBITSCHEK, W. (2004): Landwirtschaftliche Bodennutzung. In: HAAS, H.-D. (Hrsg.): Nationalatlas Bundesrepublik Deutschland. Band 8. Unternehmen und Märkte. Elsevier / Spektrum Akademischer Verlag, München / Heidelberg

IPC (International Commission on Poplars and Other Fast-Growing Trees Sustaining People and the Environment) (2021): International Register of Cultivars of Populus L. (poplar). Food and Agriculture Organisation of the United States, Rom

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2021): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press

JACKSON, M.B.; DAVIES, D.D.; LAMBERS, H. (Hrsg.) (1991): Plant life under oxygen deprivation. SPP Academic Publishing, The Hague, The Netherlands

JOACHIM, H.-F. (2000): Die Schwarzpappel (Populus nigra) in Brandenburg. Eberswalder Forstliche Schriftenreihe, BAND XI, Landesforstanstalt Eberswalde, Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam

KAWALETZ, H., MÖLDER, I., ANNIGHÖFER, P., TERWEI, A., ZERBE, S., AMMER, C. (2014): Pot experiments with woody species : a review. Forestry - An International Journal of Forest Research 87(4), S. 482–491

KNUST, C. (2009): Kurzumtriebsplantagen - Stand des Wissens. In: REEG, T.; BEMMANN, A.; KONOLD, W.; MURACH, D.; SPIECKER, H.: Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, S. 3-9

KÖRNER, C.; BASLER, D. (2010): Phenology under global warming. Science 327, S. 1461–1462

KOZLOWSKI, T.T. (1997): Responses of woody plants to flooding and salinity. Tree Physiology, Volume 17, Issue 7, Heron Publishing, Victoria

KOZLOWSKY, T.T.; PALLARDY, S.G. (1997): Growth Control in Woody Plants. Physiological Ecology Series, Academic Press, San Diego

KRABEL, D., SOLGER, A., MEYER, M, CARVALHO, P., FOULKES, J. (2015): Early root and aboveground biomass development of hybrid poplars (Populus spp.) under drought conditions. Canandaian Journal of Forest Resarch 45 (10), S. 1289-1298

KRABEL, D., GROSCHKE, M., KORN, S., MEYER, M., MÜLLER, R. SOLGER, A., WINKLER, M., WEIGAND, M. (2018): Topfversuche mit drei Pappelstandardsorten - Möglichkeiten und Herausforderungen. Landbauforschung - Applied Agricultural and Forestry Research 1/2 2018 (68), S. 11-18

KRABEL, D., MEYER, M., MORGENSTERN, K., HEILIG, D., HEIL, B., KOVÁCS, G., LEIBING, C. (2021): Biomass Allocation and Root Characteristics of Early-Stage Poplars (Populus spp.) for Assessing Their Water-Deficit Response During SRC Establishment, BioEnergy Research 14, S. 385–398

KREUZWIESER, J.; RENNENBERG, H. (2014): Molecular and physiological response to waterlogging stress. Plant, Cell and Environment 37, S. 2245-2259

KRÖBER, M.; HEINRICH, J.; WAGNER, P. (2008): Energieholz aus Sicht des Landwirts – dafür oder dagegen? Einflüsse betrieblicher und regionaler Rahmenbedingungen auf die Entscheidung zur Anlage von Kurzumtriebsplantagen. Cottbusser Schriften zur Ökosystemgenese und Landschaftsentwicklung (6), S. 1-14

KRUG, J. (2013) : Perspektiven ackerbaulicher Grenzstandorte in Nordostdeutschland: Übertragbarkeit extensiver Produktionssysteme überseeischer Trockenstandorte. Thünen Report, No. 6, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig

KÜCK, U.; WOLFF, G. (2014): Botanisches Grundpraktikum. 3. Auflage, Springer-Verlag, Berlin

LAMERSDORF, N.; PETZOLD, R.; SCHWÄRZEL, K.; FEGER, K.-H.; KÖSTNER, B.; MODEROW, U.; BERNHOFER, C.; KNUST, C. (2010): Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen. In: BEMMANN, A., KNUST, C. (Hrsg.): Agrowood. Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. S. 170- 188

