

Züchtung und Evaluierung von Schwarz- und Balsampappelklonen hinsichtlich Ertrag und Blattrosttoleranz in vier FastWOOD Versuchsserien

Christina Fey*, Christoph Stiehm*, Martin Hofmann*, Matthias Moos*,
Helmut Grotehusmann*, Wilfried Steiner* und Alwin Janßen**

Zusammenfassung

Vorgestellt werden Ergebnisse aus Pappelklonprüfungen, deren Material im Verbundprojekt FastWOOD speziell für die Biomasseproduktion in Kurzumtriebsplantagen (KUP) selektiert und teils neu gezüchtet wurde. Seit 2010 wurden in vier Versuchsserien insgesamt 16 Versuchsflächen zur Beobachtung im dreijährigen Rotationszyklus verteilt über ganz Deutschland angelegt. In den Serien wurden 110 Klone aus Arten und Hybriden der Sektionen *Aigeiros* und *Tacamahaca* zusammen mit einem Set von bis zu 12 Standardklonen getestet. Beobachtet werden neben dem Hauptmerkmal Biomasseleistung weitere, für den erfolgreichen Betrieb einer KUP wichtige Parameter. Hierzu zählen besonders Toleranzeigenschaften gegenüber Pflanzenpathogenen, wie dem Erreger des Pappelblattrosts *Melampsora larici-populina*. Die Versuchsflächen der ersten Serien 603 und 604 wurden bereits über zwei Rotationszyklen hinweg beobachtet. Sie zeigen im Mittel deutliche Ertragszunahmen von der ersten zur zweiten Rotation. Zahlreiche Klone haben über beide Umtriebszeiten hinweg ihre Überlegenheit zur Kontrolle, dem bewährten Klon 'Max 1', bewiesen. Auch die Toleranzeigenschaften dieser wüchsigen Klone gegenüber dem Pappelblattrost *Melampsora larici-populina* zeigten sich im Vergleich zum jeweiligen Serienmittel und auch zu 'Max 1' als teilweise deutlich besser. Über alle Serien hinweg sind der überwiegende Teil dieser überlegenen Klone Balsampappelhybriden aus der Kreuzungskombination *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*. In der jüngsten Serie 606 ergaben sich bereits in der ersten Rotation mit einem Mittel von 6,14 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ deutlich überdurchschnittliche Biomasseerträge im Vergleich aller Serien.

Schlüsselwörter: Forstpflanzenzüchtung, *Populus* spp., Kurzumtriebsplantage, Standortleistung, Ertragsdynamik, *Melampsora larici-populina*, Blattrosttoleranz

Abstract

Breeding and Evaluation of Black and Balsam Poplar Clones regarding Yield and Tolerance to Leaf Rust in four FastWOOD Trial Series

Results from poplar clone trials containing material selected and bred within the FastWOOD joint research project for the purpose of biomass production in short rotation coppice (SRC) are presented. Since 2010 within four trial series an overall number of 16 trial sites managed in three year long rotation cycles were established covering the area of Germany. In these series 110 clones from species and hybrids from the poplar sections *Aigeiros* and *Tacamahaca* were tested together with a set of up to 12 standard clones. Besides biomass yield additional parameters that are important for a successful cultivation of SRC were observed. These include especially the susceptibility to plant pathogens like the poplar leaf rust *Melampsora larici-populina*. Trial sites from the first two series 603 and 604 have already been surveyed during two rotation cycles. A considerable increase in yield from the first to the second rotation was monitored. Multiple clones have shown a superior performance regarding yield within both rotations towards the proven and tested control-clone 'Max 1'. Furthermore the tolerance properties of these high yielding clones against the leaf rust *Melampsora larici-populina* proved to be better than the overall series average and 'Max 1'. Combining all series most superior clones are balsam poplar hybrids from the crossing of *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*. The most recent established trial series 606 produced a mean yield of 6,14 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ within the first rotation cycle which is clearly above average in comparison with the older series.

Keywords: Forest Tree Breeding, *Populus* spp., Short Rotation Coppice, Site productivity, Yield dynamic, *Melampsora larici-populina*, Leaf Rust Tolerance

* Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Abteilung C – Waldgenressourcen, Professor-Oelkers-Straße 6, 34346 Hann. Münden

** Bayerisches Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht, Forstamtsplatz 1, 83317 Teisendorf

1 Einleitung

Ihr starkes Jugendwachstum und die Fähigkeit zum Stockausschlag machen Pappeln und Weiden besonders interessant für die Produktion von Energiehackschnitzeln in kurzen Umtriebszeiten. Dabei werden bestimmte Arten und Arthybriden über Steckhölzer vermehrt und auf landwirtschaftlichen Standorten in 3- bis 4-jährigen Ernteintervallen bewirtschaftet. Sofern die Holzernte im Winterhalbjahr erfolgt, garantieren vitale Stockausschläge eine Bewirtschaftungsdauer von mindestens 30 bis 40 Jahren. Feldhackschnitzel aus landwirtschaftlichen Kurzumtriebsplantagen können eine sinnvolle Ergänzung zu den zunehmend stark nachgefragten Energieholzsortimenten aus dem Wald sein. Das Anbauverfahren weist Parallelen zum Niederwald auf, der sich in einigen Mittelgebirgslagen Deutschlands bis heute erhalten hat. Auch im Niederwald nutzt man die Fähigkeit bestimmter Baumarten zum Stockausschlag.

Durch die vegetative Vermehrung leistungsfähiger Klone über Steckhölzer entstehen genetisch einheitliche Bestände, in denen der Züchtungsfortschritt in vollem Umfang nutzbar wird. In der Klonauswahl liegt deshalb der Schlüssel für wuchsfreudige und gesunde Plantagen und damit für den Erfolg dieser modernen Niederwaldwirtschaft.

Im Verbundvorhaben FastWOOD (Teilprojekt 1, TP1) stehen leistungs- und resistanzorientierte Neuzüchtungen von Pappel- und Weidenhybriden im Vordergrund. Im Rahmen des Verbundvorhabens wurde die genetische Basis des für den Anbau auf Kurzumtriebsplantagen zur Verfügung stehenden Vermehrungsguts deutlich erweitert.

Die Abteilung Waldgenressourcen der NW-FVA wurde mit der Koordination des Gesamtvorhabens betraut und bearbeitete ein Teilvorhaben mit dem Ziel, für die Erzeugung von Biomasse im Kurzumtrieb geeignete Schwarz- und Balsampappeln- sowie Weiden-Sorten zu züchten. Dabei sollten neben konventionellen Ansätzen und bereits vorliegenden

Erfahrungen neue Methoden erprobt und genutzt werden. Zur Erzeugung geeigneter Sorten wurde die Elternbasis erweitert und inter- sowie intraspezifische Kreuzungen durchgeführt.

Mit den neu gezüchteten Klone wurden Versuchsflächen angelegt. Eine Charakterisierung der Genotypen erfolgte mittels molekulargenetischer Marker zur Klontidentifizierung. Weiterhin wurden die innerhalb des Projektes zu prüfenden Klone auf ihre Widerstandsfähigkeit gegenüber biotischen Krankheitserregern getestet. Insbesondere die Toleranz gegenüber dem Erreger des Pappelblatrstostes, *Melampsora larici-populina*, war ein wichtiges Selektionsmerkmal.

Inzwischen wurden zwei für die Biomasseproduktion im kurzen Umtrieb geeignete Schwarz- und Balsampappelklone nach den Vorschriften des Forstvermehrungsgutgesetzes (FoVG, 2002) in der Kategorie „Geprüft“ zugelassen. Für weitere 13 Klone hat der Sachverständigenbeirat für geprüftes Vermehrungsgut eine Empfehlung zur Zulassung ausgesprochen.

Der folgende Beitrag stellt die Hauptergebnisse des Teilvorhabens 1 „Evaluierung, Züchtung, genetische Charakterisierung sowie Leistungs-, Resistenz- und Anbauprüfung von Schwarz- und Balsampappeln und Weiden“ (Förderkennzeichen: 22000414) mit Fokus auf die Pappelzüchtung vor und gibt eine Einschätzung des verbesserten Anbauwerts der Neuzüchtungen aus dem Projekt.

2 Material und Methoden

2.1 Züchtungsprogramm FastWOOD TP1

Das Züchtungsprogramm im Teilprojekt 1 (TP 1) von FastWOOD umfasst in drei Projektphasen (FW I bis FW III) acht Züchtungsjahrgänge. Aus Vorarbeiten der Abteilung Waldgenressourcen der NW-FVA gehen vor Beginn des Verbundprojektes zwei Kreuzungsjahrgänge hervor. Tabelle 1 enthält

Tabelle 1

Übersicht über das Kreuzungsprogramm im FastWOOD TP1 nach Projektphasen und Züchtungsjahrgängen

Projektphase	Jahr	♀	♂	Kreuzungen	Nachkommen-schaften	Nachkommen	VP1	VP2
NW- FVA	2007	12	12	35	35	17.493	456	405
	2008	9	9	71	18	89	150 ¹	52
FastWOOD I	2009	29	18	86	40	4.902	452	228
	2010	18	10	54	32	2.887	95	30
	2011	16	16	45	25	2.952	287	287
FastWOOD II	2012	22	17	48	14	2.300	157	137
	2013	22	19	69	37	1.850	189	15
	2014	17	9	47	17	1.080	181	15
FastWOOD III	2015	13	13	34	8	1.110	43	43
	2016	6	2	24	2	43	10	10
	2017	–	–	–	–	–	–	–
Gesamt		164	125	513	228	34.706	1.870	1.222

VP = Vorprüfung
¹ Nachkommen plus zusätzlich evaluierte Altklone

einen Überblick über die Gesamtanzahl der erfolgten Kreuzungen.

In der Begriffsverwendung wird im Folgenden wie bei Grotehusmann et al. (2015, 2017) verfahren. Als Klon wird allgemein ein vegetativ vermehrter Genotyp verstanden. Mit dem Begriff Sorte werden nach FoVG oder Sortenschutzgesetz zugelassene und mit einem Namen versehene Klone bezeichnet.

Die Abteilung Waldgenressourcen der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt besitzt die älteste und umfangreichste deutsche Klonsammlung der Gattung *Populus* mit insgesamt fast 1.800 Klonen in Populeten, Sortenschauen und ehemaligen Versuchsflächen. Die Klone wurden nach eingehender Bewertung entweder für eine direkte Prüfung auf Kurzumtriebseignung ausgewählt (Serie 603), oder als Elternbäume bei den gezielten Kreuzungen (Serien 605 und 606) verwendet. Auch freie Abblüten von vielversprechenden oder bereits bewährten Elternbäumen (Serie 604) wurden in die Prüfung mit einbezogen. Nach Elternschaftsanalysen konnten bei einem Großteil dieser Nachkommen die Väter mittels genetischer Analysen zugeordnet werden. In allen vier Serien konnte bei sechs Individuen keine Zuordnung der Väter erfolgen, diese sind weiterhin als freie Abblüte bezeichnet. Durch intensive Kontaktpflege mit Instituten in Kanada, den USA und der Volksrepublik China konnten frische Pollen erhalten und in gelenkte Kreuzungen mit einbezogen werden. Die zur Erweiterung der Materialbasis verwendeten Kreuzungspartner wurden prioritär nach ihrer Eignung für den Kurzumtrieb ausgewählt. Es wurden sowohl inter- als auch intrasektionelle Kreuzungen durchgeführt. Für jede Kreuzungsserie wurden im Frühjahr sowohl männliche als auch weibliche Blühreiser mit Hilfe einer Hebebühne oder mit einer mittels Armbrust über die abzusägenden Äste beförderten Sägekette (Janßen et al., 1992) geerntet. Die weiblichen Blühreiser wurden zunächst nach einem Verfahren der Universität von Minnesota bewurzelt (McMahon et al., 2011), da nur so eine ausreichende Nährstoffversorgung der Früchte und somit das vollständige Ausreifen der Samen gewährleistet wird. Die Reifung der männlichen Blüten erfolgte in Vasen mit Wasser. Insgesamt standen der NW-FVA zur Durchführung der gezielten Kreuzungen bis zu 34 Kreuzungskabinen zur Verfügung. Nach Wurzelbildung und vor Blütenöffnung wurden die weiblichen Blühreiser auf die Kabinen verteilt, die jeweils einem Pollenspender zugeordnet wurden. Die Bestäubung der weiblichen Blüten mit dem gesammelten Pollen fand über die gesamte Blütezeit hinweg einmal täglich mit Hilfe eines Pinsels statt. Die hieraus gewonnenen Nachkommen wurden bereits im Jahr der Kreuzung in Beetkästen gepflanzt und hinsichtlich ihrer Wuchseigenschaften und Rosttoleranz evaluiert. Die selektierten Individuen wurden verklont und in zwei weiteren Vorprüfungen einer Auswahl unterzogen. Die vielversprechendsten Klone wurden in Feldversuchen zur Anbauprüfung getestet. Weitere Details zum Verfahren der gelenkten Kreuzungen mit Pappeln an der NW-FVA finden sich bei Borschel et al. (2015).

2.2 Versuchsserien im FastWOOD TP1

2.2.1 Versuchsflächen

Um verlässliche Aussagen über das Ertragsniveau und die Rosttoleranz der Klone zu erhalten, wurden die Feldversuche als Versuchsserien angelegt, die mehrere Versuchsflächen auf unterschiedlichen Standorten nach einheitlichem Muster und mit gleichem Prüfgliedsatz beinhalten. Die Feldversuche wurden nach Vorgaben des forstgenetischen Versuchswesens und in Ausrichtung nach Bewirtschaftungsbedingungen der Praxis angelegt.

Tabelle 2 enthält einen Überblick über die Klone, die in den vier Versuchsserien im Feldanbau geprüft wurden. Es wurden vorrangig inter- und intraspezifische Kreuzungen der Sektionen *Tacamahaca* und *Aigeiros* vorgenommen.

