Auswirkungen der Züchtung auf einen optimierten nachwachsenden Rohstoff Holz – Beispiel Pappelzüchtung

Matthias Meyer¹, Alexander Solger¹, Laura Panitz¹, Alwin Janßen², Doris Krabel¹

Zusammenfassung

Die Holzanatomie der Stämme von Pappeln ist einerseits bestimmend für die Werkstoffeigenschaften, z.B. für die Rohdichte des Holzes. Andererseits spiegeln sich physiologische Eigenschaften des Stammholzes, welches den Wasser-Ferntransport von den Wurzeln zur Krone vermittelt, in charakteristischen holzanatomischen Strukturen wider. Je effizienter Wasser durch die Gefäße (als Poren im Holzquerschnitt sichtbar) geleitet wird, desto günstiger für die Versorgung der Belaubung, welche wiederum bei ausreichendem Wasser- und Nährstoffangebot effizient Assimilate für weiteres schnelles Wachstum produzieren kann. Sind die Gefäße jedoch zu groß und die Rohdichte gering, bzw. das Holz sehr leicht, besteht ohne andere Schutzanpassungen die Gefahr, dass die betreffende Pappelsorte bei Dürren viele Gefäße durch Embolien verliert und Dürreschäden erleidet. Dies wäre ein Zeichen für eine zu geringe Trockenheitstoleranz der Bäume, welche aber besonders beim Anbau auf grundwasserfernen oder auf leichten, sandigen Standorten zu mangelnder Ertragsstabilität oder stark erhöhten Ausfallraten führt. Die vorgestellten Untersuchungen befassten sich mit der Frage, ob die durch Züchtung erhöhten Erträge der neu selektierten Pappeln des FastWOOD-Projektes durch größere Gefäße (Poren) erzielt wurden und falls ja, ob daran möglicherweise ein Verlust an Trockenheitstoleranz gekoppelt war.

Dazu wurden Querschnittspräparate des dritten Jahrringes von drei Neuzüchtungen im Prüfanbau der Projektpartner des Verbundes FastWOOD holzanatomisch analysiert und die Ergebnisse mit denen von bereits etablierten Sorten verglichen. Es wurden diejenigen Abschnitte des Jahrringes 2012 erfasst, die jeweils den Monaten Juni und Juli zuzuordnen waren und alle darin enthaltenen Gefäßlumina mittels mikroskopischer Imaging-Verfahren vermessen.

Die mittleren Gefäßlumen-Querschnittsflächen (A_G) der neu gezüchteten Akzessionen waren nicht größer als jene der zum Vergleich herangezogenen Sorten obwohl letztere im Wachstum den neuen nachstanden. Eine Regressionsanalyse zwischen A_G (Regressor) und der Dendromasse (DM) der betreffenden Bäume innerhalb der Klonsorten zeigte, dass es einen deutlichen stochastischen Zusammenhang zwischen diesen Größen gab. Die Regressionsgeraden der untersuchten neuen Sorten wiesen einen steileren Anstieg der auf. Dies bedeutet, dass die untersuchten Neuzüchtungen mit einer relativ zu den Vergleichssorten geringfügigeren Zunahme der A_G in den Monaten Juni und Juli einen höheren Dendromasse-Zugewinn realisieren können. Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass mit der besseren Dendromasse-Leistung der bisher untersuchten neuen Sorten keine unerwünschte holzanatomische Veränderung gekoppelt war. Die Erkenntnisse deuten eher auf das Vorliegen einer verbesserten, widerstandfähigeren hydraulischen Architektur des Xylems der Neuzüchtungen hin.

Schlüsselworte: Populus, Holzanatomie, Gefäß, hydraulische Architektur, Trockenheitstoleranz

¹Technische Universität Dresden, Tharandt

²Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Hann. Münden

Abstract

Impact of breeding on an optimized renewable wood resource – an example from poplar breeding

The anatomy of poplar wood is determining its material characteristics, e.g. specific gravity of the wood. On the other hand it is an important factor on the physiological functionality of the stem xylem that is conducting the sap flow from the roots to the crown part. The more efficient the sap is transported through the xylem vessels (pores), the more efficient becomes the assimilation within the foliage under conditions of favorable water and nutrient supply. But, in case of too large vessel diameters or, respectively, in case of very light wood, the considered poplar clone could suffer severely from drought because of air embolism and pronounced loss of xylem conductivity. Especially on sites with deep sandy soils far from the ground water table, this lack of drought tolerance can result in yield instability or increased percentages of plant loss. Therefore, the present work was dealing with the question if breeding progress in terms of increased yield potential of newly selected accessions of the FastWOOD project was realized on the basis of increased vessel diameters and if this, in turn, might have resulted in an undesirable reduction of drought tolerance.

To answer that question, wood anatomical investigations were carried out in cross-sections of newbred accessions of our project partners in the FastWOOD consortium. The vessel anatomy was compared with that of recent cultivars well established in Germany. We investigated the radial sections referring to the months June and July of the tree ring 2012. All vessel lumina were assessed and their lumen area was measured with the help of microscopic computer imaging.

Mean vessel-lumen area (A_G) of the new-bred accessions did not differ from that of the clone cultivars that were investigated for the purpose of comparison. A regression analysis for the relationship of A_G (regressor) and the single-tree woody biomass (or dendro-mass, DM) of the respective trees within a clone revealed a stochastic dependence between these traits. The linear regression functions of the new-bred clones had a steeper slope. This indicates that the new-bred clones are able to realize a higher increase in DM with a relatively small increase of A_G in their tree-ring wood of the months June and July. From that we conclude that no undesirable alteration in wood anatomy was linked with the yield improvement within the group of the investigated clones. The findings provide some first evidence that the new-bred clones benefit from an optimized xylem hydraulic architecture.