LANDESHAUPTSTADT DRESDEN (2021a): BMBF-Verbundprojekt OLGA (Stadt-Land-Plus). https://www.projekt-olga.de/ (abgerufen am: 04.10.2021)

LANDESHAUPTSTADT DRESDEN (2021b): Modul 1: Nachhaltige Holznutzung an Fliessgewässern - Ökosystemleistungen und regionale Wertschöpfung von Agrarholzstrukturen fördern. https://www.projekt-olga.de/ueber/modul-1/ (abgerufen am: 04.10.2021)

LARCHER, W. (2001): Ökophysiologie der Pflanzen. 6. Auflage, Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart

LEWANDOWSKI, I., BÖHMEL, C., VETTER, A., HARTMANN, H. (2009): Landwirtschaftlich produzierte Lignocellulosepflanzen. In: KALTSCHMITT, M., HARTMANN, H., HOFBAUER, H. (Hrsg.): Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg, S. 88-135

LGB - Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (2001): Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg 1 : 300 000 - Grundkarte Bodengeologie. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg, Kleinmachnow

LGB - Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (2021): Brandenburgviewer. Potsdam https://bb-viewer.geobasis-bb.de/ (abgerufen am: 27.09.2021)

LIEBHARD, P. (2007): Energieholz im Kurzumtrieb – Rohstoff der Zukunft. Leopold Stocker Verlag, Graz. S. 32-34

LÖFFLER, S.; KÄTZEL, R.; BECKER, F. (2009): Dem Klimawandel auf der Spur: Phänologische Beobachtungen an Waldbäumen. Flyer des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg.)

LÜTTGE, U.; KLUGE, M.; THIEL, G. (2010): Botanik - Die umfassende Biologie der Pflanzen. WILEY-VCH Verlag: Weinheim

LÜTTSCHWAGER, D.; ATANET ALÌA, L.; EWALD, D. (2015): Auswirkungen von moderatem Trockenstress auf Photosynthesekapazität, Wassernutzungseffizienz und Biomasseproduktion von drei Pappelklonen. In: LIESEBACH, M. (Hrsg.): FastWOOD II: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb – Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD. Thünen Report 26, Thünen-Institut, Braunschweig, S. 192-196

LÜTTSCHWAGER, D.; EWALD, D.; ATANET ALÌA, L. (2016): Consequences of moderate drought stress on the net photosynthesis, water-use efficiency and biomass production of three poplar clones. In: Acta Physiologica Plant 38 (27)

MAC CÁRTHAIGH, D.; SPETHMANN, W. (2000): Krüssmanns Gehölzvermehrung. Parey Buchverlag im Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin - Wien

MATYSSEK, R.; FROMM, J.; RENNENBERG, H.; ROLOFF, A. (2010): Biologie der Bäume- Von der Zelle zur globalen Ebene. Eugen Ulmer KG, Stuttgart

MC CARTHY, R.; LÖF, M.; GARDINER, E.S. (2018): Early root development of poplars (*Populus* spp.) in relation to moist and saturated soil conditions. Scandinavian Journal of Forest Research, 33:2, S. 125-132

McIVOR, I.R.; SLOAN, S.; ROVIRA PIGEM, L. (2014): Genetic and environmental influences on root development in cuttings of selected Salix and Populus clones – a greenhouse experiment. Plant Soil 377, S. 25-42

MEIER, I.C. (2007): Aboveground and belowground response of European beech to drought: field studies and experiments. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen

MEYER, M.; SOLGER, A.; PANITZ, L.; JANSSEN, A.; KRABEL, D. (2015): Auswirkungen der Züchtung auf einen optimierten nachwachsenden Rohstoff Holz - Beispiel Pappelzüchtung. In: LIESEBACH, M. (Hrsg.): FastWOOD II: Züchtung schnellwachsender Baumarten für die Produktion nachwachsender Rohstoffe im Kurzumtrieb - Erkenntnisse aus 6 Jahren FastWOOD. Thünen-Report 26, S. 111-122