Bei der Serie 603 handelt es sich überwiegend um Kreuzungen aus den Jahren 1985 bis 1990. Diese konnten zum Teil aus dem Züchtungsprogramm des Forschungsinstitutes für schnellwachsende Baumarten übernommen werden. Die Versuchsserie 604 beinhaltet weitgehend Nachkommen aus freier Abblüte von Mutterbäumen in Populeten aus dem Sachgebiet Erhaltung forstlicher Genressourcen der Abteilung Waldgenressourcen. Die Versuchsserien 605 und 606 enthalten erstmalig überwiegend Genotypen aus gelenkten Kreuzungen. Über alle Serien hinweg stellen Hybriden der interspezifischen Kreuzungen von *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* den größten Anteil dar. In Serie 603 ist zudem eine größere Anzahl von reinen *P. trichocarpa* Klonen geprüft worden. In der Versuchsserie 606 sind von quantitativer Bedeutung noch die Kreuzungen *P. trichocarpa* × *P. maximowiczii* hervorzuheben. Klone mit Namen, also Sorten, die in den Kreuzungskombinationen enthalten sind, sind in Tabelle 2 separat aufgelistet. Hierzu zählen Altklone und Sorten, die im Praxisanbau weit verbreitet sind (Erhebung zur Versorgungssituation von forstlichem Vermehrungsgut im Bundesgebiet, 2018). Es handelt sich mit 'Max 1', 'Hybride 275' und 'AF2' um den Prüfgliedsatz, der im ProLoc Verbundvorhaben auf 54 Versuchsflächen getestet wurde (Amthauer Gallardo, 2014; Janßen et al., 2017). Grotehusmann et al. (2015, 2017) geben eine Übersicht über die Prüfung der Serien 603 und 604 sowie die Evaluierung der einzelnen Prüfglieder. Als Kontrollgruppe wurden in den Auswertungen von Grotehusmann et al. (2017) stets 'Hybride 275' und 'Max 1' verwendet. Da 'Max 1' im Praxisanbau den am weitesten verbreiteten Klon darstellt, wird in dieser Arbeit ausschließlich 'Max 1' als Kontrolle verwendet.

Die Verteilung der Versuchsflächen sollte ein möglichst breites standörtliches Spektrum mit verschiedenen Boden- und Klimaeigenschaften abdecken. Daher wurden die Flächen über das gesamte Bundesgebiet verteilt (Abbildung 1) in sieben Bundesländern angelegt.

In den vier Versuchsserien sind insgesamt 16 Versuchsflächen enthalten. Die Klimacharakteristika reichen von küstennahen Standorten mit atlantisch geprägtem Klima, atlantisch-kontinental und kontinental geprägten Standorten mit unterschiedlichen Niederschlagsmengen über Mittelgebirgsstandorte mit rauem Klima und subkontinental beeinflussten Lagen bis hin zum feucht-warmen Klima des Oberrheingraben.

Tabelle 2

Übersicht über die Verteilung von Prüfgliedern (PG) auf die Versuchsserien sowie die Kreuzungskombination (KK) und Zugehörigkeit von bekannten Sorten (Altklone)

Serie	Prüfglieder [n]	Art / Kreuzungskombination	Art_ID	PG je KK [n]	Gruppe enthält
603	41	<i>P. deltooides</i> × <i>P. nigra</i> (= <i>P.</i> × <i>canadensis</i>)	PDN	2	'Robusta', 'AF 2'
		<i>P. maximowiczii</i>	PM	1	
		<i>P. maximowiczii</i> (freie Abblüte)	PMFA	1	
		(<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. berolinensis</i>) × <i>P. trichocarpa</i>	PMBT	1	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	PMT	14	'Androscoggin', 'Hybride 275', 'Matrix-Klone'
		<i>P. nigra</i> × <i>P. laurifolia</i>	PNLf	1	
		<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PNM	3	'Max 1', 'Max 3'
		(<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>) × <i>P. maximowiczii</i>	PNMM	1	
		<i>P. trichocarpa</i>	PT	12	'Weser 4', 'Weser 6', 'Muhle Larsen', 'Trichobel'
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltooides</i>	PTD	2	
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. koreana</i>	PTK	1	
(<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. koreana</i>) × <i>P. maximowiczii</i>	PTKM	2			
604	25	<i>P. deltooides</i>	PD	2	
		<i>P. deltooides</i> × <i>P. nigra</i> (= <i>P.</i> × <i>canadensis</i>)	PDN	1	'AF 2'
		<i>P. maximowiczii</i>	PM	1	
		<i>P. maximowiczii</i> (freie Abblüte)	PMFA	1	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	PMT	17	'Hybride 275'
		<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PNM	1	'Max 1', 'Max 3'
		<i>P. trichocarpa</i>	PT	2	'Muhle Larsen', 'Brühl 8'
605	36	<i>P. alba</i>	PA	1	'Villafranca'
		<i>P. deltooides</i> × <i>P. nigra</i> (= <i>P.</i> × <i>canadensis</i>)	PDN	1	'AF 2'
		<i>P. maximowiczii</i> (freie Abblüte)	PMFA	2	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. nigra</i>	PMN	2	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	PMT	25	'Hybride 275', 'Matrix 49'
		<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PNM	1	'Max 1'
		<i>P. trichocarpa</i>	PT	1	'Muhle Larsen'
		(<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. deltooides</i>) × <i>P. maximowiczii</i>	PTDM	2	
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PTM	1	
606	39	<i>P. maximowiczii</i> (freie Abblüte)	PMFA	2	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. nigra</i>	PMN	1	
		<i>P. maximowiczii</i> × <i>P. trichocarpa</i>	PMT	15	'Hybride 275', 'Matrix 11'
		<i>P. nigra</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PNM	1	'Max 1'
		<i>P. szechuanica</i> × <i>P. trichocarpa</i>	PSzT	3	
		<i>P. trichocarpa</i>	PT	5	
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. cathayana</i>	PTC	1	
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. maximowiczii</i>	PTM	10	
		<i>P. trichocarpa</i> × <i>P. ussuriensis</i>	PTU	1	

Sämtliche Versuchsflächen in FastWOOD wurden einer detaillierten Standortkartierung nach den Vorgaben der Ad-Hoc-AG Boden (2005) und der AG Forsteinrichtung und des Arbeitskreises für Standortkartierung (2003) unterzogen. Die Versuchsflächen wurden zu Versuchsorten zusammengefasst, da einige Flächen aus unterschiedlichen Serien unmittelbar benachbart sind. So wurden z. B. die Flächen 006 Wallstawe I und 012 Wallstawe II in einer Kartierung und einem Kartierwerk erfasst. Je Versuchsort wurden mindestens zwei Einschläge mit einem Bagger angelegt. Die Profilgruben wurden nach den Richtlinien der Bodenzustandserhebung im Wald II (BZE II) nach Wellbrock (2006) aufgenommen. Zur

Bestimmung bodenphysikalischer Parameter wie der Lagerungsdichte wurden Stechzylinderproben in den drei Tiefenstufen 0 bis 30 cm, 30 bis 60 cm und 60 bis 90 cm entnommen und im Labor der Abteilung Umweltkontrolle der NW-FVA nach den BZE II Vorgaben des Gutachterausschusses Forstliche Analytik (2009) analysiert. Die Berechnung der nutzbaren Feldkapazität (nFK) erfolgte auf Basis dieser Werte nach dem Verfahren der Ad-Hoc-AG Boden (2005).

Je Versuchsort wurden Standortstypen nach dem Verfahren der niedersächsischen Standortkartierung (Niedersächsisches Forstplanungsamt, 2007; Niedersächsisches Forstplanungsamt und Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und

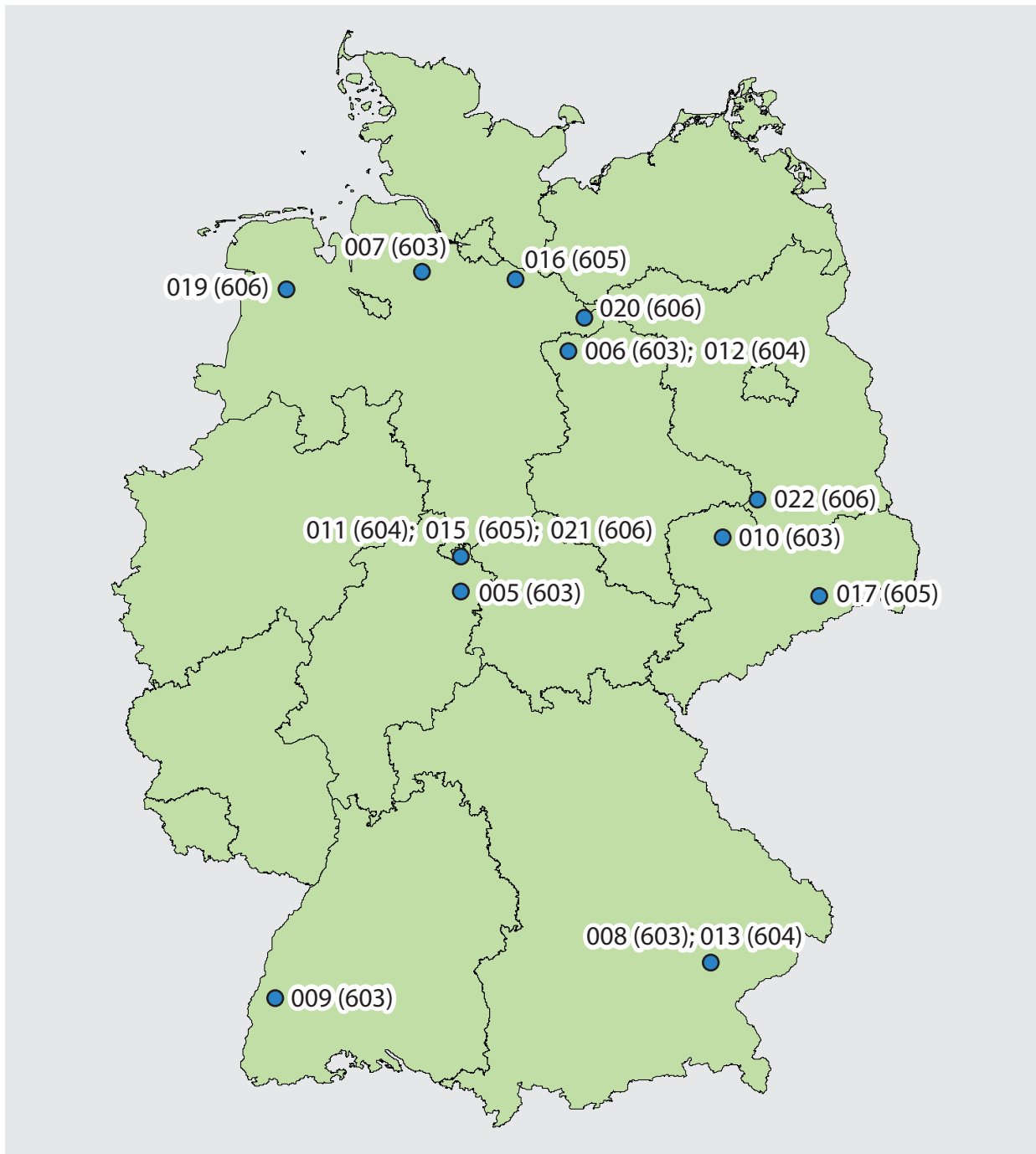


Abbildung 1

Geographische Lage aller im Teilprojekt 1 angelegten Versuchsflächen. Jede Fläche ist mit ihrem zugehörigen Aktenzeichen beschriftet. In Klammern ist die Zugehörigkeit zur Versuchsserie angegeben. Sind Flächen unmittelbar benachbart und aneinander angrenzend, werden diese durch ein Semikolon getrennt angegeben.

ländliche Räume Schleswig-Holstein, 2009a, b) identifiziert und in ihrer räumlichen Ausbreitung in Standortstypenkarten festgehalten. Hierzu wurden auf den Versuchsflächen Pürckhauerbohrungen durchgeführt, die nach Möglichkeit bis zu einer Tiefe von 100 cm bzw. bis zum Ausgangsgestein sondieren sollten. Die Verteilung der Bohrungen richtete sich nach der Ausformung der Versuchsflächen und der Lage der Parzellen im Gelände. Idealerweise sollte in jeder vierten

Parzelle ein Einstich erfolgen, das Netz der Beprobungen konnte auch an die Ausbreitung der Standorttypen angepasst werden. An den Bohrungen wurde die Bodenart bestimmt, zusätzlich wurden für standörtlich homogene Bereiche Mischproben in den Tiefenstufen 0 bis 30 cm, 30 bis 60 cm und 60 bis 90 cm gebildet. Die Mischproben wurden im Labor hinsichtlich bodenchemischer Parameter und Nährstoffgehalte untersucht.

Die Klimadaten in tagesweiser Auflösung von Niederschlag und Temperatur konnten über einen Kooperationsvertrag zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und der NW-FVA bezogen werden. Für die Versuchszeiträume wurden diese Daten von den Niederschlags- und Klimastationen auf die Versuchsstandorte nach den Methoden von Schulla (2017) interpoliert.

Tabelle 3 gibt Informationen zur Begründung der Flächen in den vier Serien, sowie deren standörtliche Eigenschaften wieder.