Keywords: Populus, wood, anatomy, vessel, hydraulic architecture, drought tolerance

Einleitung

Pappelzüchtung und Rohdichte des Pappelholzes

Pappeln (*Populus* spp.) sind noch vor den Weiden (*Salix* spp.) die wichtigsten schnellwachsenden Baumarten in Europa welche hier bereits seit langem züchterisch bearbeitet werden (Fröhlich und Grosscurth 1973, Houtzagers 1941, Jablokov 1963, Mueller und Sauer 1958-1961, von Wettstein 1946). Die Züchtung stützt sich vor allem auf die Selektion von besonders gut den Zuchtzielen entsprechenden Individuen aus natürlichen oder aus Zucht-Kollektiven, z.B. Hybridisierung-Nachkommenschaften, und auf die anschließende Prüfung der selektierten Akzessionen. Bei nachgewiesener Eignung kann ein Genotyp klonal vermehrt und zum Anbau bzw. als Kreuzungspartner vorgesehen werden. Hauptziel der Pappelzüchtung ist die Ertragsoptimierung hinsichtlich der Ertragshöhe und -sicherheit. Der Ertrag kann einerseits am Dendromasse-Ertrag bemessen werden, d.h. an der in einer bestimmen Umtriebszeit, auf einem bestimmten Standort produzierten oberirdischen Dendromasse (in Tonnen je Hektar und Jahr). Im Falle des Anbaues mit dem Ziel der stofflichen oder kombinierten stofflich-energetischen Nutzung (Stammholzproduktion) interessieren vor allem auch die Entwicklung der Stammdimensionen, d.h. des Brusthöhendurchmessers, der Baumhöhe und der forstlichen Fest- bzw. Raummaße.

Da die Pappeln bedeutende klonspezifische Rohdichte-Unterschiede aufweisen können (Pliura et al. 2007, Semple et al. 2007), muss eine schnelle Entwicklung der Stammdimensionen eines Klons nicht ausschließlich von einer gesteigerten Biomasseproduktion herrühren, sondern kann auch durch eine geringere Rohdichte, bzw. besonders weite Gefäße (Poren) des Holzes begünstigt sein. Die Rohdichte des Holzes wird wiederum entscheidend vom Bau und der Anordnung der leitenden Gefäße (Tracheen) im Xylem bestimmt. Diese Gefäßarchitektur ist jedoch gleichzeitig Grundlage für die hydraulische Architektur des Stammes bzw. die Wasserversorgung der Krone und bestimmt die Angepasstheit des Xylems an Wasserdefizite und trockene Bedingungen wesentlich mit.

Mögliche Nebeneffekte der Pappelzüchtung auf die Trockenheitstoleranz

Gemäß dem Prinzip einer Austauschbeziehung weisen Xyleme mit geringeren Gefäßradien nach Tyree & Zimmermann (2002) zwar geringere Effizienz der Saftstromleitung auf (Gesetz nach Hagen-Poiseuille), sind aber besser geschützt gegen den Verlust der Leitfähigkeit des Xylems bei durch das Eindringen von Embolien und Schäden in Gefäßen. Diese Schäden treten bei besonders negativen atmosphärischen Wasser-Potenzialen (Dürre) und den resultierenden starken Saugspannungen in den Gefäßen ein. Pappelsorten mit sehr weiten, effizient leitenden Gefäßen schaffen mit dieser Gefäßanatomie die hydraulischen Voraussetzungen für ein besonders rasches Wachstum bei optimaler Wasserversorgung. Im Gegensatz dazu bedeutet der Verlust solch großer effizienter Gefäße einen stärkeren Verlust an Leitfähigkeit bei extremen Saugspannungen. Verdeutlicht wird dies in Abb. 2 a).

Theoretisch kann demnach der höhere Ertrag einer neuen Sorte durch eine geringere Trockenheitstoleranz "erkauft" sein, weil die gesteigerte Leistung durch die genetische Veranlagung zur Bildung sehr weiter Gefäße realisiert worden sein kann. Gleichzeitig könnte zu erwarten sein, dass das betreffende Pappelholz der neuen Akzessionen besonders leicht ist.

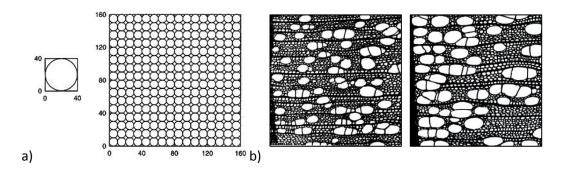


Abb. 2: a) Skizze von idealisierten Xylemen mit derselben theoretischen Leitfähigkeit (k) mit kreisförmigen Gefäßquerschnitten (Es gilt das Gesetz nach Hagen und Poiseuille; k ~ r⁴). Quelle: W.A. Côté in Zimmermann M. H. (1983): Xylem Structure and the Ascent of Sap. Springer-Verlag, 143 S. b) Querschnittsfotografien mit gleicher Vergrößerung von zwei gleich alten Bäumen aus demselben Versuchsanbau (Kambiumalter 6, Frühholz des Jahrringes 2003). Links: Aspe (*Populus tremula*, cv. "Graupa III"), rechts: Hybridpappel (*Populus* sp., cv. "Rochester").

Hinweise für die praktische Relevanz dieser Zusammenhänge können beispielsweise durch den Vergleich der Xyleme bzw. der Trockenheitsreaktionen zwischen Aspen (*Populus* Sektion *Populus*) und Hybrid-Pappeln der Sektionen *Aigeiros* und *Tacamahaca* deutlich gemacht werden. Aspen weisen im Mittel eine höhere Holzdichte, einen geringeren Gefäßanteil am Xylem und engere Gefäßlumina auf (Wagenführ 2007). Ein Beispiel zeigt der Vergleich der Frühholzbereiche einer Aspe (*P. tremula* cv. "Graupa III") mit einer Hybridpappel der Sorte "Rochester" (*P. maximowiczii* × *P. nigra* var. *plantierensis*) in Abb. 2 b). Parallel zur geringeren A_G haben Aspen in der Regel ein geringeres Ertragsniveau als Hybridpappeln, dagegen aber eine deutlich geringere Reduktion der Jahrringbreite

in Dürrejahren als diese und sind diesbezüglich trockenheitstoleranter (Liesebach et al. 2012, Meyer et al. 2013).

Ziele

Die vorgestellte Untersuchung hat zum Ziel, die mittleren Gefäßlumen-Querschnittsflächen (A_G) von ausgewählten Neuzüchtungen des Projekt-Verbundes FastWOOD im Vergleich zu Standardsorten zu prüfen. Mithilfe dieses Vergleichs soll die Frage beantwortet werden, ob sich Hinweise ergeben, dass der Züchtungsfortschritt mit ungünstigen Auswirkungen auf die hydraulische Architektur des Xylems, d.h. mit einer geringeren Trockenheitstoleranz der Saftstrom leitenden Gewebe verbunden ist. In die Betrachtungen wurden sowohl wüchsige, als auch weniger wüchsige Sorten einbezogen. Es sollten Jahrringabschnitte für die Gefäßanalysen berücksichtigt werden, welche während der Hauptwachstumsphase in den frühen Sommermonaten (Juni, Juli) entstanden.