MEYER, M.; KORN, S.; KRABEL, D. (2019): Beurteilung und Optimierung anatomisch /physiologischer Parameter für die Züchtung schnellwachsender Baumarten. In: Züchtung schnellwachsender Baumarten der Gattungen Populus, Robinia und Salix für die Produktion nachwachsender Rohstoff im Kurzumtrieb (FastWOOD III). Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Hannoversch Münden

MLUV - Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (2005): Gley – Steckbriefe Branderburger Böden. MLUV & Stiftung NaturSchutzFonds Brandenburg, Potsdam

MOE, R., ANDERSEN, A.S. (1988): Stock plant environment and subsequent adventitious rooting. In: DAVIS, T.D.; HAISSIG, B.E.; SANKHLA, N.: Adventitious Root Formation in Cuttings. Advances in Plant Sciences Series, Vol. 2, S.174–184, Dioscorides Press, Portland

MONCLUS, R.; DREYER, E.; DELMOTTE, F.M.; VILLAR, M.; DELAY, D.; BOUDOURESQUE, E.; PETIT, J.M.; MARRON, N.; BRECHET, C.; BRIGNOLAS, F. (2005): Productivity, leaf traits and carbon isotope discrimination in 29 Populus deltoides x P. nigra clones. New Phytologist 167 (1), S. 53-62

MONCLUS, R.;DREYER, E.; VILLAR, M.; DELMOTTE, F.M.; DELAY, D.; PETIT, J.M.; BARBAROUX, C.; LE THIEC, D.; BRÈCHET, C.; BRIGNOLAS, F. (2006): Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of Populus deltoides x Populus nigra. In: New Phytologist 169, S. 765-777

MONK, C. (1966): Ecological Importance of Root/Shoot Ratios. Bulletin of the Torrey Botanical Club , Vol. 93, No. 6, S. 402-406

MOSNER, E.; LEYER, I.; SCHNEIDER, S.; LEHMANN, B.; GALONSKA, H. (2010): Praxisleitfaden zur Weichholzauen-Etablierung an Bundeswasserstraßen – Ein Beitrag zum naturverträglichen Hochwasserschutz. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Marburg – Karlsruhe

MUSTROPH, A.; SAUTER, M.; GEIGENBERGER, P.; VAN DONGEN, J.(2016): Wernn Pflanzen die Luft ausgeht - (Über)leben ohne Sauerstoff. Biologie in unserer Zeit 1/2016 (46), Wiley-VCH GmbH, Weinheim, S. 32-40

MÜLLER, R. (1951): Der Anbau der Pappel. In: HESMER, H. (Hrsg.): Das Pappelbuch. Verlag des deutschen Pappelvereins, Bonn. S. 111-141.

MÜLLER, R.; SAUER, E. (1972): Urteilsgrundlagen für die trichocarpa-Pappel. Wirtschafts- und Forstverlag Euting, Strassenhaus

MÜLLER, R. (2013): Frühe Wurzel- und Sprossentwicklung von Pappelsteckhölzern der Sorte AF2, Hybride 275 und Max3 im Bewässerungsversuch. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden

NAIR, P.K.R. (1985): Classification of Agroforestry Systems. Agroforestry Systems (3), S. 97-128

NAIR, P.K.R. (1993): An Introduction to Agroforestry. International Centre for Research in Agroforestry (ICRAF), Kluwer Academic Publishers, Niederlande

NULTSCH, W. (2012): Allgemeine Botanik. 12. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart

OPEN STREET MAP (2021): OpenStreetMap Karte - Höhe über dem Meeresspiegel, Meter über Normalhöhennull, Normalnull, Höhennull. www.openstreetmap.org/copyright (abgerufen am: 20.09.2021)

PALLARDY, S.; KOZLOWSKI, T. (1979): Early root and shoot growth of Populus clones. Silvae Genetiva 28 (4), S.153-156

PENG, Y.; ZHOU, Z.; TONG, R.; HU, X.; DU, K. (2017): Anatomy and ultrastructure adaptions to soil flooding of two full-sib poplar clones differing in flood-tolerance. Flora 233, S. 90-98

PERRY, C. H., MILLER, R. C., BROOKS, K. N. (2001): Impacts of short-rotation hybrid poplar plantations on regional water yield. Forest Ecology and Management 143, S. 143-151.