Die Ansprache des Wasserhaushalts lässt eine positive Beeinflussung der Biomasseleistung erwarten, da bei zahlreichen Standorten eine gute Wasserversorgung vorzufinden war. Das Wasserangebot wurde bereits in zahlreichen Untersuchungen als einer der zentralen ertragsbestimmenden Faktoren für KUP benannt (Ali, 2009; Amthauer Gallardo, 2014; Kröber et al., 2014). Als Kennwert für das pflanzenverfügbare Bodenwasser wurde die nutzbare Feldkapazität zugrunde gelegt. Diese nimmt an den Versuchsorten Bardowick (016) und Herzberg (022) den niedrigsten Wert an, die höchsten

Tabelle 3

Übersicht zu den Eigenschaften der FastWOOD TP 1 Versuchsflächen und deren standörtlichen Bedingungen

VFL	VFL Name	Serie	Bun- des- land	Anlage	Pflanzver- band [m]	Pflanzen- pro Par- zelle [n]	Boden- typ(en)	nFK bis 90 cm [mm]	Wasser- haushalt	Boden- zahl	Rota- tion	Mittlere Nieder- schlagssumme VP [mm]	Mittlere Tagestempe- ratur VP [°C]
005	Stölzingen	603	HE	Apr 10	1,8 m x 0,5 m	48	Braunerde / Rendzina	84-139	frisch; einge- schränkt frisch	53 ¹	1	402,01 (± 48,27)	15,24 (± 0,36)
											2	394,13 (± 68,48)	15,43 (± 0,3)
006	Wallstawe I	603	ST	Apr 10	1,8 m x 0,5 m	48	Pseudogley	137-150	Stauwasser	39 ²	1	352,1 (± 61,24)	15,79 (± 0,23)
											2	323,16 (± 23,73)	15,95 (± 0,19)
007	Anderlingen	603	NI	Apr 10	1,8 m x 0,5 m	48	Pseudogley / Gley	139-180	Grundwasser- anschluss	37 ³	1	354,4 (± 45,62)	15,46 (± 0,22)
											2	350,15 (± 11,93)	15,64 (± 0,37)
008	Lehmbach I	603	BY	Apr 10	1,8 m x 0,5 m	48	Pseudogley	153-215	Hang-, Stauwasser	59	1	529,46 (± 70,11)	15,97 (± 0,57)
											2	456,82 (± 103,21)	16,19 (± 0,74)
009	Emmendingen	603	BW	Apr 10		48	Kalkpaternia / Kolluvisol	184-231	Grundwasser- anschluss	71	1	429,11 (± 54,74)	16,77 (± 0,48)
					1,8 m x 0,5 m						2	402,4 (± 125,98)	17,16 (± 0,64)
010	Thammenhain	603	SN	Apr 10		48	Pseudogley / Braunerde	151-213	Stauwasser	40	1	403 (± 84,97)	16,14 (± 0,36)
					1,8 m x 0,5 m						2	341,31 (± 59,22)	16,29 (± 0,21)
011	Stiedenrode I	604	HE	Apr 11		48	Kolluvisol / Pa- raabraunerde	209	nachhaltig frisch	65	1	349,66 (± 12,29)	15,63 (± 0,12)
					2,0 m x 0,5 m						2	340,04 (± 77,69)	16,06 (± 0,56)
012	Wallstawe II	604	ST	Apr 11		48	Pseudogley	137-150	Stauwasser	39 ²	1	321,61 (± 42,42)	15,9 (± 0,13)
					1,8 m x 0,5 m						2	301,22 (± 52,72)	16,37 (± 0,73)
013	Lehmbach II	604	BY	Apr 11		48	Pseudogley	153-215	Hang-, Stauwasser	53	1	503,58 (± 23,01)	16,13 (± 0,28)
					1,8 m x 0,5 m						2	457,7 (± 102,71)	16,44 (± 0,71)
015	Stiedenrode II	605	HE	Apr/Mai 13		48	Pseudogley	208-211	nachhaltig frisch	62	1	368,41 (± 59,52)	15,64 (± 0,19)
016	Bardowick	605	NI	Apr/Mai 14	2,0 m x 0,5 m	48	Podsol / Regosol	91-128	Grundwasser- anschluss	22	1	300,83 (± 50,07)	16,24 (± 0,76)
017	Graupa	605	SN	Mai 13	2,0 m x 0,5 m	48	Braunerde	131	mäßig frisch	n.v.	1	378,57 (± 73,47)	16,46 (± 0,42)
019	Augustfehn	606	NI	Mrz 15	2,0 m x 0,5 m	24	Podsol / Hoch- moor mit Tie- fenumbruch	139-180	Grundwasser- anschluss	30 ³	1	359,28 (± 74,41)	15,99 (± 0,76)
020	Siemen	606	NI	Apr 15	2,0 m x 0,5 m	24	Podsol	124-168	Grundwasser- anschluss	33	1	321,93 (± 92,39)	16,33 (± 0,8)
021	Stiedenrode III	606	HE	Apr/Mai 15	2,0 m x 0,5 m	24	Pseudogley	208-211	nachhaltig frisch	61 ¹	1	347,73 (± 90,82)	16,17 (± 0,45)
022	Herzberg	606	BB	Mai 15	2,0 m x 0,5 m	24	Gley	110-164	Grundwasser- anschluss	34	1	299,24 (± 45,2)	16,9 (± 0,57)

Je Versuchsfläche sind die Bodentypen, die nutzbare Feldkapazität (nFK), eine Beschreibung des Wasserhaushalts sowie die Bodenzahl angegeben. Zur Markierung der Bodenzahlen: ¹ gemittelt, ² geschätzt, ³ Grünlandzahl. Die Klimavariablen gelten je Versuchsort, für die Orte der Serien 603 und 605 sind diese Angaben nach erster und zweiter Rotation getrennt. VP = Vegetationsperiode.

Werte wurden an den drei Standorten in Stiedenrode (011, 015 und 021) und Emmendingen (009) berechnet. Hinsichtlich der Bodenzahl sind die Standorte überwiegend mittlerer Güte. Den höchsten Wert weist hier erneut Emmendingen auf, den niedrigsten wiederum Bardowick. In Bezug auf das Klima sind in Tabelle 3 die mittleren Niederschlagssummen und die mittlere Tagestemperatur über die Vegetationsperioden der Versuchsjahre dargestellt. Für die Serien 603 und 604 sind diese Ergebnisse getrennt nach Rotationen dargestellt. Die höchsten Niederschlagssummen wurden in der ersten Rotation in Lehmbach I (008) festgestellt, die niedrigsten in Herzberg. Für die Tagestemperaturen liegt Emmendingen in der zweiten Rotation erneut an der Spitze, die niedrigsten Temperaturen wurden für Stölzingen (005) in der ersten Rotation ermittelt.

Für die Flächen Thammenhain (010), Stiedenrode II (015), Bardowick (016) und Stiedenrode III (021) bestanden Schwierigkeiten nach der Versuchsanlage. Auf drei Standorten stellte der hohe Beikrautdruck nach der Pflanzung ein Wachstumshemmnis dar. In Stiedenrode II und III sowie in Bardowick kam die sehr trockene Witterung während der Flächenbegründung erschwerend hinzu. In Bardowick waren die Ausfälle so groß, dass die Neuanlage der Fläche im darauffolgenden Jahr (2014) erforderlich wurde. Bei der Fläche Bardowick handelt es sich um ein ehemaliges Rieselfeld.

2.2.2 Versuchsdesign, Aufnahmehethodik und Datenauswertung

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über das Versuchsdesign, die Aufnahmehethodik und die statistische Auswertung im FastWOOD TP1 gegeben. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in Grotehusmann et al. (2015, 2017). Die Versuchsflächen aller Serien wurden nach einheitlichem Muster als unvollständige Blockanlagen (Dreisatzgitter) umgesetzt. In den Serien 603, 604 und 606 wurden die Prüfglieder in sechsfacher Wiederholung ausgebracht, in Serie 605 in fünffacher Wiederholung. Die Parzellengrößen und die Pflanzverbände sind in Tabelle 3 enthalten. Die Aufnahmen im Feld erfolgten jährlich im Sommer (Pathogene) und im Winterhalbjahr (Ausfälle, Zuwachs). Alle Flächen wurden in dreijähriger Umtriebszeit bewirtschaftet. Die Biomasseleistung wurde zum Ende jeder Umtriebszeit ermittelt. Dazu wurden klon- und versuchsweise allometrische Biomassefunktionen parametrisiert, um nicht alle Individuen in den Parzellen wiegen zu müssen. Der Ansatz folgt den Vorschlägen von Röhle (2009) und Hartmann (2010). Basierend auf den Einzelbaummassen wurde parzellenweise die Biomasse berechnet, auf einen Hektar bezogen und durch die Länge der Umtriebszeit (3 Jahre) geteilt. Dadurch ergibt sich der parzellenweise durchschnittliche Gesamtzuwachs in $t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$.

Zur Auswertung der Serien wurde ein zweiphasiger Ansatz verwendet, der zunächst die einzelflächenweise Auswertung mit gemischten linearen Modellen vorsieht (vgl. Grotehusmann et al., 2015, 2017; Möhring und Piepho, 2009). Aus den Einzelflächenmodellen werden die um den Blockfehler bereinigten Prüfgliedmittelwerte in einer zweiten Phase mit einem gemischten linearen Modell innerhalb der Serie

flächenübergreifend analysiert. Für die Serien 603 und 604 sind die Ergebnisse der serienweisen Verrechnung in Grotehusmann et al. (2015, 2017) enthalten. Für die Serien 605 und 606 ist die serienweise Auswertung des Ertrags als dGZ in den Ergebnissen (s. u.) beschrieben.

Das einzelversuchsweise gemischte lineare Modell wird wie folgt formuliert:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijk}$$

y_{ijk} ist der Beobachtungswert einer Parzelle von Prüfglied i , in Wiederholung j und Block k . μ ist das Gesamtmittel, α_i ist der Effekt des Prüfglieds i , β_j ist der Effekt der j -ten Wiederholung, γ_k ist der Effekt des Blocks k und ε_{ijk} ist der Restfehler (Residuen). α_i ist der einzige feste Effekt, der Einfluss von Wiederholung und Block und der Restfehler werden als Zufallseffekte behandelt (Piepho et al., 2003).

Da in Serie 603 nach der ersten Rotation wegen zu großen Aufwands nicht alle Prüfglieder fortgesetzt gemessen wurden, erfolgte eine Neuauswertung dieser Versuche als Anlage mit randomisierten vollständigen Blöcken (Grotehusmann et al., 2017). Der Effekt γ_k fällt damit aus dem obig formulierten Modell heraus, der Bezug von Beobachtungswert und Restfehler passt sich entsprechend an. Basierend auf den versuchsweise parametrisierten Modellen wurden die um den Wiederholungs- und Blockeffekt bereinigten Prüfgliedmittelwerte berechnet und für die folgenden Darstellungen verwendet. Für die Pathogenuntersuchungen wurde der einzelbaumweise Befall mit Blattrost auf Parzellenebene gemittelt und für die Darstellungen entsprechend aggregiert (s. u.).

Zur statistischen Analyse wurde die Programmiersprache R (R Core Team, 2018) benutzt. Die Parametrisierung der gemischten Modelle erfolgte mit dem nlme Paket (Pinheiro et al., 2018). Die Modellannahmen der Normalverteilung und der Homoskedastizität der Residuen wurden mit QQ-Plots und der Darstellung der standardisierten Residuen insgesamt und je Wiederholung bzw. Block über den geschätzten Werten geprüft (hier nicht dargestellt). Bei Verletzung der Modellannahmen (keine Normalverteilung der Daten, Heteroskedastizität) wurde eine Transformation der abhängigen Variablen geprüft. Besonders für niedrige Werte in der ersten Rotation konnten Quadratwurzel- oder Log-Transformation die Verteilung der Werte verbessern. Zur besseren Interpretierbarkeit und Vergleichbarkeit wurden die Ergebnisse dann rücktransformiert.

Die um die Blockeffekte bereinigten Prüfgliedmittelwerte wurden mit dem Paket emmeans (Lenth, 2018) in Anlehnung an die LSMEANS Routine von SAS berechnet. Die flächenweisen Prüfgliedmittel wurden dann in einem weiteren linearen gemischten Modell flächenübergreifend innerhalb der Serien ausgewertet. Das Modell wurde entsprechend der folgenden Formel parametrisiert

$$y_{ij} = \mu + \gamma_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

y_{ij} ist der Ertrag des Prüfglieds i am Standort j , μ ist das Gesamtmittel der Versuchsserie, γ_i ist der Effekt von Prüfglied

i, β_j ist der Effekt des Standorts j und ε_{ij} ist der Restfehler. Der Standorteffekt β_j sowie der Restfehler ε_{ij} sind Zufallseffekte, der Einfluss des Genotyps γ_i wird als fester Effekt behandelt. Die Prüfgliedmittel aus der einzelversuchsweisen Auswertung wurden mit dem Kehrwert des Standardfehlers in der flächenübergreifenden Analyse gewichtet (vgl. Grotehusmann et al., 2015, 2017; Möhring und Piepho, 2009). Die Prüfgliedmittelwerte wurden zur Analyse wurzeltransformiert und dann für die Interpretation der Ergebnisse rücktransformiert. Basierend auf dem flächenübergreifenden Modell wurden je Serie Post-hoc-Tests durchgeführt, indem die Prüfgliedmittel mit dem Mittel der Kontrolle 'Max 1' verglichen wurden. Die Vergleiche wurden mit dem Paket emmeans (Lenth, 2018) durchgeführt, für die Vergleiche mit der Kontrolle wurden Dunnett Kontraste verwendet. Die Adjustierung der p-Werte erfolgte mit der Sidak Methode. Die den Vergleichen zugrundeliegende Fragestellung wurde einseitig formuliert, d. h. dass geprüft wurde, ob die Prüfgliedmittel statistisch signifikant größer sind als der 'Max 1'-Mittelwert.

Die Abbildungen 2 bis 5 wurden mit dem Paket ggplot2 erstellt (Wickham 2009). Die verwendeten Boxplots stellen am Strich in den Boxen den Median dar. Die oberen und unteren Grenzen der Boxen markieren den Interquartilabstand. Die Striche an den Boxen schließen Werte bis zum anderthalbfachen des Interquartilabstands ein. Werte außerhalb werden durch einzelne Punkte gekennzeichnet. Anderweitige Markierungen sind zu den jeweiligen Abbildungen erläutert.

Für die Daten zum Rostbefall und zur Ertragsleistung wurde getrennt nach Serien eine Varianzkomponentenanalyse durchgeführt. Die Auswertung erfolgte mit dem R Paket VCA (Schuetzenmeister und Dufey, 2017). Die Rostbefallsdaten wurden für diese Analyse arcsin-wurzeltransformiert. Das Modell für die Varianzkomponentenanalyse der Rostbefallsdaten wurde dem Modell von Yan (2014, Equation 1.4) folgend parametrisiert:

$$y_{ijkrs} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkrs}$$

y_{ijkrs} ist der Beobachtungswert einer Parzelle für Klon i am Standort j in Wiederholung r im Block s im Jahr k . μ ist das Gesamtmittel der Versuchsserie, α_i ist der Effekt des Prüfglieds i , β_j ist der Effekt des j -ten Standorts, γ_k ist der Effekt des Jahres k . In Klammern sind die Interaktionen der genannten Faktoren angegeben und ε_{ijkrs} ist wiederum der Restfehler (Residuen). Für die Varianzkomponentenanalyse der Ertragsdaten fiel der Faktor Jahr sowie alle Interaktionen an denen dieser Faktor beteiligt ist aus dem Modell. Die Analyse wurde hier getrennt nach Umtriebszeiten durchgeführt.