Darüber hinaus wurde geprüft, ob eine größere mittlere A_G in den betrachteten Jahrringabschnitten mit einer höheren Einzelbaum-Biomasse der Individuen innerhalb der Sorten einhergeht. Dies müsste anhand der Analysen zu bejahen sein, da größere Gefäße eine deutlich effizientere Xylem-Saftstromleitung gewährleisten würden - s.o., Tyree und Zimmermann (2002).

Material und Methoden

Klone und Standortbedingungen

Insgesamt wurden sechs Sorten für die vorliegende Untersuchung ausgewählt, wovon jeweils drei den Neuzüchtungen des koordinierenden Projektpartners im Verbund FastWOOD (NW-FVA, Hann. Münden) bzw. den zu Vergleichszwecken im Prüfanbau (Anlage im Frühjahr 2010) einbezogenen Standardsorten zuzuordnen waren. Als Auswahlkriterien wurde der mittlere Durchmesser der Bäume eines Prüfgliedes auf der Versuchsfläche Thammenhain (Landwirtschaftsbetrieb Uhlemann, Gemeinde Lossatal OT Thammenhain, Landkreis Leipzig, Sachsen) herangezogen. Im Vergleich der sechs in Deutschland verteilt angelegten ehemals zum Anbau einjähriger landwirtschaftlicher Kulturen genutzten FastWOOD-Prüfanbauflächen (Janßen et al. 2012) waren im nordsächsischen Pürffeld in Thammenhain insgesamt die geringsten Erträge zu verzeichnen, was hauptsächlich auf die vergleichsweise niedrige klimatische Wasserbilanz in Verbindung mit einem eher kontinental getönten Klima, aber auch auf die Bodenbedingen der vorherrschenden Sandlößlandschaft (Thammenhainer Moränen-Hügelgebiet) zurückzuführen ist. Die Ackerzahl der Versuchsfläche liegt bei 42, der mittlere Jahresniederschlag liegt bei 575 mm (Wolf und Bönisch 2003).

Sowohl die drei Prüfglieder der Neuzüchtungen als auch die drei Prüfglieder der Vergleichssorten wurden so gewählt, dass je zwei Prüfglieder zu denjenigen mit den stärksten Stammfußdurchmessern im Alter 3 in der jeweiligen Gruppe der Neuzüchtungen bzw. der Vergleichssorten gehörten. Das jeweilige dritte Prüfglied war dasjenige mit dem schwächsten mittleren Stammfußdurchmesser aller Prüfglieder der Gruppe. Tabelle 1 gibt Aufschluss über die gewählten Prüfglieder.

Tabelle 1: Für die Untersuchungen ausgewählte Akzessionen der Neuzüchtungen (keine Sortennamen vergeben) und Standard-/Vergleichssorten (hier mit Sortennamen). Die Bezeichnungen wurden von der NW-FVA vergeben. Stammfußdurchmesser ($d_{0.1}$) beziehen sich auf Mittelwerte im Prüffeld Thammenhain an einer Stichprobe nach systematischer Auswahl von sechs Individuen aus jeder Akzession (Prüfglied).

| Neuzüchtungen | | Standardsorten | | |
|---------------|---------------------------|----------------|--------------------------|---------------------------|
| Akzession Nr. | $\overline{d_{0.1}}$ [cm] | Akzession Nr. | Sortenname | $\overline{d_{0.1}}$ [cm] |
| 7-234 L | 4,1 | 7-728 Z | Hybride 275 (syn. NE 42) | 3,6 |
| 7-91 R | 4,0 | 7-729 A | Max 1 | 3,5 |
| 7-344 S | 2,3 | 7-843 L | Robusta | 2,1 |

Mikroskopische Holzpräparation und anatomische Messungen

Alle Proben waren im Winter 2012 / 2013 von den Projektpartnern im Rahmen ihrer Prüffeld-Ernten nach einer Umtriebszeit von drei Jahren entnommen worden. Dabei wurden von jedem der 36 Prüfglieder auf jeder Versuchsfläche (Thammenhain, Lehmbach, Wallstave - Janßen et al. 2012) sechs, das Durchmesserspektrum repräsentierende Bäume entnommen, ihre Dimensionen, das Frisch- und Trockensubstanzgewicht bestimmt.

Bei der Ernte wurden Stammfußscheiben entnommen. Die Holzprobenausformung erfolgte durch das Herausspalten eines ca. 1,0 cm breiten Holzriegels aus den Stammfußscheiben in Nord-Süd-Richtung (Meyer et al. 2013). Die Oberflächen der Riegel-Probekörper wurden rechtwinklig zur Faserbzw. Spaltrichtung fein geschliffen. Die Jahrring- und Rindenbreiten wurden in exakt radialer Nord- und Süd-Richtung mittels Jahrring-Messtisch (LINTAB, Firma RINNTECH, Heidelberg) bestimmt.

Zur Fertigung mikroskopischer Querschnittspräparate wurden von den Riegel-Probekörpern Jahrringproben des letztangelegten Jahrringes 2012 (Südrichtung) abgespalten und mittels eines Schlittenmikrotoms (Fa. Reichert, Wien, Österreich) Querschnitte von einer Dicke zwischen 30 und 70 μ m gefertigt. Die Querschnitte wurden entlüftet und ungefärbt in Glycerin auf Objektträgern abgedeckt und fixiert.

Zum mikroskopischen Imaging wurde ein inverses Fluoreszenzmikroskop (Zeiss Axiovert 200M, Kamera: Axiocam MRm, Carl Zeiss Microscopy GmbH, Jena, Deutschland), mit automatischer XY-Steuerung des Kreuztisches und motorisiertem Z-Stack verwendet (Software: ZEN blue 2012 mit MosaiX-Funktion). Ein 20-fach vergrößerndes Objektiv (Plan-Apochromat 20× 0.8, Zeiss) kam zum Einsatz. Vor der digitalen Analyse der Images (Graubilder) wurden abgebildete störende Schäden an Gefäßwänden manuell korrigiert (Photoshop, Adobe Corporation). Alle Images wurden so besäumt, dass der linke und der rechte Bildrand den Jahrringgrenzen am Jahrringbeginn (Frühholz) bzw. am Jahrringende (Spätholz) entsprachen.