PETZOLD, R.; FEGER, K.-H.; SCHWÄRZEL, K. (2009): Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: REEG, T.; BEMMANN, A.; KONOLD, W.; MURACH, D.; SPIECKER, H.: Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, S. 181-191

PETZOLD, R. (2013): Standortsökologische Aspekte und Anbaupotenziale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen. Dissertation, Fachrichtung Forstwissenschaften, Technische Universität Dresden, Dresden

PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG (2021): Erneuerbare Ziele auf europäischer Ebene. https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/energiewende/energie-erzeugen/erneuerbare-energien-317608 (abgerufen am: 21.09.2021)

PRETZSCH, H. (2019): Grundlagen der Waldwachstumsforschung. 2. Auflage, Springer Spektrum, Berlin

RASCHE, D.; REINHARDT-IMJELA, C.; SCHULTE, A. (2015): Untersuchungen zur Bodenfeuchte unter verschiedenen, benachbarten Landnutzungsarten im Osterzgebirge - unter besonderer Berücksichtigung von Kurzumtriebsplantagen. In: CHIFFLARD, P.; KARTHE, D.; HELLER, K.: Beiträge zum 47. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie vom 19.-21. November 2015 in Dresden, Geographica Augusta, Band 20, Augsburg, S. 20-30

REICH, P.B. (1984): Leaf Stomatal Density And Diffusive Conductance In Three Amphistomatous Hybrid Poplar Cultivars. New Phytology 98 (2), S. 231-239

REICHE, B. (2015): Phänotypisierung verschiedener Pappelgenotypen im Bewässerungsversuch. Masterarbeit, Technische Universität Dresden

ROBINSON, D., RAFFA, K. (1998): Productivity, drought tolerance and pest status of hybrid *Populus*: Tree improvement and silvicultural implications. Biomass and Bioenergy, Volume 14 (1), S. 1-20

RODRIGUEZ, M.E.; LAUFF, D.; CORTIZO, S.; LUQUEZ, V.M.C. (2019): Variability in flooding tolerance, growth, and leaf traits in a Populus deltoides intraspecific progeny. Tree Physiology 40, S. 19-29

RÖHLE, H.; HARTMANN, K.-U.; STEINKE, C.; MURACH, D. (2009): Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsbeständen. In: REEG, T.; BEMMANN, A.; KONOLD, W.; MURACH, D.; SPIECKER, H.: Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, S. 41-55

ROLOFF, A. (2010): Bäume - Lexikon der praktischen Baumbiologie. 2.Aufl., WILEY-VCH Verlag, Weinheim

ROLOFF, A. (2021): Und was ist bei zuviel Wasser ? In: Roloff, A.; Dreßler, A.; Kniesel, B.; Krabel, D.; Ming, L.; Pietzarka, U.: Trockenstress bei Bäumen – Ursachen, Strategien, Praxis. Quelle & Meyer Verlag GmbH& Co, Wiebelsheim. S. 276-281

ROOD, S.; NIELSEN, J.L.; SHENTON, L.; GILL, K.M.; LETTS, M.G. (2010): Effects of flooding on leaf development, transpiration and photosynthesis in narrowleaf cottonwood, a willow-like poplar. Photosynthesis Resesarch, Vol. 104, S.34-39

ROTHKEGEL, W.; HERZOG, H. (1928): Das Verfahren der Reichsfinanzverwaltung bei der Bewertung landwirtschaftlicher Betriebe. Berlin Parey

RUTTINK, T.; AREND, M.; MORREEL, K.; STORME, V.; ROMBAUTS, S.; FROMM, J.; BHALERAO, R.; BOERJAN, W.; ROHDE, A. (2007): A molecular timetable for apical bud formation and dormancy induction in poplat. The Plant Cell 19, (8), S. 2370-2390