2.2.3 Pathogenuntersuchungen

Bereits ab dem jeweiligen Anlagejahr begann das Pathogen-Monitoring aller auf den Versuchsflächen der vier Serien befindlichen Klone (Tabelle 2). Das Hauptaugenmerk lag dabei auf der Kontrolle der Befallsstärke mit dem Pappelblattrost *Melampsora larici-populina*. Aufgrund des Entwicklungszyklus des Pilzes (siehe Fey-Wagner et al., 2012) wurden

die Bonituren jährlich, Ende August/Anfang September durchgeführt. Für die Erfassung der Befallsstärke wurde ein vom INBO (Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Belgien) und der INRA (Institute National de la Recherche Agronomique, Frankreich) entwickeltes und für die Belange des Verbundprojektes optimiertes Bewertungsschema (Tabelle 4) angewendet. Die Charakterisierung des Befallsgrades erfolgt über eine Baumbonitur bei der die Stärke des Blattrostbefalls anhand des Schadbildes der gesamten Pflanze eingeschätzt und in Befallsintensitäten übersetzt wird (Tabelle 4). In den ersten beiden Beobachtungsjahren wurden zwei Bewertungsschemata getestet. Als besser für die Belange des Verbundprojektes stellte sich das Baumboniturschema (Tabelle 4) heraus. Da in den ersten beiden Beobachtungsjahren beide Boniturschemata getestet wurden, wurde für die Serie 603/604 in den Jahren 2010/2011 parzellenweise eine Gesamtansprache durchgeführt. In den folgenden Jahren erfolgte an vier festgelegten Pflanzplätzen je Parzelle die Charakterisierung des Befallsgrades. Die parzellenweise Stärke des Rostbefalls wurde aus diesen Werten gemittelt. So wurden auf den Versuchsflächen der hier beschriebenen vier Serien jährlich bis zu 14.744 Bäume in 3.186 Parzellen auf den Befallsgrad mit Pflanzenpathogenen hin bonitiert. Mit *Melampsora larici-populina* befallene Blätter wurden während der Bonituren geerntet und die Uredosporen für weitere Untersuchungen in flüssigem Stickstoff gelagert.

Tabelle 4

Boniturschema für Pappelblattrost (*Melampsora larici-populina*)

Bonitur-note	Beschreibung	Befalls-rate [%]
1	keine Uredinien	0
1,25	am ganzen Baum nur ein paar Uredinien, schwer zu finden	12,5
1,5	schwache Infektion der Blätter bis in 25 % der gesamten Baumhöhe	25
2	leicht zu detektierende Infektion der Blätter bis in 50 % der gesamten Baumhöhe, darüber schwer zu finden, aber vorhandene Infektion	50
2,5	Infektion der Blätter bis in 75 % der gesamten Baumhöhe	75
3	Infektion des gesamten Baumes, aber Blätter sind noch nicht verbräunt	
3,5	Infektion des gesamten Baumes und beginnende Verbräunung der unteren Blätter	
4	Infektion des gesamten Baumes, Verbräunung der unteren 25 % der Blätter	
4,5	Infektion des gesamten Baumes, Verbräunung der unteren 50 % der Blätter und beginnender Blattverlust	100
5	starke Infektion des gesamten Baumes, bis zu 50 % Blattverlust	
5,5	starke Infektion des gesamten Baumes, bis zu 80 % verbräunte/abgefallene Blätter, nur wenige an der Triebspitze noch grün	
6	alle Blätter tot/abgefallen	

3 Ergebnisse

3.1 Ertrag

Abbildung 2 enthält einen Überblick über den mittleren durchschnittlichen Gesamtzuwachs (dGZ) je Prüfglied je Versuchsfläche getrennt nach Rotation (Mittelwert wie beschrieben als LSMEAN aus einzelversuchsweiser Auswertung).

Die Versuchsflächen der Serie 603 und 604 konnten im Mittel deutliche Ertragszunahmen von der ersten zur zweiten Rotation verbuchen. In Serie 604 fiel der Anstieg von 4,71 auf 11,7 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ etwas größer aus als in Serie 603 mit 5,23 auf 10,7 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$. Im Vergleich mit den Serien, in denen bisher nur eine Rotation gemessen wurde, fällt das schlechte Abschneiden der Serie 605 mit durchschnittlich 2,62 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ auf. Die Serie 606 zeigt sich dagegen in der ersten Rotation am ertragsstärksten mit 6,14 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ im Mittel über alle Prüfglieder und Versuchsflächen.

In der Serie 603 ist in der ersten Rotation eine deutliche Differenzierung der Versuchsflächen hinsichtlich des dGZ erkennbar. Die Fläche Thammenhain (010) schneidet mit 0,75 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ am schlechtesten im Vergleich über alle Serien hinweg ab. Interessant ist die enorme Ertragssteigerung in der zweiten Rotation auf 8,55 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ im Mittel. Im Vergleich erreicht die Fläche damit dennoch erst ein Ertragsniveau, das in Emmendingen (009: 8,03 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$) und Lehmbach I (008: 9,01 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$) bereits in der ersten Rotation erreicht wurde. Lediglich Anderlingen (007) konnte in der Rangfolge überholt werden mit einem dGZ in der ersten Rotation von 1,93 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ und in der zweiten Rotation von 5,15 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$. Grotehusmann et al. (2017) weisen bereits darauf hin, dass diese Fläche für den Kurzumtrieb

ungeeignet sei. Die beiden Flächen Lehmbach I und Emmendingen erzielten die höchsten Erträge in der ersten Rotation, wurden jedoch in der zweiten Umtriebszeit von Wallstawe I (006), die in der ersten Rotation mit 4,81 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ an vierter Stelle und unter dem Serienmittel lag, überholt (006: 15,04 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$). Die Versuchsfläche Stölzingen (005) schnitt in beiden Umtriebszeiten mit einem überdurchschnittlichen Ertrag von 7,01 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ bzw. 11,76 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ ähnlich ab.

Es fällt auf, dass in Anderlingen (007) und Thammenhain (010) 'Max 1' nahe am Versuchsmittel oder sogar darüber liegt. Auf allen anderen Standorten ist dagegen in beiden Rotationen ein Großteil der Prüfglieder deutlich wüchsiger als 'Max 1'.

In der Serie 604 mit Prüfgliedern aus überwiegend freier Abblüte zeigt sich in der ersten Rotation zwischen den Versuchsflächen ein homogeneres Bild als in Serie 603: Stiedenrode I (011) brachte mit im Mittel 6,02 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ die höchsten Erträge hervor, gefolgt von Lehmbach II (013) mit 4,87 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ und Wallstawe II (012) mit dem niedrigsten Ertragsniveau von 3,26 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$. Zur zweiten Rotation weist Wallstawe II (012) eine ähnliche Ertragsdynamik wie ihre Nachbarfläche Wallstawe I (006) auf. Die Steigerung auf 12,22 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ versetzt diese Fläche an die Spitze der jetzt umgekehrten Rangfolge, gefolgt von Lehmbach II (013) mit 11,87 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$ und Stiedenrode I (011) mit 10,96 t_{atro} $ha^{-1} a^{-1}$. Unter praktischen Gesichtspunkten handelt es sich hier um keine deutlichen Differenzen. Die Leistungsunterschiede der Spitzenprüfglieder fallen jedoch deutlicher aus. Auffällig ist jedoch die breite Streuung der Prüfgliedererträge an allen drei Standorten, die in der zweiten Rotation deutlich zugenommen hat. Während in der ersten Rotation die Differenzen zu 'Max 1' in Stiedenrode I

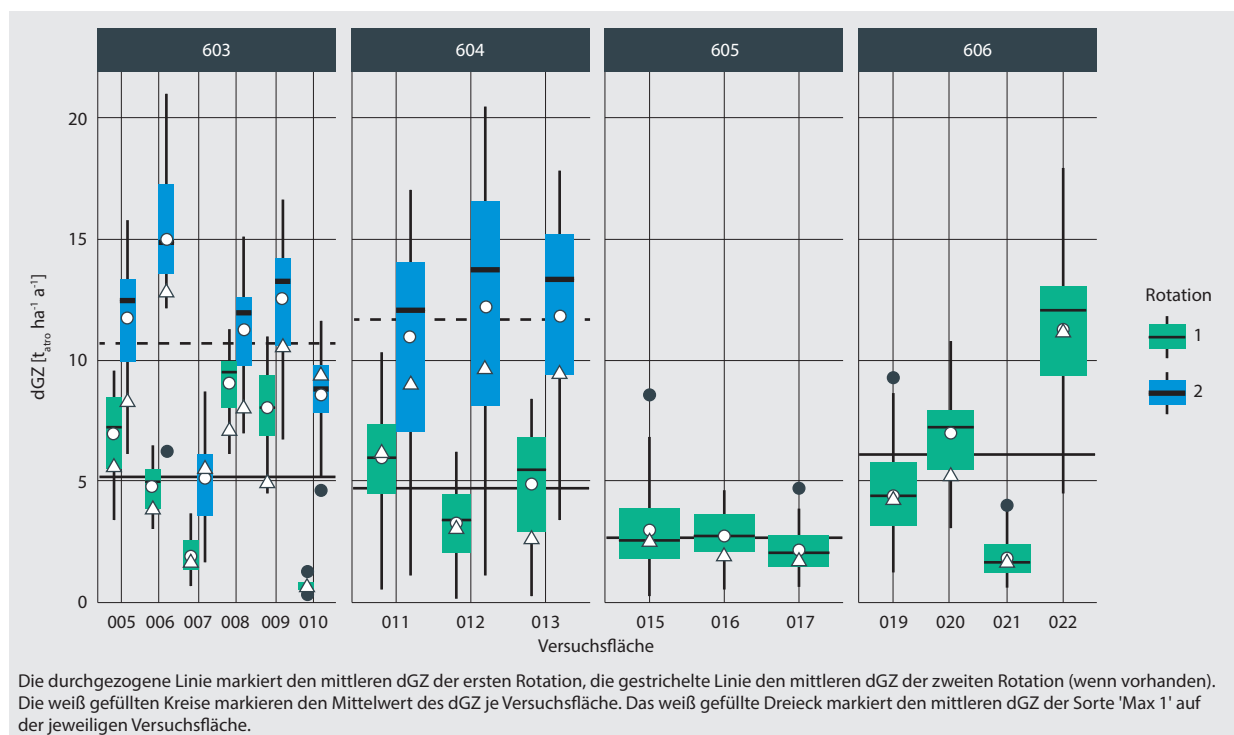


Abbildung 2

Ertrag als dGZ der Prüfglieder auf den Versuchsflächen der Serien 603 bis 606

und Wallstawe II noch gering waren, konnte bei mehreren Prüfgliedern in der zweiten Rotation eine deutlich positive Abweichung zur Kontrolle festgestellt werden.

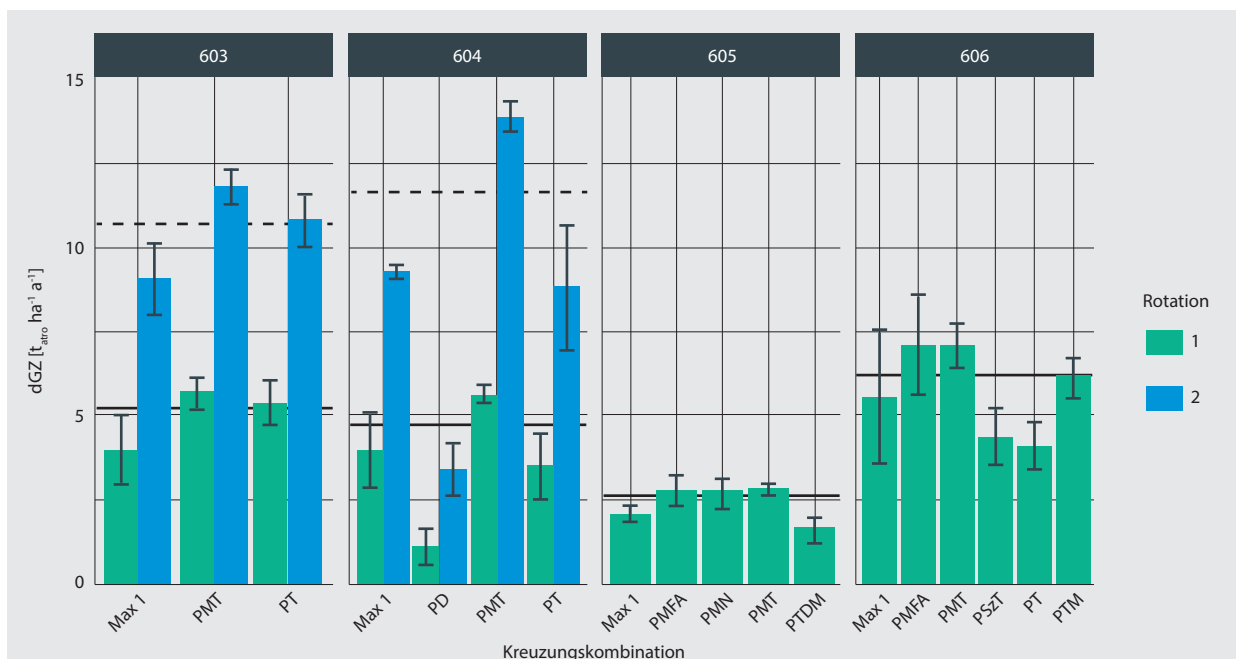
Serie 605 mit den ersten gelenkten Kreuzungen im Feldanbau weist vergleichsweise geringe Unterschiede im dGZ der ersten Rotation zwischen den Versuchsflächen auf. Stiedenrode II (015) liegt an erster Stelle mit $2,96 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gefolgt von Bardowick (016) mit $2,74 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Graupa (017) mit $2,14 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Auf allen drei Flächen ist eine geringe Streuung der Prüfgliedmittel festzustellen, die in Stiedenrode II noch am höchsten ist. Einzelne Prüfglieder schneiden hier im Vergleich zu 'Max 1' deutlich besser ab. Die Differenz vom Gesamtmittel zu 'Max 1' ist in Bardowick (016) am größten.