Mit der Software WinCell Pro (V. 2009a, Regent Instruments, Québec, Kanada) wurden alle hell erscheinenden Lumenflächen in den Images erfasst, die Fläche anhand ihrer Quadratpixel-Zahl bestimmt und in μm^2 umgerechnet. Außerdem wurde die X-Koordinate des Schwerpunktes jeder Lumenfläche aufgezeichnet, welche der Entfernung des Schwerpunktes vom linken Bildrand, d.h. vom Jahrringbeginn entsprach. Um Gefäße von den Lumina der Faser-, Parenchym- oder Tracheidenzellen zu unterschieden wurde ein Schwellwert von 650 μm^2 Mindest-Lumenfläche angewandt. Die finalen Datensätze wurden im txt-Format abgespeichert, mittels MS Excel (V. 2010, Microsoft Corporation) zusammengeführt und die relative Entfernung der Gefäße vom Jahrringbeginn in Prozent errechnet. Für die weiteren Analysen und Berechnungen wurden nur die Gefäße selektiert, deren Schwerpunkt sich im Jahrringabschnitt zwischen 30 % und 80 % der relativen Entfernung von der Frühholz-Jahrringgrenze befanden. Dieser Abschnitt entspricht nach Erfahrungen mit Dendrometeranalysen an sechsjährigen Pappeln (Ergebnisse nicht gezeigt) denjenigen Jahrringabschnitten, welche in den Monaten Juni und Juli angelegt werden.

Die Daten wurden mittels IMB SPSS Statistics (V. 22, IBM Corporation) statistisch ausgewertet. Für Korrelations- bzw. Regressionsanalysen zwischen der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche A_G der o.g. Abschnitte und der Dendromasse des betreffenden Baumes im Alter 3 wurden Dendromasse-Daten vom koordinierenden Projektpartner NW-FVA bereitgestellt. Für die in Abb. 5 dargestellten Daten wurde zur Prüfung auf signifikante Modelleffekte ein Generalisiertes Lineares Modell konstruiert (SPSS Prozedur: GzLM). Die Likelihood-Ratio Teststatistik wurde zum Testen der Modell-Effekte angewandt.

Ergebnisse

Klonunterschiede

Die mittleren Gefäßlumen-Querschnittsflächen (A_G) in den Juni-Juli-Abschnitten der Jahrringe 2012 der Bäume aller untersuchten Sorten beliefen sich im Mittel auf 2324 μ m² \pm 583 (\bar{X} \pm σ). Die beiden Gruppen der untersuchten Neuzüchtungen (mittlere A_G (Juni-Juli 2012) = 2306 μ m² \pm 655) und der etablierten Vergleichssorten (2344 μ m² \pm 520) unterschieden sich nicht signifikant voneinander (p = 0,862, t-Test) im Prüffeld Thammenhain.

Die sortenbezogenen Boxplots (Abb. 4) der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) der Jahrringabschnitte Juni bis Juli 2012 von Einzelbäumen zeigen, dass sich die Prüfglieder sehr deutlich hinsichtlich ihrer Gefäß-Anatomie unterscheiden. Sowohl bei den beiden wüchsigen Prüfgliedern der Vergleichssorten als auch der Neuzüchtungen gibt es jeweils ein Prüfglied mit großen mittleren Ag-Werten ("Max 1": 2948 μ m²; "7-91 R": 2908 μ m²) und je eines mit deutlich kleineren ("Hybride 275": 2189 μm^2 ; "7-234 L": 2099 μm^2). Die beiden Prüfglieder mit der höheren mittleren A_G wiesen jedoch nicht die höheren Dendromasse-Erträge (DM) in Thammenhain auf (Abb. 4, oben rechts) im Vergleich zu denjenigen mit kleineren Gefäßen, sondern waren mit ihnen auf einem vergleichbaren Niveau. Dies zeigte, dass eine höhere mittlere A_G nicht generell unter jeder Konstellation von Standortbedingungen zu besseren Wuchsergebnissen führt, sondern wie am vorliegenden Beispiel in Thammenhain auch weitere Eigenschaften der Angepasstheit der Genotypen eine Rolle gespielt haben müssen. Jedoch waren die Sorten mit den geringsten Stammfußdurchmessern (d_{0.1}, Abb. 4 u. l.) bei den Vergleichssorten und bei den Neuzüchtungen in Thammenhain gleichzeitig auch jene, welche die geringsten mittleren A_G aufwiesen ("Robusta": 2018 μm²; "7-344 S": 1516 μm²). Dies stützte die Annahme, dass generell betrachtet größere Dendromassen mit einer höheren mittleren A_G im dritten Jahrring (2012, Abschnitt Juni bis Juli) einhergegangen sind bzw. die Dendromasse und die mittlere A_G im vorliegenden Versuch als Kovariaten betrachtet werden müssen.

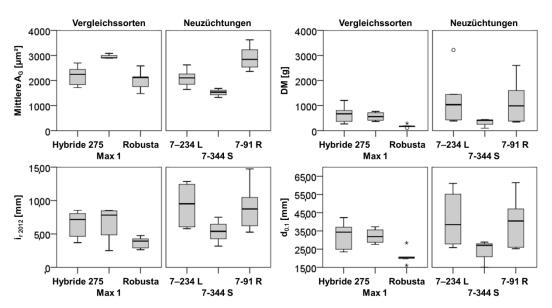


Abb. 4: Boxplots der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (AG, in μ m²) des Juni-Juli-Abschnittes des Jahrringes 2012 je Einzelbaum pro Sorte (links oben). Für dieselben Bäume wurden die statistischen Verteilungen der Einzelbaum-Dendromassen im Alter 3 (DM, in g, rechts oben), der Radialzuwächse 2012 (i $_r$ = Jahrringbreite, in mm, links unten) sowie der Stammfußdurchmesser mit Rinde im Alter 3 (d $_{0.1}$, in mm, rechts unten) anhand von Boxplots dargestellt.