SAUTER, M. (2013): Root responses to flooding. Current Opinion in Plant Biology, 2013, Volume 16, Issue 3, S. 282–286

SCHENCK, C.A. (1939): Fremdländische Wald- und Parkbäume. 3. Band, Die Laubhözer. Verlag Paul Parey, Berlin

SCHILDBACH, M.; GRÜNDEWALD, H.; WOLF, H.; SCHNEIDER, B.U. (2009): Begründung von Kurzumtriebsplantage: Baumartenwahl und Anlageverfahren. In: REEG, T.; BEMMANN, A.; KONOLD, W.; MURACH, D.; SPIECKER, H. (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH, Weinheim, S. 57-72

SCHIRMER, R. (1996): Aspekte der Pflanzenzüchtung schnellwachsender Baumarten für Energiewälder. In: BAYERISCHE ANSTALT FÜR WALD- UND FORSTWIRTSCHAFT: Schnellwachsende Baumarten, ihr Anbau und ihre Verwertung. Tagung am 25. Januar 1996, Neustadt, S. 7-17

SCHMITZ-LENDERS, B. (1956): Mein Pappel-Testament - Erfahrungsgewinne und Forschungs-ergebnisse auf dem Gebiet des Pappel-Waldbbaues und der Pappel-Ertragskunde. Sauerländer, Frankfurt am Main.

SCHOBER, R. (1987): Ertragstafeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. 3. Auflage, J.D. Sauerländer, Frankfurt am Main.

SCHOPFER, P.; BRENNICKE, A. (2010): Pflanzenphysiologie. 7. Auflage, Springer Spektrum, Berlin

SCHRÖDTER, M.; ALTERMANN, M. (2019): 100er Boden – bestbewerteter Boden in Deutschland. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Bonn https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/boden100er.html (abgerufen am: 27.09.2021)

SCHROEDER, W.R.; WALKER, D.S. (1991): Effect of cutting position on rooting and shoot growth of two poplar clones. New Forests 4, S.281-289

SCHROERS, J.O. (2006): Zur Entwicklung der Landnutzung auf Grenzstandorten in Abhängigkeit agrarmarktpolitischer, agrarstrukturpolitischer und produktions-technologischer Rahmenbedingungen – eineAnalyse mit dem Simulationsmodell ProLand. Dissertation, Justus-Liebig-Universität, Gießen

SCHUSTER, A. (2017): Vergleich der Trockenheitstoleranz verschiedener Pappelgenotypen im Gewächshausversuch im Rahmen des Verbundvorhabens FastWood. Masterarbeit, Technische Universität Dresden

SMIT, B.; STACHOWIAK, M.; VAN VOLKENBURGH, E. (1989): Cellular processes limiting leaf growth in plants under hypoxic root stress. Journal of Experimental Botany 40, Oxford University Press, S. 89-94

SMITH, N. G.; WAREING, P. F. (1972): The distribution of latent root primordia in stems of Populus x robusta, and factors affecting the emergence of preformed roots from cuttings. Forestry: An International Journal of Forest Research, Volume 45, (2), S. 197-209.

SMITH, R.L.; SYTSMA, K.J. (1990): Evolution of Populus nigra (Sect. Aigeiros): Introgressive Hybridization and the Chloroplast Contribution of Populus alba (Sect. Populus). In: American Journal of Botany, Volume 77, Issue 9, September 1990, S. 1176-1187

SPETHMANN, W. (1990): Einsatzmöglichkeit der Stecklingsvermehrung bei der Erhaltung forstlicher Genressourcen. In: STEPHAN, B. R. (Hrsg.): Erhaltung forstlicher Genressorcen. Mitteil. Bundesforschungsanstalt für Forst-und Holzwirtschaft 164, S. 145-160.

SPETHMANN, W. (2000): Autovegetative Gehölzvermehrung. In: MAC CÁRTHAIGH, D.; SPETHMANN, W. (Hrsg.): Krüssmanns Gehölzvermehrung. Parey Buchverlag im Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin - Wien. S. 58-124.