Deutliche Unterschiede zwischen den Standorten und Prüfgliedern sind in der ersten Rotation der Serie 606 zu beobachten. Der Standort Herzberg (022) liegt mit einem mittleren dGZ von $11,25 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ erheblich über dem Seriennittel und weist damit von allen Versuchen serienübergreifend den höchsten Ertrag auf. Auffällig ist, dass hier auch die größte Streuung vorliegt und dass 'Max 1' mit dem Versuchsmittel fast gleichauf liegt. Die Versuchsfläche Siemen (020) liegt mit mittleren $7,00 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ ebenfalls über dem Seriendurchschnitt. Im Gegensatz zu Herzberg ist hier ein Großteil der Prüfglieder 'Max 1' überlegen. Die Versuchsflächen Augustfehn (019) mit $4,46 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und Stiedenrode III (021) mit $1,86 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ liegen beide unter dem Mittel der Serie und weisen ein ähnliches Abschneiden von 'Max 1' zum Versuchsmittel auf. Die Streuung der Prüfgliedmittel ist in Augustfehn jedoch größer als in Stiedenrode III.

Abbildung 3 enthält eine Darstellung zum Vergleich der Kreuzungskombinationen in und zwischen den Serien. 'Max 1' wurde hier wie für die Rostdaten als Vergleichsprüfglied gesondert dargestellt. Datenbasis für die gebildeten Mittelwerte und deren Standardfehler waren die LSMEANS der einzelversuchsweisen Auswertung.

In Serie 603 schneiden die *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* Kreuzungen (PMT) ähnlich wie die reinen *P. trichocarpa* Klone (PT) ab. In der ersten Rotation liegen beide knapp über dem Seriendurchschnitt (PMT mit $5,68 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und PT mit $5,40 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). In der zweiten Rotation schneiden die PMT Kreuzungen mit $11,81 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ gegenüber $10,82 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ etwas besser ab. 'Max 1' liegt jeweils unter dem Mittelwert der Versuchsflächen.

Die PMT Hybriden zeigen in Serie 604 eine ähnliche relative Ertragsstärke zum Gesamtdurchschnitt, sowohl in der ersten Rotation mit $5,62 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, als auch in der zweiten Rotation mit $13,91 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Anders als in der ersten Serie liegen die *P. trichocarpa* Prüfglieder in der ersten Rotation mit $3,51 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ noch über dem Gesamtmittel, in der zweiten Rotation mit $8,83 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ jedoch deutlich darunter. Reine *P. deltoides* Klone (PD) schneiden in beiden Rotationen stark unterdurchschnittlich ab mit $1,06 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bzw. $3,39 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Der dGZ von 'Max 1' liegt in beiden Rotationen ebenfalls unter dem Gesamtmittel und jeweils auf einem ähnlichen Ertragsniveau wie die Klone der PT Kreuzungen. Die PD Genotypen schneiden in der ersten und zweiten Rotation im Vergleich schlechter als 'Max 1' ab.



Die durchgezogene Linie markiert den mittleren dGZ der ersten Rotation, die gestrichelte Linie den mittleren dGZ der zweiten Rotation (wenn vorhanden). Die Whisker kennzeichnen den Standardfehler des Mittelwerts. Dargestellt sind nur Kreuzungsgruppen, die mit mindestens zwei Prüfgliedern in der Serie vertreten sind. Die Anzahl der enthaltenen Prüfglieder je Kreuzungskombination kann Tabelle 2 entnommen werden. In Serie 603 sind nur die Prüfglieder und Kreuzungskombinationen enthalten, die von Grotehusmann et al. (2017) zum Ende der zweiten Rotation ausgewertet wurden.

Abbildung 3

Ertrag als durchschnittlicher Gesamtwuchs (dGZ) im Mittel der Prüfglieder gruppiert nach Kreuzungskombination getrennt für die Versuchsserien 603 bis 606

Analog zu den geringen Unterschieden zwischen den Standorten zeigen die Kreuzungskombinationen in Serie 605 eine geringe Differenzierung und liegen weitgehend auf einem ähnlich niedrigen Niveau. Die PMT weisen einen schwach überdurchschnittlichen dGZ von 2,81 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ auf. Die Nachkommen von *P. maximowiczii*-Müttern in freier Abblüte (PMFA) erbringen mit 2,73 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ eine ähnliche Biomasseleistung wie die Nachkommen aus *P. maximowiczii* × *P. nigra* Kreuzungen (PMN) mit 2,70 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹. Nachkommen einer *P. (P. trichocarpa* × *P. deltoides*) Mutter mit *P. maximowiczii* Vätern schneiden mit 1,58 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ schlecht ab. 'Max 1' erreicht im Vergleich dazu etwas bessere Erträge, liegt aber mit 2,06 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ auch unter dem Durchschnitt.

Die Kreuzungen in Serie 606 zeigen größere Unterschiede in ihrer Wuchsleistung. PMT und PMFA Kreuzungen liegen mit gemittelten 7,08 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ gleichauf. Der Standardfehler der PMFA Prüfglieder fällt hier wegen der geringeren Anzahl gegenüber PMT größer aus. Reine *P. trichocarpa* Klone sind mit 4,07 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ unterdurchschnittlich, vergleichbar zu den artgleichen Klonen in Serie 604 und schwächer als jene in Serie 603. 'Max 1' liegt in der jüngsten Serie unter dem Durchschnitt mit 5,56 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹. Auffällig ist hier ebenfalls der große Standardfehler, der mitunter in der geringeren Anzahl an Beobachtungen als bei den zusammengefassten Kreuzungskombinationen begründet liegt. Zum Teil spiegeln sich hier jedoch auch die großen Unterschiede zwischen den Standorten in Serie 606 wieder (Abbildung 2).

Tabelle 5 enthält die Ergebnisse der Varianzkomponentenanalyse der Ertragsdaten getrennt nach Serien.

Der Einfluss des Faktors Genotyp ist in Serie 604 am deutlichsten und nimmt zur zweiten Rotation von 34% auf 67% noch weiter zu, was sich mit den Beobachtungen aus Abbildung 2 deckt. Die durch den Standort verursachte Ertragsvariation ist in der ersten Rotation der Serie 603 mit 63% am größten, gefolgt von Serie 606 mit 51%. Die niedrigsten Anteile wurden in der zweiten Rotation der Serie 604 (1%) und der ersten Umtriebszeit in Serie 605 (4%) beobachtet. In den ältesten Serien 603 und 604 ist im Übergang zwischen den Umtriebszeiten eine ähnliche Dynamik erkennbar. Der Anteil der durch den Faktor Klon verursachten Streuung steigt an, während der Anteil für den Faktor Versuchsfläche sinkt. Der Anteil der durch die Interaktion von Klon und

Standort erklärten Varianz nimmt geringfügig zu, bleibt aber auf vergleichsweise geringem Niveau. Letzterer ist lediglich in Serie 605 mit 18% von größerem Anteil und Bedeutung. Der Restfehler und dessen Anteil an der Gesamtvariation ist über alle Serien und Rotationen hinweg vergleichsweise groß. Hier muss jedoch bedacht werden, dass in dieser Analyse aufgrund des gewählten Modells die Wiederholungs- und Blockeffekte sowie weitere mögliche räumliche Trends im Restfehler enthalten sind.

3.2 Blattrost

Abbildung 4 gibt zunächst einen Überblick über die nach zwei Rotationen (Serien 603 und 604) bzw. nach einem abgeschlossenen Rotationszyklus (Serie 605 und 606) beobachtete Blattrostinfektionsintensität über alle Klone je Versuchsfläche.

In der Serie 603 (Abbildung 4) liegt die Infektionsintensität der Versuchsfläche Emmendingen (009) deutlich (79%) über dem Serienmittel (44%), hier ist der positive Einfluss des feucht-gemäßigten/ozeanischen Klimas des Oberrheingraben in Emmendingen (Baden-Württemberg) auf die Sporenbildung und somit die Infektionsrate zu erkennen. Auch in Lehmbach (008, Bayern) begünstigte das feucht-kontinentale Klima auf diesem Standort die Infektionsintensität (47%), diese lag jedoch, ähnlich den Versuchsflächen 006 (trockener Standort mit kontinental geprägtem Klima, Wallstawe, Sachsen-Anhalt; 41%) und 007 (küstennahen Standort mit atlantisch geprägtem Klima, Anderlingen, Niedersachsen; 42%), dicht am Serienmittel. Im raueren Klima des Mittelgebirgsstandort Stölzingen (005, Nordhessen; 34%) lag die Befallsintensität deutlich unter dem Serienmittel und auf der Versuchsfläche 010 (Thammenhain, Sachsen) wurde über beide Rotationszyklen hinweg kontinuierlich der geringste Blattrostbefall (19%) gefunden. Hier kommen Trockenheitsereignisse zum kontinental geprägten Klima hinzu.

Bei der Serie 604 (Abbildung 4) sind Tendenzen analog zur Serie 603 zu erkennen. Jedoch wichen alle drei Standorte hier nur leicht vom Serienmittel (15%) ab. Auch in dieser Serie lag die Infektionsrate im feucht-kontinentalen Klima des südlichsten Standortes 013 (Lehmbach, 19%) über dem Serienmittel. Am Mittelgebirgsstandort 011 (Stiedenrode, Hessen, 11%) mit, dem Standort 005 sehr ähnlichem Klima,

Tabelle 5

Ergebnisse der Varianzkomponentenanalyse der Ertragsdaten (dGZ in [t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹])

Ursache	Serie 603				Serie 604				Serie 605		Serie 606	
	1. Rotation		2. Rotation		1. Rotation		2. Rotation		1. Rotation		1. Rotation	
	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]
Gesamt	16,14	100	24,89	100	10,38	100	25,58	100	0,32	100	26,91	100
Klon	0,64	4	3,29	13	3,56	34	17,20	67	0,03	10	1,61	6
VFL	10,16	63	8,18	33	1,65	16	0,34	1	0,01	4	13,74	51
Klon * VFL	0,48	3	0,88	4	0,26	3	1,21	5	0,06	18	1,05	4
Fehler	4,86	30	12,54	50	4,91	47	6,82	27	0,22	68	10,52	39

In Serie 605 wurden die Ertragswerte wurzeltransformiert. Interaktionen der Streuungsursachen werden mit * gekennzeichnet. Je Serie werden die Varianzkomponenten (VK) der beteiligten Faktoren und deren Anteil an der Gesamtvarianz angegeben. In den beiden ältesten Serien erfolgt die Angabe der Varianzkomponenten getrennt nach Rotationen.

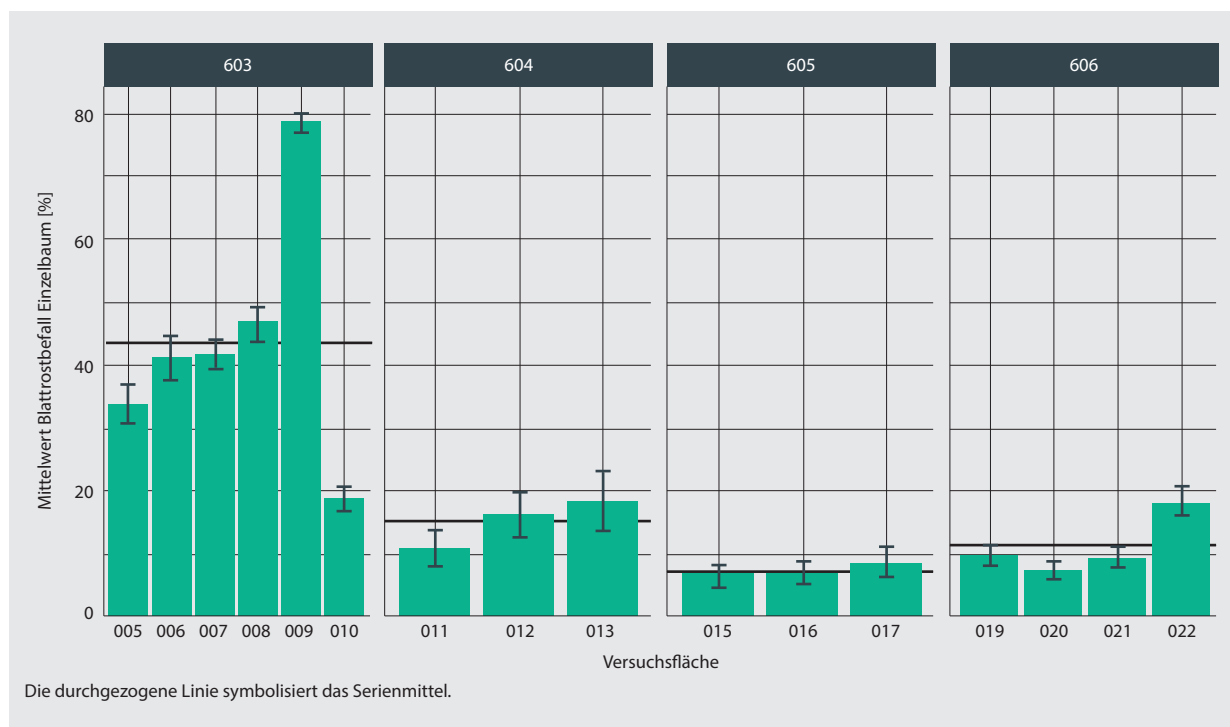


Abbildung 4

Beobachtete mittlere Blattrostinfektionsintensität über alle Klone je Versuchsfläche und Serie mit Angabe des Standardfehlers des Mittelwerts (Whisker)

lag der Blattrostbefall der Klone deutlich unter dem Serienmittel. Am Standort 012 (Wallstawe) zeigte sich trotz kontinental geprägtem Klima mit jedoch mehr Feuchtigkeit als in Thammenhain (010) mit 16% eine leicht über dem Serienmittel liegende Befallsintensität.