Beziehung zwischen mittlerer Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) (in Holzabschnitten aus den Monaten Juni und Juli) mit der Dendromasse

Um zu überprüfen, ob die mittlere $A_{G \, (Juni \, bis \, Juli \, 2012)}$ mit der Einzelbaum-Dendromasse nach drei Jahren (DM) in einer stochastischen Beziehung steht, wurden Regressionen errechnet (Abb. 5). Für die beiden Prüfglieder "Max 1" und "7-344 S" können wegen eines zu geringen Stichprobenumfanges innerhalb der Sorten keine sicheren Aussagen getätigt werden. Die Regressionen der übrigen vier Prüfglieder ergeben entweder hohe Bestimmtheitsmaße ($R^2 \ge 0.861$) oder aber ein geringes Bestimmtheitsmaß bei gleichzeitig sehr geringem Anstieg der Regressionsgeraden ("Robusta": $R^2 = 0.198$). Die hohen Bestimmtheitsmaße bestätigen, dass A_G und DM als miteinander kovariierend betrachtet werden müssen. Die Betrachtung der Regressionsgeraden der Neuzüchtungen (Abb. 5 untere Diagrammreihe) ergibt darüber hinaus, dass sie deutlich steilere Anstiege als die Regressionen der Vergleichssorten aufweisen.

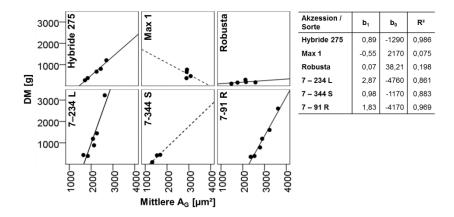


Abb. 5: Regressionsmatrix für die Einzelbaum-Dendromasse (DM) über der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) getrennt nach Akzessionen: oben Vergleichssorten; unten Neuzüchtungen. Tabelle rechts gibt die Paramter der angezeigten Regressionsgeraden wieder. b_1 ist der Anstiegsparameter, b_0 der Y-Achsenschnittpunkt entsprechend der theoretischen linearen Regressionsgleichung $y = b_1 x + b_0$. Gestrichelte Linien = unsichere Regressionsgeraden wegen zu geringen Stichprobenumfangs.

Für die Prüffelder Lehmbach (Oberbayern) und Wallstave (Altmark) lagen bereits weitere Messergebnisse für die mittlere Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) für die Prüfglieder "Max 1", "7-344 S" und "7-91 R"vor. Ein Vergleich der Regressionsgeraden zwischen den Standorten wurde hierdurch ermöglicht (Abb. 5). Die Anstiegsparameter (b_1) der angezeigten Regressionsgeraden (Gleichung $y = b_1x + b_0$) unterschieden sich zwischen den Standorten bei "Max 1" nur gering. Es reichten nur die Stichprobenumfänge der Regressionen für die Prüffelder Lehmbach ($b_1 = 0.99$) und Wallstave ($b_1 = 0.75$) aus. Für "7-344 S" sind $b_1 = 2.25$ (Lehmbach) und 0.95 (Wallstave). Für "7-91 R" lagen an allen drei Standorten ausreichende Stichprobenumfänge vor (b_1 Lehmbach = 1.23, b_1 Thammenhain = 1.83, b_1 Wallstave = 2.01). Somit kann gezeigt werden, dass sich die Anstiegsparameter der Regressionen eines Klons (Prüfglied) für die Beziehung von Einzelbaum-Dendromasse (DM) und Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) zwar zwischen den Standorten unterscheiden jedoch fallen diese Unterschiede meist vergleichsweise gering aus. Auch haben die beiden Neuzüchtungen meist höhere Anstiegsparameter b_1 als die etablierte Vergleichssorte "Max 1".

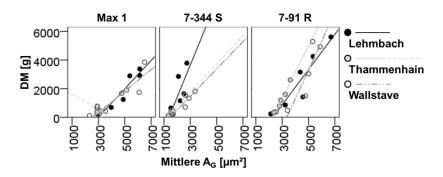


Abb. 5: Regressionsmatrix zum Standortvergleich für die Einzelbaum-Dendromasse (DM) über der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (AG). Akzessionen: "Max 1" (Vergleichssorte), "7-344 S", "7-91 R" (Neuzüchtungen). Beste Wuchsergebnisse am Standort Lehmbach (Oberbayern), schlechteste in Thammenhain (Nordsachsen). Gestrichelte Linien für Standort Thammenhain: Stichprobenumfang gering.

Für die in Abb. 5 dargestellten Daten wurde ein Generalisiertes Lineares Modell konstruiert (Tabelle 2), mit dem die mittlere Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) als abhängige (erklärte) Variable betrachtet wird. Aufgrund der stochastischen Abhängigkeit der A_G von der Dendromasse (DM), musste DM als Kovariate im Modell Beachtung finden, damit die Modelleffekte der Faktoren "Standort" (entspricht dem Prüffeld) und "Genotyp" (entspricht dem Prüfglied) auf Signifikanz getestet werden konnten. Der Interaktionseffekt "Standort × Genotyp" wurde zuerst einbezogen, fiel jedoch nicht signifikant aus (p = 0.063) und konnte im endgültigen Modell (Tabelle 2) weggelassen werden. Alle Haupt-Effekte waren hoch signifikant. Jedoch war der Effekt des Standortes – angezeigt durch einen p-Wert von exakt 0.001 – geringer als derjenige der übrigen unabhängigen Variablen, welche noch kleinere p-Werte aufwiesen.

Tabelle 2: Testergebnisse des Generalisierten Linearen Modells für die mittlere Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) der Jahrringabschnitte Juni-Juli 2012 (SPSS 22, Prozedur GzLM). Haupteffekte waren einbezogen als Faktor "Standort' mit drei Faktorstufen: Lehmbach, Thammenhain, Wallstave; Faktor "Genotyp' mit drei Stufen: "Max 1", "7-344 S", "7-91 R" (s. Abb. 5) sowie als Kovariate "Dendromasse' im Alter 3 (DM).

| Quelle der Variation | Likelihood-Quotient-χ2 | df | p-Wert |
|----------------------|------------------------|----|---------|
| (Konstanter Term) | 174,1 | 1 | < 0,001 |
| Genotyp | 54,2 | 2 | < 0,001 |
| Standort | 13,5 | 2 | 0,001 |
| DM | 117,4 | 1 | < 0,001 |

Diskussion

Genotypische Unterschiede der Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G)