SPLECHTNA, B.; GLATZEL, G. (2005): Optionen der Bereitstellung von Biomasse aus Wäldern und Energieholzplantagen für die energetische Nutzung – Szenarien, ökologische Auswirkungen, Forschungsbedarf. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume, Expertengutachten,

STANTURF, J.A.; VAN OOSTEN, C.; NETZER, D.A.; COLEMAN, M.D.; PORTWOOD, C.J. (2001): Ecology and silviculture of poplar plantations. In: DICKMANN, D.I.; ISEBRANDS, J.G.; ECKENWALDER, J.E.; RICHARDSON, J. (Hrsg.): Poplar Culture in North America. NRC Research Press, Ottawa, S. 153-206

STIMM, B.; BLASCHKE, H.; ROTHKEGEL, W.; RUPPERT, O. (2013): Stabilität hat tiefe Wurzeln - Die ideale Forstpflanze: Aspekte einer funktionalen Beziehung zwischen Wurzel und Spross. LWF aktuell, 93/2013, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, S. 9-14

STOUT, A.B.; SCHREINER, E.J. (1933): Results of a project in hybridizing poplars. Journal of Heredity 24, S. 216-229

THOMASIUS, H. (1991): Anlage und Bewirtschaftung von Fichten-Holzproduktionsplantagen. In: Die Fichte. Band 2, Teil 3, Verlag Paul Parey, Hamburg - Berlin

UMWELTBUNDESAMT (2021a): Jährliche Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. Nationales Treibhausgasinventar 2021, 12/2020; Presseinformation 07/2021 vom 15.03.2021, Dessau-Roßlau

UMWELTBUNDESAMT (2021b): Erneuerbare Energien in Deutschland - Daten zur Entwicklung im Jahr 2020. Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien – Statistik, Stand Febrauar 2021, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau

UMWELTBUNDESAMT (2021c): Indikator: Erneuerbare Energien. Dessau-Roßlau https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-erneuerbare-energien#wie-wird-der-indikator-berechnet (abgerufen am: 04.10.2021)

VANDERMEER, J.H. (1989): The ecology of intercropping. Cambridge University Press, Cambridge

VANDEN BROECK, A. (2003): EUFORGEN - technical guidelines for genetic conservation and use for European black poplar (Populus nigra). International Plant Genetic Resources Institute, Rome.

VIERECK, L.A.; FOOTE, J.M. (1970): The status of Populus balsamifera and P. trichocarpa in Alaska. Canadian Field Naturalist 84, S. 169-173

VOESENEK, L.A.C.J.; BAILEY-SERRES, J. (2013): Flooding tolerance: O_2 sensing and survival strategies. Current Opinion in Plant Biology, 2013, Volume 16, Issue 5, S. 647–653

WEIGAND, M. (2016): Phänotypisierung von Neuzüchtungen der Pappel im Gefäßversuch unter kontrollierten Bedingungen. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden

WEIH, M. & NORDH, N. (2005): Determinants of biomass production in hybrid willows and prediction of field performance from pot studies. Tree Physiology 25, Issue 9, S. 1197–1206

WEISGERBER, H. (1975): Kurzumtrieb bei Pappeln als Möglichkeit zur Steigerung der Holzproduktion. Die Holzzucht (29), S. 29-32

WEISGERBER, H. (1999): Populus nigra. In: ROLOFF, A., SCHÜTT, P. (1999): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. 16. Erg.Lfg. 6/99, Band 4, Wiley-VCH, Weinheim

WEISGERBER, H. (1999): Populus trichocarpa. In: ROLOFF, A., SCHÜTT, P. (1999): Enzyklopädie der Holzgewächse: Handbuch und Atlas der Dendrologie. 16. Erg.Lfg. 6/99, Band 4, Wiley-VCH, Weinheim

WIESE, A.H.; ZALESNY, J.A.; DONNER, D.M., ZALESNY JR., R.S. (2006): Bud removal affects shoot, root and callus development of hardwood Populus cuttings. Silvae Genetica 55 (3), S.141-148