Nach einem abgeschlossenen Rotationszyklus konnte an den Klonen auf den Standorten der Serie 605 (Abbildung 4) im Mittel eine sehr geringe Befallsintensität nachgewiesen werden. Lediglich die Versuchsfläche in Graupa (017, Sachsen) lag mit rund 9% leicht über dem Serienmittel von 7%. Die Versuchsflächen 015 und 016 in Stiedenrode (Hessen) und Bardowick (Niedersachsen) zeigten mit rund 7% sehr ähnlichen Blattrostbefall unter dem Serienmittel.

In der Serie 606 (Abbildung 4) zeigte nur die Versuchsfläche 022 (Herzberg) eine deutlich über dem Serienmittel von 11% erhöhte Blattrostbefallsintensität (18%). Auf den Standorten 019 Augustfehn (rund 10%) und 021 Stiedenrode III (9%) wurden trotz unterschiedlicher Klimabedingungen (Tabelle 3) sehr ähnliche, knapp unter dem Serienmittel liegende Infektionsprozente ermittelt. Die Klone auf dem klimatisch subkontinental beeinflussten Standort im Wendland (020, Siemen) erwiesen sich mit einem Flächenmittel von 8% nach der ersten Rotation als am wenigsten vom Blattrost beeinflusst.

Insgesamt können durch den Vergleich der doppelt (006-012 und 008-013) und im Fall Stiedenrode sogar dreifach vorkommenden, benachbarten Versuchsflächen standörtliche Einflüsse auf diesen Flächen minimiert werden.

Als weitere Einflussgrößen auf die Befallsintensität sind die jahresklimatischen Bedingungen und die genetische

Prädisposition aufgrund der Art- und Kreuzungskombinationen zu berücksichtigen. Aber auch innerhalb einer Art oder Kreuzungskombination sind klonale Tendenzen/Anfälligkeiten zu erkennen. Betrachtet man den Intensitätsverlauf des Blattrostbefalls der einzelnen Standjahre (über die gesamte jeweilige Serie gerechnet, hier nicht dargestellt) so wird deutlich, dass es Jahre mit generell stärkerer Blattrostbefallsintensität gibt. Drei Versuchsserien (603-605) überschneiden sich in ihrem Beobachtungszeitraum in den Jahren 2013 bis 2015. Beim Vergleich dieser Serien und Jahre zeigte sich, unabhängig vom Standort und Standjahr, eine deutliche Übereinstimmung der relativen Befallsintensität. Bei allen drei Serien war das Jahr 2014 das „stärkste“ Rostjahr, in welchem alle Serienmittel weit über dem jeweiligen Gesamtmittel liegen. Flankiert wurde dieses Rostjahr von zwei Jahren, in denen die Befallsintensitäten deutlich geringer waren. Trotz ihrer insgesamt höheren Befallsintensität im Vergleich mit den anderen drei Serien zeigt sich dies am deutlichsten in der Serie 603. Bei dieser Serie wurde für das „Rostjahr“ 2014 eine Befallsintensität von 75% ermittelt, während in 2013 und 2015 nur 21% und 19% zu verzeichnen waren. Hinweise auf einen Alterstrend lassen sich hier nicht beobachten.

In Abbildung 5 sind die Pathogenbefallsintensitäten der in den Serien enthaltenen Klone, gruppiert nach Art bzw. Kreuzungskombination jeweils gegenüber dem, bisher auf KUP häufig angebauten Klon 'Max 1', dargestellt. Die Säulen repräsentieren dabei das Mittel der Gruppe über die gesamte Standzeit (zwei bzw. ein Rotationszyklus) auf allen Versuchsflächen.

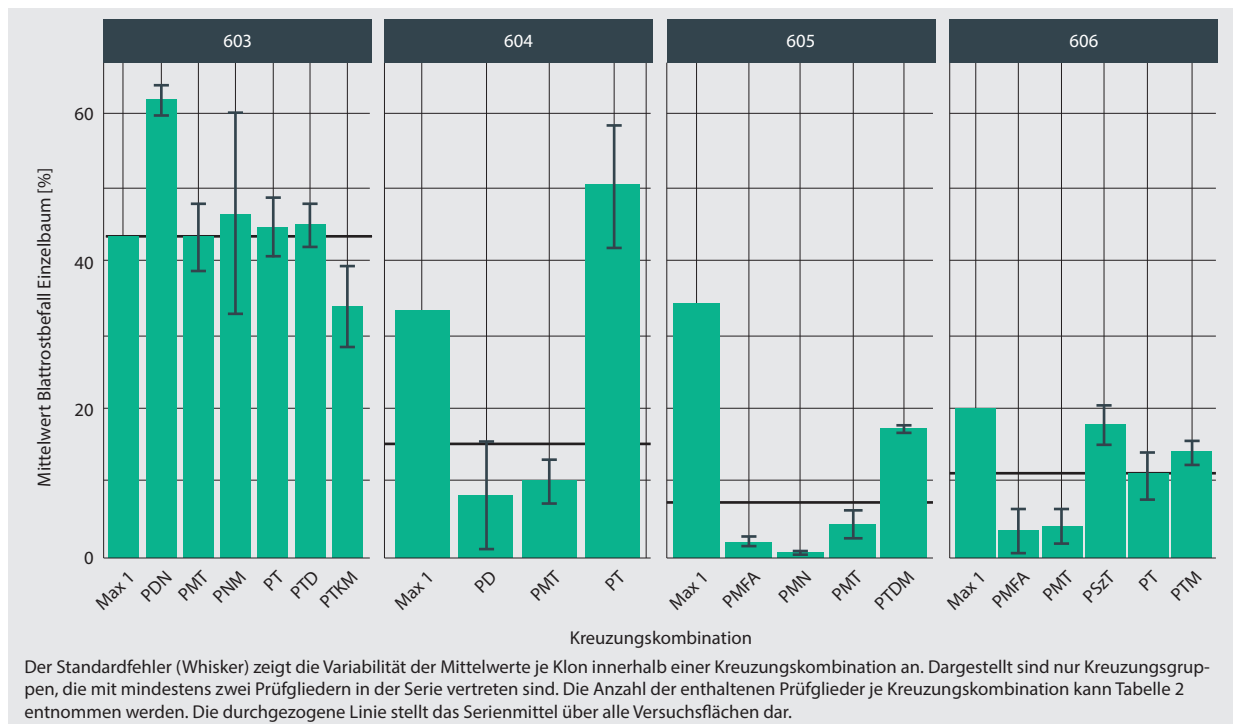


Abbildung 5

Mittlere Pathogenbefallsintensitäten gruppiert nach Art bzw. Kreuzungskombination. Jeweils gegenüber 'Max 1' dargestellt.

Die stärkste Befallsintensität zeigte in der Serie 603 (Abbildung 5) die Kreuzungskombination aus der amerikanischen und europäischen Schwarzpappel *Populus deltoides* × *Populus nigra* (PDN), die mit 62% deutlich über dem Serienmittel von 44% lag. Die Prüfglieder aus der Dreifachkreuzung (*P. trichocarpa* × *P. koreana*) × *P. maximowiczii* (PTKM) waren mit 34% vom Blattrost am wenigsten befallen. Kreuzungskombinationen aus reinen Balsampappelarten (*P. trichocarpa*, PT und *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa*, PMT) wiesen Befallsintensitäten (45% und 43%) nahe dem Serienmittel auf. Die Prüfglieder der intersektionellen Kreuzungskombinationen (*P. nigra* × *P. maximowiczii*, PNM und *P. trichocarpa* × *P. deltoides*, PTD) lagen bei fast gleichem Blattrostbefallsniveau jedoch noch leicht über den Balsampappeln.

Die Prüfglieder auf den Standorten der Serie 604 (Abbildung 5) konnten in drei Gruppen zusammengefasst werden. Dabei ergab sich, dass die Klone der reinen amerikanischen Balsampappel PT in dieser Serie die mit Abstand stärkste Befallsintensität (50%) zeigten und deutlich über dem Serienmittel (15%) und auch über den beiden anderen Gruppen aus reiner amerikanischer Schwarzpappel *P. deltoides* (PD, 8%) und den Balsampappelhybriden PMT (10%) lagen. Nach zwei Rotationszyklen lag das Versuchsmittel in dieser Serie bei nur knapp der Hälfte dessen, welches die Serie 603 aufwies. Die Befallsintensität der Klone der Art PT ist jedoch in beiden Serien vergleichbar hoch, während die Hybriden aus PMT in der Serie 604 wesentlich geringer befallen waren als jene aus der Serie 603.

Die Serie 605 (Abbildung 5) enthält keine Klone reiner Arten. Somit kann hier leider kein Vergleich zwischen PT und PMT gezogen werden. Nach einem abgeschlossenen

Rotationszyklus erwiesen sich die Klone der intersektionellen Kreuzung aus (*P. trichocarpa* × *P. deltoides*) × *P. maximowiczii* (PTDM) gegen das Pflanzenpathogen am sensibelsten. Mit 17% lagen sie fast um das Dreifache höher als das Serienmittel (7%). Im Gegensatz dazu zeigten die Klone der in dieser Serie enthaltenen zweiten intersektionellen Kreuzung aus *P. maximowiczii* × *P. nigra* (PMN) einen extrem geringen Rostbefall von 0,4%. Die auch in dieser Serie enthaltenen PMT lagen wie in den Serien 603 und 604 nahe bei (4%), aber noch unterhalb des Serienmittels.

Die Klone auf den Standorten der Serie 606 (Abbildung 5) zeigten im Serienmittel eine gegenüber der Serie 605 fast verdoppelte Blattrostinfektionsrate (11%). Hier lagen lediglich die Prüfglieder der Art *P. trichocarpa*, ähnlich den Klonen der gleichen Art aus der Serie 603 am Versuchsmittel (11%). Am schlechtesten schnitten in dieser Serie die Klone der Kreuzungskombination, die die asiatische Art *P. szechuanica* mit der amerikanischen Balsampappel *P. trichocarpa* (PSzT) vereint, ab (18%). Die Kontinuität der Balsampappelhybridkombination PMT, eine geringere Infektionsrate (4%) als das Serienmittel aufzuweisen, bestätigt sich auch in dieser Versuchsserie. Im Gegensatz dazu zeigten die Klone der reziproken Kreuzung aus *P. trichocarpa* × *P. maximowiczii* (PTM) in dieser Versuchsserie hohe Infektionsraten von im Mittel 14%. In den Serien 605 und 606 sind Klone von *P. maximowiczii* in freier Abblüte (PMFA) enthalten. Bei beiden Serien wurden diese Prüfglieder wenig durch den Blattrost geschädigt. Die genaue Kreuzungskombination dieser vier Prüfglieder konnte bisher jedoch noch nicht bestimmt werden, so dass hier keine Aussage über den Einfluss der Kreuzungskombinationen getroffen wird.

Es wird deutlich, dass die durch die Selektions- und Züchtungsbemühungen des FastWOOD-Projekts entstandenen und getesteten Klone ein mindestens ebenso gutes bzw. ein deutlich verbessertes Toleranzverhalten in Bezug auf die Infektionsintensität mit *M. larici-populina* gegenüber dem Standardklon 'Max 1' aufweisen.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Varianzkomponentenanalyse für den Blattrostbefall enthalten.

Der Anteil der durch den Genotyp verursachten Varianz ist in Serie 604 mit 37% und in Serie 605 mit 27% am Größten. In Serie 603 und 606 fallen diese Anteile mit 11% und 6% deutlich niedriger aus. Der Anteil des Standorts ist in Serie 603 mit 16% auffällig größer als in den anderen Serien, deren Anteil jeweils gleich oder kleiner 2% ist. Die durch die Interaktion von Klon und Standort verursachte Varianz ist dagegen über alle Serien mit weniger als 5% Anteil an der Gesamtvariation sehr gering. Der Faktor Versuchsjahr konnte in Serie 603 mit 21% und 605 mit 40% vergleichsweise größere Anteile der Gesamtstreuung erklären. In Serie 604 (4%) und 605 (1%) fiel dieser Einfluss deutlich geringer aus. Die Wechselwirkung von Klon und Jahr beeinflusste lediglich in Serie 606 die Gesamtvariation zu nennenswerten Anteilen mit 19%. Die dreifache Interaktion aus Genotyp, Versuchsfläche und Jahr ergab in Serie 605 den größten Anteil an der Gesamtvarianz. Der Restfehler, der hier die Effekte der Blöcke und der Wiederholungen enthält, zeigte bis auf Serie 605 mit 17% ein vergleichbar hohes Niveau von 25% bis 28% hinsichtlich der Anteile an der Gesamtvariation. Die Anteile der Restfehler sind hier jedoch nicht so hoch wie für die Ertragsdaten.

3.3 Auswahl überlegener Klone in Serie 605 und 606 nach der ersten Rotation

Basierend auf der zweiphasigen Auswertung der Ertragswerte in den Versuchsserien 605 und 606 konnten je Serie zwei Klone identifiziert werden, die der Kontrolle 'Max 1' in der ersten Rotation signifikant überlegen sind. Tabelle 7 enthält die Ergebnisse dieser Auswertung.

Bei allen ausgewählten Klone handelt es sich um PMT Kreuzungen. Die Erträge der Spitzenklone liegen in beiden Serien jeweils über dem Gesamtmittel, über dem Mittel aller Klone der Kreuzungskombination PMT und über dem mittleren Ertrag von 'Max 1'. Das Ertragsniveau der beiden Spitzenklone in Serie 606 liegt über dem der Klone in Serie 605, was aber wie beschrieben vorrangig durch den Standorteinfluss bedingt sein dürfte. Letzteres erklärt auch die Unterschiede in den Standardfehlern, da die standörtlich bedingte Varianz in Serie 606 größer ist als in Serie 605. Die Rostdaten basieren auf den Mittelwerten und erlauben keine Aussagen beruhend auf schließender Statistik. Dennoch wird hier deutlich, dass die insgesamt vier Spitzenklone im Vergleich innerhalb der Serien sehr niedrige Befallsintensitäten aufweisen. Bei der hier dargestellten Analyse ist zu berücksichtigen, dass sich zwischen den Standorten Rangverschiebungen ergeben können. Die Spitzenklone sind zwar insgesamt flächenübergreifend überlegen, aufgrund von Genotyp-Umwelt-Interaktion können die Rangfolgen der Klone an den einzelnen Standorten anders ausfallen. Dies sollte noch näher analysiert bzw. bei Vorliegen der Daten aus der zweiten Umtriebszeit evaluiert werden.