Mit dem hoch signifikanten Effekt des Faktors "Genotyp" auf die Ergebnisse der holzanatomischen Gefäßuntersuchungen an drei Standorten, aber auch anhand der Lage und Variationsbreite der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (Boxplots, Abb. 4) kann gezeigt werden, dass es deutliche Unterschiede der mittleren A_G zwischen den untersuchten Genotypen im FastWOOD-Prüfanbau gibt. Diese Unterschiede können auf verschiedene mögliche genotypspezifische Charakteristika zurückzuführen sein. Grundlegend wird die Differenzierung und Dimension von Xylemzellen durch Turgorverhältnisse determiniert (vgl. Hsiao 1973, Passioura und Fry 1992). Der Differenzierung unterliegende junge Gefäßzellen unterscheiden sich von übrigen Zellen durch eine noch deutlichere Vakuolisierung (Arend und Fromm 2003). So könnten genetische Unterschiede bei der Versorgung der kambialen Bereiche mit Wasser zu den deutlichen Klon-Unterschieden bezüglich der mittleren A_G

geführt haben. Zu nennen sind außerdem die Versorgung der sich differenzierenden Xylemzellen mit Kohlenhydraten (Deslauriers et al. 2009, Krabel et al. 1999) sowie der steuernde Einfluss von Pflanzenhormonen wie Ethylen oder Auxin (Aloni 1987, Junghans et al. 2004).

Die beobachteten mittleren A_G der untersuchten Sorten im Prüffeld Thammenhain ordnen sich in vergleichbare Analysen anderer Autoren gut ein. Bei Untersuchungen von Arend und Fromm (2007) wurden an einjährigen Pappeln je nach Wasserversorgung mittlere A_G von 1000 bis etwa 1500 μm², festgestellt. Bei Schume et al. (2004) wurden je nach Bodenwasserversorgung an adulten Bäumen in Donauauenbeständen mittlere A_G von 6200 μ m² bzw. 7600 μ m² gemessen. Die letztgenannten hohen Werte werden in den vorliegenden Untersuchungen nicht erreicht. Die Klone wiesen im Mittel eine A_G von 2324 μm² auf, die Klone mit großen Gefäßen von knapp 3000 μm². Diese noch vergleichsweise geringen Werte sind durch den juvenilen Entwicklungszustand der Prüfglieder im Alter 3 erklärbar. Während der juvenilen Entwicklungsphase – bzw. im inneren Jahrringarchiv in radialer Richtung – beschreiben die Gefäßlumendimensionen wie die meisten holzanatomischen Größen einen Juvenilitätstrend (Mátyás und Peszlen 1997). Die A_G nimmt in Pappeln in den ersten Jahrringen unter geringem Kambiumalter zu (Meyer 2010). So könnten die vorgefundenen genotypischen Unterschiede zum Teil auch dadurch erklärbar sein, dass das Kambium bei den untersuchten Prüfgliedern am Standort Thammenhain unterschiedlich schnell maturisierte. Diese Unterschiede sind aber sehr wahrscheinlich nicht so bedeutend wie die genetischen Unterschiede der A_G selbst, denn dass es bedeutende genetisch bedingte holzanatomische Unterschiede zwischen Pappelsorten gibt, ist hinlänglich bekannt (z.B. Mátyás und Peszlen 1997, Meyer-Uhlenried 1959).

Tsuchiya und Furukawa (2009) zeigen, dass es zwei verschiedene Typen der Maturisation der A_G in Gehölzarten gibt. Es gibt Spezies, bei denen die A_G zum Zeitpunkt der Kulmination des jährlichen Radialzuwachses (d.h. der Jahrringbreite) maturisiert und solche, deren A_G mit dem Kulminationszeitpunkt des *durchschnittlichen* jährlichen Radialzuwachses maturisiert. Es ist nicht bekannt, zu welchem Typ Pappeln gehören, jedoch muss angenommen werden, dass die Klone in Thammenhain ihre mittlere A_G im Laufe fortschreitender Maturisation mindestens noch verdoppeln werden. Daher würde eine Wiederholung der hier vorgestellten Untersuchungen an adultem Holz nach einigen Jahren auch in Bezug auf die Werkstoffeigenschaften des adulten Holzes interessant sein.

Deutung der A_G hinsichtlich der Unterschiede der hydraulischen Architektur

Es konnten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der mittleren A_G zwischen den Neuzüchtungen und den Vergleichssorten festgestellt werden, obwohl die Neuzüchtungen in der Regel deutliche Verbesserungen der Erträge zeigten. Daher besteht- zumindest für die hier betrachteten Sorten – keine Veranlassung, von einer Verschlechterung der hydraulischen Architektur in Hinblick auf den Schutz ihres Xylems vor Dürreereignissen auszugehen. Der Vergleich mit zwei besseren Standorten zeigt, dass das Prüffeld Thammenhain zur Untersuchung der Trockenheitstoleranz von Pappeln geeigneter als die übrigen Prüffelder erscheint, weil hier neben den Wuchsergebnissen auch die Gefäßlumen-Querschnittsflächen vergleichsweise klein waren, was auf eine Anpassungsreaktion auf eine nicht optimale Bodenwasserversorgung hindeutet. Mit der Beschränkung der Analysen auf diejenigen Jahrringabschnitte, welche in den Monaten Juni und Juli gebildet wurden, wurde versucht, die Trockenheitsreaktion noch deutlicher herauszustellen. Denn in diesen beiden Monaten wird mit Abstand der stärkste intra-annuelle Radialzuwachs von den Pappeln geleistet, während gleichzeitig heiße sommerliche Perioden auftreten. Jedoch muss beachtet werden, dass auch die im Mai angelegten Jahrringabschnitte Gefäße enthalten, welche einen bedeutenden Anteil am leitenden Gewebe stellen, da Pappeln nur ein bis zwei Jahrringe zur Xylem-Saftstromleitung nutzen (Blake und Tschaplinski 1992). Die Ergebnisse zur mittleren A_G der Mai-Abschnitte sollen in folgenden Untersuchungen einbezogen werden. Dagegen ist die Reaktionsfähigkeit von Pappeln im späteren Sommer zur Xylemanpassung bei Trockenheit eher begrenzt (Arend und Fromm 2007), weshalb die zugehörigen Jahrring-Abschnitte zu recht nicht einbezogen sind.