YAP, B.W.; RAZALI, N.M. (2011): Power Comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling Tests. Journal of Statistical Modeling and Analytics, Vol. 2, No. 1, S.21-33

YING, C.C.; BAGLEY, W.T. (1977): Variation in Rooting Capability of Populus deltoides. Silvae Genetica 26 (5-6), S.204-207

YU, B.; ZHAO, C.Y.; LI, J.; LI, J.Y.; PENG, G. (2015): Morphological, physiological, and biochemical responses of *Populus euphratica* to soil flooding. Photosynthetica 53 (1), S. 110-117

ZACIOS, M., NIEDERBERGER, J., SEIDEL, H., SCHULZ, C., ZIMMERMANN, L., BURGER, F. (2012): Hydrologische und ökologische Aspekte bei Kurzumtriebsplantagen – Ökologisch wertvoll: KUPs liefern mehr als nur nachwachsende Energie. LWF aktuell, 90/2012, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, S. 21-23

ZACIOS, M; ZIMMERMANN, L. (2016): Hydrologische Aspekte von Pappel-Kurzumtriebsplantagen am Beispiel Kaufering. In: Zur Ökologie von Kurzumtriebsplantagen. LWF Wissen 79, Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising, S. 13-39

ZALESNY JR., R.S.; HALL, R.B.; BAUER, E.O.; RIEMENSCHNEIDER, D.E. (2003): Shoot position affects root initiation and growth of dormant unrooted cuttings of Populus. Silvae Genetica 52 (5-6), S.273-279

ZALESNY JR., R.S.; RIEMENSCHNEIDER, D.E.; HALL, R.B. (2005): Early rootings of dormant hardwood cuttings of Populus: Analysis of quantitative genetics and genotype x environment interactions. In: Canadian Journal of Forest Research (35), NRC Research Press, S. 918-929

ZALESNY JR., R.S.; WIESE, A.H. (2006): Date of shoot collection, genotype and original shoot position affect early rooting of dormant hardwood cuttings of Populus. Silvae Genetica 55 (4-5), S. 169-182

ZALESNY JR., R. S.; ZALESNY, J. A. (2009): Selecting Populus with different adventitious root types for environmental benefits, fiber, and energy. In: NIEMI, K.; SCAGEL, C. (Hrsg.): Adventitious root formation in forest trees and woody horticultural crops - from genes to applications. Research Signpost 37/661 (2), Kerala, S. 359–384.

Anhang

Anhang 1: Bonitur Blattaustrieb

Anhang 1:

Bonitur Blattaustrieb

Amerik. Balsampappel (*Pop. trichocarpa*)

Fritzi-Pauley (*Klon-Nr. 952 05*)

Phase 1 (P1)
Geschlossene Knospen,
Winterruheknospen

Phase 2 (P2)
Anschwellen der Knospen

Phase 3 (P3)

Aufbrechende Knospen,
erste Blattspitzen sichtbar

Phase 4 (P4)

Beginn der Blattentfaltung

Phase 5 (P5)

Blätter voll entfaltet

Austriebstermin eines Bestandes: ≥ 50% der beobachteten Bäume haben die Phase P4 **vollständig** erreicht

Baumauswahl: Im Untersuchungsplot 10 Bäume der herrschenden und mitherrschenden Schicht (*2 Bäume alle zwei Reihen: Reihe 1,3,5,7,9 um Gradienten zum Acker (S) und Gewässer (N) abzubilden*)
Im Restbestand östlich und westlich des Plotes jeweils 1 Baum der herrschenden und mitherrschenden Schicht alle 2 Reihe (…s.o…)

Phänologische Phasen: Anteile der jeweiligen Phase an der Gesamtkrone werden in 10%-Stufen geschätzt

Quelle: LÖFFLER, S.; KÄTZEL, R.; BECKER, F. (2009): Dem Klimawandel auf der Spur: Phänologische Beobachtungen an Waldbäumen. Flyer des Ministeriums für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg, Landeskompetenzzentrum Forst Eberswalde (Hrsg.).