4 Diskussion

Sowohl bei der CO₂-Vermeidungsleistung als auch bei den CO₂-Vermeidungskosten ergeben sich deutliche Vorteile bei der Verwendung von Hackschnitzeln aus Kurzumtriebsplantagen gegenüber beispielsweise Biogas aus Mais, wie der agrarpolitische Wissenschaftsbeirat des BMEL in einem Gutachten feststellte (Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (WBA) 2007). Auch der Naturschutzbund sieht deutliche ökologische Vorteile von Kurzumtriebsplantagen gegenüber intensiv bewirtschafteten Ackerflächen (Bielefeldt et al., 2008). Insofern ist die Erzeugung von Biomasse in Kurzumtriebsplantagen eine effektive Alternative zum Einsatz von fossilen Brennstoffen. Im Gegensatz zu

Tabelle 6

Ergebnisse der Varianzkomponentenanalyse der parzellenweisen Blattrostbefallsdaten

Ursache	Serie 603		Serie 604		Serie 605		Serie 606	
	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]	VK	Anteil [%]
Gesamt	0,411	99	0,186	100	0,120	100	0,193	101
Klon	0,046	11	0,068	37	0,032	27	0,011	6
VFL	0,068	16	0,001	1	0,000	0	0,003	2
Jahr	0,087	21	0,008	4	0,002	1	0,077	40
Klon * VFL	0,005	1	0,008	4	0,000	0	0,000	0
Klon * Jahr	0,003	1	0,009	5	0,009	8	0,037	19
VFL * Jahr	0,066	16	0,016	9	0,013	11	0,005	3
Klon * VFL * Jahr	0,034	8	0,023	12	0,043	36	0,009	5
Fehler	0,101	25	0,053	28	0,020	17	0,050	26

Die mittleren Befallsprozente je Parzelle sind asin-wurzeltransformiert. Interaktionen der Streuungsursachen werden mit * gekennzeichnet. Je Serie werden die Varianzkomponenten (VK) der beteiligten Faktoren und deren Anteil an der Gesamtvarianz angegeben.

Tabelle 7

Ergebnisse der flächenübergreifenden Serienauswertung basierend auf den Einzelauswertungen in den Versuchsserien 605 und 606

Serie	Klon	Kreuzung	Ertrag					Rost	
			Mittel		FG	Vergleiche		Mittel	
			dGZ [t_{atro} ha ⁻¹ a ⁻¹]	SE		t-Statistik	p-Wert	Befall [%]	SE
605	NW11-0161R	PMT	5,95	0,92	2	3,57	0,01	0,35	0,35
605	NW11-0153F	PMT	5,45	0,89	2	3,17	0,04	0,00	0,00
605	'Max 1'	PNM	2,07	0,70	2			34,24	6,53
606	NW12-0725M	PMT	8,70	2,61	3	3,25	0,03	0,52	0,07
606	NW12-0727P	PMT	8,46	2,56	3	3,13	0,04	0,10	0,10
606	'Max 1'	PNM	5,19	2,03	3			20,01	3,17

Basierend auf paarweisen Vergleichen mit der Kontrolle 'Max 1' sind je Serie die beiden signifikant überlegenen Prüfglieder angegeben. Zu den Klonen und zur Kontrolle sind die mittleren Erträge der ersten Rotation (dGZ) sowie der zugehörige Standardfehler (SE) angegeben. Die Spalte FG bezeichnet die Freiheitsgrade für das flächenübergreifende Modell der jeweiligen Serie. Aus den Post-hoc-Tests sind die für den Vergleich des jeweiligen Klons mit 'Max 1' zugehörige Teststatistik (t-Statistik) und der darauf beruhende p-Wert angegeben. Zum Blattrost sind der mittlere parzellenweise Befall sowie der Standardfehler (SE) des jeweiligen Mittelwerts angegeben.

anderen Ländern wie beispielsweise in Schweden, wurde in Deutschland allerdings relativ wenig Züchtungsarbeit zur Entwicklung neuer, speziell zur Biomasseproduktion geeigneter Gehölze geleistet. Forstpflanzenzüchtung ist eine Daueraufgabe, die Kontinuität in der züchterischen Bearbeitung erfordert. Hier ergeben sich deutliche Parallelen zur landwirtschaftlichen Züchtung und dem Sortenwesen, in dem diese Kontinuität gegeben ist. In 10 Jahren intensiver Züchtungsarbeit hat das Verbundprojekt FastWOOD die Neuzüchtung von Pappeln und Weiden für die Biomasseproduktion erfolgreich vorangetrieben.

Hinsichtlich des Ertragsniveaus können die FastWOOD Ergebnisse mit denen des ProLoc Verbundes verglichen werden. In diesem Projekt wurden über ein breites standörtliches Spektrum Versuche mit gleichem Prüfgliedsatz zum Zweck der Standortleistungsmodellierung angelegt. Die Flächen aus dem Arbeitspaket 1 in ProLoc sind denen aus FastWOOD hinsichtlich ihrer Anlage und Bewirtschaftung (Pflanzenabstand von 1,8 m x 0,5 m; dreijährige Rotation) ähnlich. Die in ProLoc angebaute Sorte 'Max 1' schnitt in der ersten Rotation mit 4,95 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ und in der zweiten Rotation mit 9,37 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ ab. Das Gesamtmittel der Pappelklone in ProLoc lag bei 4,42 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ im ersten und 8,62 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ im zweiten Umtrieb. In FastWOOD hat die Serie 603 mit 5,23 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ dGZ der ersten Rotation ähnlich abgeschnitten. Der mittlere Ertrag von 10,7 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ in der zweiten Rotation verdeutlicht jedoch die großen Steigerungspotenziale. Standorte wie Lehmbach I (008) und Emmendingen (009) sind dazu geeignet, bereits in der ersten Rotation mit den entsprechenden Klonen überdurchschnittlich gute Ergebnisse zu erzielen. Auffällig ist die hohe Ertragszunahme in Wallstawe I (006). Der Standort in Anderlingen ist in einigen Partien stark vernässt und anmoorig. Basierend auf dem unterdurchschnittlichen Abschneiden in beiden Rotationen ist dieser Standort für den Pappelanbau nicht geeignet. Dies bestätigt die Aussagen von Hofmann (1997), der eine Anbau-grenze bei einer Bodenwertzahl von 30 sieht mit der

Einschränkung, dass bei Standorten besserer Güte keine anhaltende Nässe vorliegen sollte. In ProLoc konnten die Weidensorten 'Inger' und 'Tordis' auf einem Moorstandort gute Ergebnisse erzielen (Janßen et al., 2017).

Die Serie 604 schnitt in der ersten Rotation mit 4,71 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ ebenfalls vergleichbar zum ProLoc Gesamtmittel ab, in der zweiten Rotation waren jedoch noch größere Wuchssteigerungen auf 11,7 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ als in ProLoc und in der Serie 603 möglich. Die Versuche hatten im Anwuchsjahr teils auch Probleme mit trockener Witterung. Wiederum am Versuchsort Wallstawe (hier Wallstawe II (012)) fallen die vergleichsweise hohen relativen und absoluten Steigerungswerte besonders der Spitzenklone auf (vgl. dazu Horn et al., 2013). Dies bestätigt die Eignung dieser Standorte für den Pappelanbau, die es den *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* Kreuzungen ermöglichen, ihre Überlegenheit in der Wuchsleistung zur Geltung zu bringen.

Die Serie 605 fällt mit einem mittleren Ertrag von 2,62 t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ dagegen deutlich schlechter aus, was jedoch durch Anlageschwierigkeiten und standörtliche Gegebenheiten bedingt wird. Basierend auf Trockenschädenbonituren und Austrocknungsversuchen unterstreicht Schildbach (2014) die kritische Wirkung von Trockenheit zur Pflanzung, die direkt hohe Ausfallraten bewirkt. Später im Anwuchsjahr auftretender Wassermangel und Dürreperioden in den weiteren Jahren einer Rotation führen zu Wuchsminderungen, für die sich jedoch klonspezifische Unterschiede ergeben (Schildbach, 2014). Für die Flächen dieser Serie bleibt abzuwarten, ob sich eine ähnliche Ertragssteigerung wie in den älteren Serien einstellen wird. Weiterhin muss beobachtet werden, ob die Nachkommen der ersten gelenkten Kreuzungen ihre positiven Differenzen zur Kontrollgruppe ausbauen können. Bardowick (016) ist aufgrund der sehr trockenen klimatischen Bedingungen und des sehr sandigen Substrats (ehemalige Rieselfelder) ein Problemstandort.

Interessant ist, dass Herzberg im Vergleich dazu von den klimatischen Bedingungen nicht viel besser erscheint.

Bodenzahl und nFK sind nur etwas günstiger, der mehr als dreifache so hohe mittlere Ertrag fällt vor diesem Hintergrund umso deutlicher auf. Dass die Fläche auf einem Altarm des Flusses Schwarze Elster liegt und der Grundwasseranschluss in der Standortkartierung festgestellt wurde, dürften die Hintergründe für diese Ertragsleistung sein. Da andere Flächen mit Grundwasseranschluss nicht so gute Ergebnisse erzielten, bestätigen sich die Unterschiede im Einfluss von Grundwasser, die bereits von Hesmer (1951) erwähnt wurden, nämlich dass stehendes Grundwasser und Stauwasser eher nachteilig seien. Neben Herzberg fällt die Serie 606 mit einem Mittel von $6,14 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ sehr gut aus. Stiedenrode III (021) fällt durch den Beikrautdruck im Anwuchsjahr zurück. Die Fläche Siemen wirkt dagegen vielversprechend, da sich hier bereits eine Differenzierung der Prüfglieder im Vergleich zu 'Max 1' abzeichnet.

Über alle Serien hinweg zeigen die Hybride aus der Kreuzungskombination *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* beim Ertrag ähnlich wie für den Rost eine Überlegenheit zum Gesamtmittel der Serien und zur Kontrolle 'Max 1'. Auf einigen Flächen ist dies wie beschrieben aufgrund standörtlicher Bedingungen oder Schwierigkeiten bei der Anlage geringer bis nicht ausgeprägt. Hier stellt sich jedoch nicht so sehr die Frage nach der Anbauwürdigkeit anderer Klone sondern eher, ob es sich überhaupt um für Balsam- und Schwarzpappel geeignete Standorte handelt, da die Streuung zwischen den Prüfgliedern und die Leistung der Kontrolle auf diesen Standorten insgesamt sehr niedrig ist. Eine mögliche Genotyp-Umwelt-Interaktion sollte daher genauer untersucht werden. Für die Ansprache dieser Zusammenhänge haben sich bei Sixto et al. (2016) Biplot-Analysen bewährt.

Nach den bisherigen Beobachtungen werden die leistungsstarken Klone in ihrer Ertragsüberlegenheit nicht wesentlich beeinträchtigt. Inwieweit sich diese These langfristig verifizieren lässt, muss weiter beobachtet werden. Die in den drei Förderphasen des Verbundprojektes FastWOOD erarbeitete Datenbasis bietet eine gute Grundlage für eine spezifische Auswertung dieser Fragestellung. Dieses geht in die Anbauempfehlungen der ausgewählten und zugelassenen Klone ein. Für die Serien 605 und 606 erfolgt noch die Analyse ertragsbestimmender Faktoren wie z.B. Brusthöhendurchmesser/Grundfläche, Ausfallrate und Höhen vergleichbar mit Grotehusmann et al. (2015, 2017). Die Nachkommen der gelenkten Kreuzungen aus diesen Serien sollen zur Zulassung nach FoVG in der Kategorie „Geprüft“ vorbereitet werden.

Einige Versuchsflächen bleiben nach Abschluss des Projekts in der Betreuung der Abteilung Waldgenressourcen. Versuche aus den ersten beiden Serien können in einer dritten Rotation beobachtet werden, was hinsichtlich der Ertragsdynamik nach zweitem Rückschnitt von Interesse ist (vgl. dazu Boelcke, 2006; Biertümpfel et al., 2009). Weiteres Material aus den letzten Kreuzungsjahrgängen soll außerdem in einer neuen Versuchsserie getestet werden, die vom Sachgebiet Züchtung und Prüfung forstlichen Vermehrungsgutes der Abteilung Waldgenressourcen der NW-FVA angelegt wird.

Risikofaktoren für den erfolgreichen Betrieb einer Kurzumtriebsplantage (KUP) sieht Amthauer Gallardo (2014)

neben einer falschen Klon- und Standortauswahl in Blatt- und Rindenkrankheiten und unsachgemäßer Kulturführung. Von Pilzen und Bakterien ausgelöste Krankheiten sind hauptverantwortlich für Zuwachseinbußen und schlechtere Holzqualität. Diese Schäden können bestandesbedrohende Ausmaße annehmen (Steenackers et al., 1996). Hier ist in erster Linie der Pappelblattrost (*Melampsora larici-populina*) zu nennen. Daher wurden die im FastWOOD-Projekt getesteten Pappel-Klone ab den Vorprüfungen bis hin zur Klonprüfung auf Versuchsflächen speziell für die Eignung auf Kurzumtriebsplantagen nicht nur hinsichtlich Biomasseleistung, Wiederausschlagsvermögen und Dichtstandstoleranz, sondern auch auf Resistenz gegen Pappelblattrost getestet und ausgewählt. Durch das jährlich bereits ab dem Sämlingsalter durchgeführte Pathogenmonitoring aller neuen Klone konnte das Toleranzverhalten gegenüber dem Pappelblattrost in jedem Stadium (Vorprüfung, Versuchsfläche, nach Wiederaustrieb usw.) und auf unterschiedlichsten Standorten dokumentiert werden. In den hier vorgestellten vier Serien werden aufgrund ihrer Leistungen bei den Vorselektionen überwiegend Hybriden der Sektion Tacamahaca aus *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* auf den Versuchsflächen getestet. Die Auswahl der Eltern basierte zum einen darauf, dass sie aufgrund ihrer Herkunftsgebiete gut mit den in Deutschland herrschenden klimatischen Bedingungen zurechtkommen und gute Wüchsigkeit zeigen. Zum anderen erwiesen sich Klone dieser beiden Arten bereits bei Albrecht und Böden (1988) als sehr tolerant gegenüber dem Pflanzenpathogen *M. larici-populina*. Umfangreiche Untersuchungen zur Anfälligkeit der Elternarten in verschiedenen europäischen Ländern beschrieb Pinon (1992), die zusätzlich auf klonale Toleranzeigenschaften hindeuten. Die von uns getesteten Neuzüchtungen der *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* -Hybriden (Serie 604-606) zeigten durchgehend nicht nur eine schwächere Infektionsintensität als der bei Rau et al. (1988) als resistent beschriebene und hier als Referenzklon verwendete 'Max 1' und ihre Elternart *P. trichocarpa*, sondern lagen auch überwiegend unter dem Serienmittel (Abbildung 5). Einzige Ausnahme bilden die *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* -Hybriden in der Serie 603. Diese zeigten, verglichen mit 'Max 1' und dem Serienmittel eine leicht höhere Sensitivität. Bei diesen Individuen handelt es sich um ältere Klone, die nach eingehender Bewertung direkt für den Test auf Kurzumtriebsfähigkeit hin selektiert wurden.