Im Gegensatz zu den Unterschieden zwischen Neuzüchtungen und Vergleichssorten sind die beobachteten Klon-Unterschiede der A_G zwischen den Genotypen (Prüfgliedern) in Anbetracht der physiologischen, bzw. der hydraulischen Auswirkungen sehr deutlich. Dem Gesetz nach Hagen und Poiseuille entsprechend ist die Leitfähigkeit idealisierter Kapillaren proportional zur vierten Potenz des Kapillarradius. Die mittlere A_G der Bäume des neu gezüchteten Klones "7-91 R" ist etwa doppelt so groß wie der Individuen des Klons "7-344 S". Errechnet man aus der mittleren A_G einen theoretischen Kreisflächenradius, so liegt dieser mittlere theoretische Gefäßradius (idealisierte Kreisform) des Klons "7-344 S" bei etwa 22 μm und für "7-91 R" bei 30 μm. Dies würde grob geschätzt einem etwa ein Drittel größeren Radius und einer im Mittel gut verdreifachten Leitfähigkeit der Gefäße bei "7-91 R" entsprechen. Doch dieser Unterschied war nicht allein auf die genetischen Klonunterschiede zurückzuführen, sondern vor allem auch auf die Unterschiede der Baumgrößen, wie anhand der errechneten Regressionen zwischen der mittleren A_G und der Einzelbaum-Dendromasse (DM) gezeigt wird (Abb. 5).

Die hohe Signifkanz der Kovariaten DM bei der Modellierung der mittleren Gefäßlumen-Querschnittsfläche (A_G) erbringt den statistischen Beleg dafür, dass größere Individuen innerhalb eines Pappelklones auch eine größere mittlere A_G aufweisen (vgl. Aloni 1987). Dies wird auch durch die von Tyree und Zimmermann (2002) zusammengefasste Gesetzmäßigkeit unterstützt, wonach größere mittlere Gefäßlumina einen effizienteren Wassertransport im Xylem ermöglichen. Dieser ist wiederum die Basis für eine optimale Wasser- und Nährstoffversorgung der Krone und für schnelles Wachstum. Anderseits sind Unterschiede zwischen Klonen hinsichtlich ihrer mittleren A_G kein guter Weiser für Unterschiede in der Trockenheitstoleranz dieser Klone. Der von Tyree und Zimmermann (2002) postulierte Zusammenhang zwischen einer geringeren Gefäßlumen-Querschnittsfläche oder auch einer höheren Holzdichte mit einem besseren Schutz vor Verlusten von Leitfähigkeit und vor Kavitationen bzw. Embolien bei Dürre, ist zwar physikalischen Gesetzen des kapillaren Flüssigkeitstransportes entsprechend nicht von der Hand zu weisen, ist jedoch beim Vergleich von Pappelklonen kaum nachweisbar (Cochard et al. 2007). Harvey und van den Driessche (1997) untersuchten Klone, welche zwar trockenheitstoleranter waren, jedoch im Mittel größere Gefäße hatten. Auch die vorliegenden Ergebnisse deuten an, dass die bedeutenden Sortenunterschiede der mittleren A_G allein betrachtet nicht ausreichen, um die Trockenheitstoleranz (d.h. minimierte Ertragsausfälle unter Trockenheit oder Kavitationsresistenz) zu erklären. Weitere wichtige Einflussgrößen, die zur Angepasstheit der hydraulischen Architektur gegen Kavitationen beitragen, sind zum Beispiel die stomatäre Regulation oder auch die Zellwandstärken im Xylem, der Grad Lignifizierung der Gefäßzellwände oder die Tüpfelmembran-Durchmesser (Harvey und van den Driessche 1997, Junghans et al. 2004).

Umso interessanter erscheinen deshalb die vorliegenden Ergebnisse zu den Anstiegen des beobachteten linearen stochastischen Zusammenhangs zwischen DM und A_G von Neuzüchtungen und Vergleichssorten. Die Neuzüchtungen weisen in Thammenhain unabhängig von ihrer Wüchsigkeit einen höheren Anstieg der Regressionsgeraden auf als die Vergleichssorten. Dies wird für die Klone "7-344 S" und "7-91 R" auch an den Daten der Standorte Lehmbach und Wallstave bestätigt, wo im Vergleich zu "Max1" größere lineare Anstiege errechnet wurden. Die Individuen innerhalb der neuen Sorten bedurften demnach einer nur vergleichsweise geringen Zunahme der mittleren A_G für eine gesteigerte Dendromasse-Produktion. Dies wird als Hinweis interpretiert, dass das Risiko, Schäden durch Kavitäten / Embolien bei Dürre zu erleiden, bei den größeren Individuen der Neuzüchtungen geringer ist als bei den größeren Individuen der Vergleichssorten. Es ist auch möglich, dass innerhalb der Neuzüchtungen mit steigender Dendromasse-Produktion ein weniger deutlich steigender Transpirationswasserbedarf einhergeht. Um diesen Punkt zu klären müssen weitere Analysen unter Einbeziehung weiterer Neuzüchtungen erfolgen.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Annahmen, dass es unerwünschte Kopplungen zwischen dem genetischen Gewinn bezüglich des Stammholz- oder Dendromasse-Ertrages und negativen Veränderungen der Holzanatomie bezüglich der Trockenheitstoleranz gibt, haben sich anhand der untersuchten Sorten nicht bestätigt. Dagegen liegen zumindest für die Gruppe der hier untersuchten Pappeln Indizien vor, dass die Neuzüchtungen ihren gesteigerten Ertrag auch durch eine gut angepasste Anatomie, bzw. eine geeignete hydraulische Architektur ihres Xylems realisieren konnten.

Um abschließende Aussagen treffen zu können, müssen weitere Sorten in derartige Untersuchungen einbezogen werden. Außerdem ist das physiologische Ertragsverhalten von Neuzüchtungen erst dann vollkommen zu beurteilen, wenn auch holzanatomische Untersuchungsergebnisse für adultes Holz aus längeren Anbauversuchen vorliegen. Dies wird für die Neuzüchtungen erst in wenigen Jahren möglich sein. Dagegen sollten in künftige Analysen auch andere gefäßanatomische Eigenschaften einbezogen werden, beispielsweise sind die Anordnung der Gefäße im Xylemquerschnitt, aber vor allem auch intra-annuelle Veränderungen der Gefäßgrößen infolge des Witterungsverlaufs oder Trockenereignissen interessante Indikatoren für die physiologische Antwort der hydraulischen Architektur der Pappel-Neuzüchtungen.