Der nicht unbedeutende Einfluss standortabhängiger biotischer und abiotischer Faktoren in Kombination mit jahresklimatischen Einflüssen kann hier nur in Ansätzen aufgezeigt werden. Jedoch ist die Tendenz zu höherem Pathogenbefall auf Standorten mit eher feuchtwarmem Klima (wie beispielsweise Lehm bach (008) und Emmendingen (009)) im Vergleich der Standorte der einzelnen Versuchsserien miteinander erkennbar (Abbildung 4). Jedoch zeigen die Klone auf eben diesen Standorten dem hohen Infektionsniveau zum Trotz sehr gute Zuwachsraten.

In den Serien 605 und 606 konnten jeweils zwei Spitzenklone identifiziert werden, die überdurchschnittliche Erträge aufweisen. Die Klone sind in den jeweiligen Serien der Kontrolle 'Max 1' hinsichtlich des Biomassezuwachses

statistisch überlegen. Gleichzeitig weisen die Klone eine niedrige Befallsintensität mit Blattrost auf. Hier bleiben die Ergebnisse nach weiteren Rotationen abzuwarten, um zu bestätigen, dass die Klone auch nach Rückschnitt überlegen bleiben und als die besten Genotypen des Prüfkollektivs ausgewählt werden können.

Danksagung

Die Autoren sind dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) für die finanzielle Unterstützung zu besonderem Dank verpflichtet. Dem Projektträger Fachagentur nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) möchten wir für die professionelle Projektabwicklung danken.

Seit 2008 haben insgesamt 9 Institutionen an der Verwirklichung der im Verbundvorhaben FastWOOD gesteckten Ziele mitgewirkt. Nur durch die partnerschaftliche Zusammenarbeit aller Beteiligten war dies möglich. So wurden die nach oft engagierten Diskussionen vereinbarten Maßnahmen immer mit Blick auf den Erfolg des Gesamtvorhabens umgesetzt. Allen an diesem Werk beteiligten Projektpartnern gilt deshalb unser großer Dank. Das Teilprojekt 1 (NW-FVA) konnte nach 369 verschiedenen Kreuzungen in acht Kreuzungsreihen insgesamt 23 Versuchsflächen mit Pappeln und Weiden anlegen und 2 neue Klone zur Zulassung in der Kategorie „Geprüft“ nach FoVG bringen. Dies wäre ohne die große Arbeitsleistung der FastWOOD-Mitarbeiter und -Mitarbeiterinnen nicht möglich gewesen. Für die Unterstützung bei der Versuchsflächenbetreuung gilt besonderer Dank den Kollegen und Kolleginnen von Sachsenforst (SBS), dem Bayerischen Amt für forstliche Saat- und Pflanzenzucht (ASP) und der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA BW).

Herrn Johannes Suttmöller danken wir für die Interpolation und Bereitstellung der Klimadaten des DWD, und der Abteilung Umweltkontrolle der NW-FVA für Beratung zur Standortkartierung. Wir danken zudem den beiden anonymen Gutachtern/innen für ihre konstruktive Kritik und hilfreichen Anmerkungen.

Literaturverzeichnis

- Ad-Hoc-Arbeitsgruppe Boden der Staatlichen Geologischen Dienste und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. Stuttgart : Schweizerbart, 438 p
- Albrecht J, Böden E (1988) The susceptibility to disease of approved clones of poplars in sections Aigeiros and Tacamahaca. *Holz* 42:25–29
- Ali W (2009) Modelling of biomass production potential of poplar in short rotation plantations on agricultural lands of Saxony, Germany. Dresden : Univ, 130 p
- Anthauer Gallardo D (2014) Standortbasierte Ertragsmodellierung von Pappel- und Weidenklonen in Kurzumtriebsplantagen. Dresden : Univ, 201 p
- BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2018) Erhebung zur Versorgungssituation von forstlichem Vermehrungsgut im Bundesgebiet (Erfassungszeitraum 01.07.2016 - 30.06.2017) [online]. Zu finden in <https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/Landwirtschaft/Saat-und-Planzgut/Erhebung2016_2017.pdf?__blob=publicationFile&v=4> [zitiert am 06.07.2018]
- Arbeitsgemeinschaft Forsteinrichtung, Arbeitskreis für Standortkartierung (2003) Forstliche Standortaufnahme : Begriffe, Definitionen, Einteilungen, Kennzeichnungen, Erläuterungen. Eching : IHW, 352 p
- Bielefeldt J, Bolte A, Busch G, Dohrenbusch A, Kroiber F, Lamersdorf N, Schulz U, Stoll B (2008) Energieholzproduktion in der Landwirtschaft : Chancen und Risiken aus Sicht des Natur- und Umweltschutzes [online]. Zu finden in <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/biomasse/nabu-studie_energieholz.pdf> [zitiert am 06.07.2018]
- Biertümpfel A, Rudel H, Werner A, Vetter A (2009) 15 Jahre Energieholzversuche in Thüringen. Jena : TLL, 8 p
- Boelcke B (2006) Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen : Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz. Schwerin : MELFF Mecklenburg-Vorpommern, 44 p
- Borschel M, Fey-Wagner C, Fehrenz S, Janßen A (2015) Kreuzungszüchtung bei Schwarz- und Balsampappeln. *Thünen Rep* 26:52–58
- Fey-Wagner C, Janßen A, Klippert N (2012) Untersuchungen zur Pathotypenstruktur des Pappelblattrosts *Melampsora larici-populina* auf neu angelegten Versuchsflächen mit Schwarz- und Balsampappeln und ihre Bedeutung für den Kurzumtrieb. *Beitr Nordwestdtsh Forstl Versuchsanst* 8:219–235
- Grotehusmann H, Janßen A, Haikali A (2015) Pappelsortenprüfungen im Projekt FastWOOD. *Forstarchiv* 86:67–79, doi: 10.4432/0300-4112-86-67
- Grotehusmann H, Stiehm C, Janßen A (2017) Pappelsortenprüfungen im Projekt FastWOOD : Ergebnisse nach 2. Rotation. *Forstarchiv* 88:47–54, doi: 10.4432/0300-4112-88-47
- Gutachterausschuss Forstliche Analytik (2009) Handbuch Forstliche Analytik. Berlin : BMELV, 568 p
- Hartmann K-U (2010) Entwicklung eines Ertragsschätzers für Kurzumtriebsbestände aus Pappel. Dresden : Univ, 150 p
- Hesmer H (1951) Das Pappelbuch. Bonn : Verl Dtsch Pappelvereins, 304 p
- Hofmann M (1997) Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben "Bereitstellung von genetisch hochwertigem Vermehrungsgut für Kurzumtriebsbestände und energetische Bewertung der Kurzumtriebswirtschaft". Hann Münden : Forschungsinst schnellwachsende Baumarten, 122 p
- Horn H, Skibbe K, Röhle H (2013) Wuchsleistung von KUP aus Pappel in Folgerotationen. *AFZ Wald* 2013:53–55
- Janßen A, Böden E, Walter P (1992) Untersuchungen zur genetischen Variation : Werbung von Buchenknospen für Isoenzymanalysen. *AFZ Wald* 1992:639
- Janßen A, Stiehm C, Hofmann M, Schmidt C (2017) Schlussbericht zum Vorhaben „Erfassung von Klon-Standort-Wechselwirkungen bei Pappel und Weide auf landwirtschaftlichen Standorten in kurzen Umtriebszeiten : ProLoc (Ertrags - Programm - Locus) - Projektphase II“. Hann Münden : Nordwestdtsh Forstl Versuchsanst, Abt Waldgenessourcen, 90 p
- Kröber M, Heinrich J, Wagner P (2014) Wasserversorgung wichtiger als Bodengüte : ökonomische Bewertung von Pappel-Kurzumtriebsplantagen in Sachsen zeigt auf einigen Standorten wirtschaftliche Vorteile. *Holz-Zentralblatt* 39:941–942
- Lenth R (2018) emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means [online]. Zu finden in <<https://cran.r-project.org/web/packages/emmeans/index.html>> [zitiert am 26.07.2018]
- McMahon BG, Berguson WE, Buchman DJ, Levar TE, Maly CC, O'Brien TC, Riemenschneider DE (2011) Populus breeding and hybrid poplar development in Minnesota : 16-year update [online]. Zu finden in <<http://www.poplar.ca/upload/documents/edmonton11mcmahon.pdf>> [zitiert am 06.07.2018]
- Möhring J, Piepho H-P (2009) Comparison of weighting in two-stage analysis of plant breeding trials. *Crop Sci* 49:1977–1988, doi: 10.2135/cropsci2009.02.0083
- Niedersächsisches Forstplanungsamt (2007) Forstliche Standortaufnahme : Geländeökologischer Schätzrahmen Bergland [online]. Zu finden in <https://www.landesforsten.de/fileadmin/doku/Benutzergruppen/NFP/nfp/Bergland_Rahmenschema_01_2007_aktuell.pdf> [zitiert am 07.05.2018]
- Niedersächsisches Forstplanungsamt, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2009a) Forstliche Standortaufnahme : Geländeökologischer Schätzrahmen Tiefland [online]. Zu finden in <https://www.landesforsten.de/fileadmin/doku/Benutzergruppen/NFP/nfp/Tiefland_Rahmenschema_06_2009_aktuell.pdf> [zitiert am 07.05.2018]

- Niedersächsisches Forstplanungsamt, Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (2009b) Forstliche Standortsaufnahme : Variantschema [online]. Zu finden in <https://www.landesforsten.de/fileadmin/doku/Benutzergruppen/NFP/nfp/Variantschema_aktuell_06_2009.pdf> [zitiert am 07.05.2018]
- Piepho HP, Buchse A, Emrich K (2003) A hitchhiker's guide to mixed models for randomized experiments. *J Agron Crop Sci* 189:310–322, doi: 10.1046/j.1439-037X.2003.00049.x
- Pinheiro J, Bates D, DebRoy S (2018) nlme : linear and nonlinear mixed effects models [online]. Zu finden in <<https://cran.r-project.org/web/packages/nlme/index.html>> [zitiert am 26.07.2018]
- Pinon J (1992) Variability in the genus *Populus* in sensitivity to *Melampsora* rusts. *Silvae Genet* 41:25–34
- R Core Team (2018) R: a language and environment for statistical computing [online]. Zu finden in <<https://cran.r-project.org/>> [zitiert am 26.07.2018]
- Rau H-M, Schulzke R, Albrecht J (1988) Steigerung und Sicherung der Holzproduktion durch Auswahl, Prüfung und züchterische Verbesserung geeigneten Ausgangsmaterials bei schnellwachsenden Baumarten. *Schr Forschungsinst schnellwachsende Baumarten* 5:114-148
- Röhle H (2009) Arbeitskreis Biomasse : Verfahrensempfehlungen zur Methodik der Biomasseermittlung in Kurzumtriebsbeständen. In: Nagel J (2009) Jahrestagung vom 25. - 27. Mai 2009, Ascona (Schweiz) /Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. Göttingen : DVFFA, pp 220-226
- Schildbach M (2014) Untersuchungen zur abiotischen Resistenz von Pappeln. *Landbauforsch Appl Agric Forestry Res* 64(2):85–98, doi: 10.3220/LBF_2014_85-98
- Schuetzenmeister A, Dufey F (2017) VCA : Variance Component Analysis [online]. Zu finden in <<https://cran.r-project.org/web/packages/VCA/index.html>> [zitiert am 26.07.2018]
- Schulla J (2017) Model description WaSiM (Water balance Simulation Model) [online]. Zu finden in <http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2017_en.pdf> [zitiert am 06.07.2018]
- Sixto H, Gil PM, Ciria P, Camps F, Cañellas I, Volats J (2016) Interpreting genotype-by-environment interaction for biomass production in hybrid poplars under short-rotation coppice in Mediterranean environments. *GCB Bioenergy* 8:1124–1135, doi: 10.1111/gcbb.12313
- Steenackers J, Steenackers M, Steenackers V, Stevens M (1996) Poplar diseases, consequences on growth and wood quality. *Biomass Bioenergy* 10:267–274, doi: 10.1016/0961-9534(95)00121-2
- Wellbrock N (2006) Arbeitsanleitung für die zweite bundesweite Bodenzustandserhebung im Wald : (BZE II) ; [Arbeitsanleitung für die Außenaufnahmen]. Berlin : BMELV
- Wickham H (2009) ggplot2 : elegant graphics for data analysis. Dordrecht : Springer, 212 p
- Wissenschaftlicher Beirat Agrarpolitik beim Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (WBA) (2007) Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung : Empfehlungen an die Politik [online]. Zu finden in <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/GutachtenWBA.pdf?__blob=publicationFile> [zitiert am 22.08.2018]
- Yan W (2014) Crop variety trials : data management and analysis. Hoboken : Wiley, 360 p