Danksagung

Wir danken den Projektpartnern im Verbund FastWOOD, welche uns Proben bereit stellten und wir danken ihnen für den im Rahmen dessen geleisteten Mehraufwand bei der Beerntung der Prüffelder. Den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Imaging-Facility des Biotechnology Center der TU Dresden (biotec) sei herzlich für Ihre Beratung bei Mikroskopie und Softwarewahl gedankt. Unser besonderer Dank gilt der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), deren Mitarbeitern Herrn Dr. Öhme, Frau Urban sowie dem Bundesministerium für Ernährung Landwirtschaft und Verbraucherschutz für die finanzielle Förderung (FKz: 11NR029; 22002911) bzw. für die freundliche Unterstützung.

Literatur

- Aloni R, 1987: Differentiation of Vascular Tissues. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 38: 179-204.
- Arend M, Fromm J, 2003: Ultrastructural changes in cambial cell derivatives during xylem differentiation in poplar. Plant Biology 5: 255-264.
- Arend M, Fromm J, 2007: Seasonal change in the drought response of wood cell development in poplar. Tree Physiol 27: 985-992.
- Blake TJ, Tschaplinski TJ, 1992: 3. Water Relations. In: Mitchell CP, Ford-Robertson JB, Hinckley T, Sennerby-Forsse L (eds) Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops. Elsevier Applied Science, London, New York: 66-94.
- Cochard H, Casella E, Mencuccini M, 2007: Xylem vulnerability to cavitation varies among poplar and willow clones and correlates with yield. Tree Physiol 27: 1761-1767.
- Deslauriers A, Giovannelli A, Rossi S, Castro G, Fragnelli G, Traversi L, 2009: Intra-annual cambial activity and carbon availability in stem of poplar. Tree Physiol 29: 1223-1235.
- Fröhlich HJ, Grosscurth W, 1973: Züchtung, Anbau und Leistung der Pappeln. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main, 236 S.
- Harvey HP, van den Driessche R, 1997: Nutrition, xylem cavitation and drought resistance in hybrid poplar. Tree Physiol 17: 647-654.
- Houtzagers G, 1941: Die Gattung Populus und ihre forstliche Bedeutung (Nach der niederländischen Auflage ins Deutsche übersetzt und hrsg. von W. Kemper). Verlag M. & H. Schaper, Hannover, 196 S.
- Hsiao TC, 1973 Plant responses to water stress. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology 24: 519-570.

- Jablokov AS, 1963: Growth and breeding of healthy aspen. [Яблоков А.С. Воспитание и разведение здоровой осины]. М. Гослесбумиздат, 442 S.
- Janßen A, Fehrenz S, Fey-Wagner C, Hüller W, 2012: Züchtung von Schwarz- und Balsampappeln für den Kurzumtrieb. Beiträge aus der NW-FVA. Band 8: 33-54.
- Junghans U, Langenfeld-Heyser R, Polle A, Teichmann T, 2004: Effect of auxin transport inhibitors and ethylene on the wood anatomy of poplar. Plant Biology 6: 22-29.
- Krabel D, Roloff A, Bodson M, 1999: Influence of sucrose on seasonal cambial growth. J Exp Bot 50 (Suppl.): 25-26.
- Liesebach M, Schneck V, Wolf H, 2012: Züchtung von Aspen für den Kurzumtrieb. Beiträge aus der NW-FVA. Band 8: 71-90.
- Mátyás C, Peszlen I, 1997: Effect of age on selected wood quality traits of poplar clones. Silvae Genet 46: 64-72.
- Meyer-Uhlenried KH, 1959: Über die Vererbung von Holzfaserlängen bei verschiedenen Arten der Gattung Populus. Der Züchter 29: 117-123.
- Meyer M, 2010: Trockenheitsreaktionen und holzanatomische Eigenschaften der Zitter-Pappel (Populus tremula L.) Physiologie und QTL-Mapping. Forstwiss. Beitr. Tharandt 31: 174 S.
- Meyer M, Solger A, Krabel D, 2013: Xylem cell length under drought and its value for predicting radial growth of SRF poplar cultivars (*Populus* spp.). Trees 27: 1353-1363.
- Mueller R, Sauer E, 1958-1961: Altstammsorten der Schwarzpappelbastarde für den Anbau in Deutschland (Sonderdruck in zwei Bänden). Holz-Zentralblatt, Stuttgart, 167 S.
- Passioura JB, Fry SC, 1992: Turgor and Cell Expansion Beyond the Lockhart Equation. Australian Journal of Plant Physiology 19: 565-576.
- Pliura A, Zhang SY, MacKay J, Bousquet J, 2007: Genotypic variation in wood density and growth traits of poplar hybrids at four clonal trials. Forest Ecology and Management 238: 92-106.
- Schume H, Grabner M, Eckmullner O, 2004: The influence of an altered groundwater regime on vessel properties of hybrid poplar. Trees-Struct Funct 18: 184-194.
- Semple KE, Vaillant MH, Kang KY, Oh SW, Smith GD, Mansfield SD, 2007: Evaluating the suitability of hybrid poplar clones for the manufacture of oriented strand boards. Holzforschung 61: 430-438.
- Tsuchiya R, Furukawa I, 2009 Radial variation of vessel lumen diameter in relation to stem increment in 30 hardwood species. Iawa J 30: 331-342.
- Tyree M, Zimmermann MH, 2002: Xylem Structure and the Ascent of Sap, 2 edn. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 283 S.
- von Wettstein W, 1946: Die "Zellulosepappel". Ihre Kultur und Züchtung. Der Züchter [Theoretical and Applied Genetics] 17/18: 13-19.
- Wagenführ R, 2007: Holzatlas, 6 edn. Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, München, 816 S.
- Wolf H, Bönisch B, 2003: Modellvorhaben StoraEnso / Verbundvorhaben Pappelanbau für die Papierherstellung: Teilvorhaben Anbau von Pappeln und Aspen auf potentiellen landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase I), Monitoring von Pappelanbauten auf landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase II). Abschlussbericht Förderkennzeichen 95 NR 142 / 00 NR 094. Sächsisches Landesforstpräsidium, Bonnewitzer Straße 34, 01796 Pirna OT Graupa, download 08.12.2014: http://www.energieholz-portal.de/files/abschlussbericht storaenso projekt.pdf, 73 S.

Korrespondierender Autor:

Matthias Meyer Technische Universität Dresden Institut für Forstbotanik und Forstzoologie AG molekulare Gehölzphysiologie Pienner Straße 7 01737 Tharandt matthias.meyer@tu-dresden.de