

Ergebnisse zur Nettoprimärproduktion von mit biologisch geklärtem Abwasser bewässerten Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb

Konrad Lorenz* und Jürgen Müller*

Zusammenfassung

In der Thüringer Ackerebene, einer der trockensten Regionen Deutschlands, wurden unterschiedlich alte Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb mit biologisch geklärtem Abwasser bewässert. Schwerpunkt der Untersuchungen war die Ermittlung der Nettoprimärproduktion und des Wachstums von bewässerten und unbewässerten Bestandesflächen. Mit diesen Untersuchungen sollte beispielhaft der Nachweis erbracht werden, dass für die Produktion von Energieholz die Nutzung von Abwasser in trockenen Gebieten ein zusätzliches Wasser- und Nährstoffpotential darstellt. Der Bewässerungsbedarf der Bestände wird mit dem Wasserhaushaltsmodell („Zephyr“) ermittelt. In Abhängigkeit von der Witterung, des Bodens und der Pflanzenentwicklung werden der Termin und die Höhe der Zusatzwassergabe berechnet.

Die ersten Ergebnisse zeigen bezüglich der Nettoprimärproduktion positive Bewässerungseffekte. Die bewässerten Individuen weisen eine größere Biomasse, unterteilt in holziger und Blattbiomasse, auf. Die phänologischen Beobachtungen zeigten eine Differenzierung des Blattfalls. So setzte bei den bewässerten Beständen der Blattfall später als bei den unbewässerten ein. Die Zusatzbewässerung hatte auf den Blattaustrieb keinen zeitlichen Effekt.

Schlüsselwörter: *Kurzumtriebsplantagen, Klimawandel, Trockenheit, biologisch geklärtes Abwasser, Waldwachstum, Phänologie*

Summary

Results for net primary production from with biologically treated wastewater irrigated poplars and willows in short rotation coppices

In the lowland of Thuringia, one of the driest regions in Germany, short rotation coppices stocked with poplar and willow clones were watered with biologically clarified wastewater. The focus of the study was the determination of the net primary production and growth of watered and non-watered residuals, respectively. The study aims to provide evidence that, for the production of energy wood, the use of wastewater in dry areas presents an additional water- and nutrient source. The watering demand of stocks is determined by the water balance model („Zephyr“). Depending on weather conditions, soil, and plant development date and amount of additional water transfer are calculated.

The first results show a positive effect of watering regarding net primary production. The watered individuals have a greater biomass, divided into woody and leafy biomass. The phenological observations showed differences in leaf fall occurring later for the watered individuals. However, there was no effect on leaf occurrence with the addition of water.

Keywords: *short rotation coppices, climate change, drought, biologically clarified wastewater, forest growth, phenology*

* Johann Heinrich von Thünen-Institut, Institute für Waldökosysteme, Alfred Möller Straße 1, 16225 Eberswalde

Kontakt: konrad.lorenz@ti.bund.de

1 Einleitung

Ziel des vom BMBF geförderten Verbundprojektes BEST (Bioenergie-Regionen Stärken) ist die Entwicklung von regional angepassten Konzepten zur Biomasseproduktion bezüglich ihrer ökologischen und ökonomischen Auswirkungen. Die Untersuchungen erfolgen in den Beispielregionen Göttinger Land und Thüringer Ackerebene (BERTA). Die Regionen unterscheiden sich in ihren naturräumlichen Gegebenheiten (Witterung, Boden). Die Thüringer Ackerebene gehört zu den trockensten Gebieten Deutschlands. In Dachwig (Thüringen) sind in der Referenzperiode 1961 bis 1990 494 mm Niederschlag (DWD) pro Jahr gefallen, dies sind fast 300 mm weniger als im langjährigen Mittel für Deutschland. Im Zuge des prognostizierten Klimawandels (Kunka 2004) soll sich die Trockenheit in der Thüringer Ackerebene noch verstärken.

Der Untersuchungsschwerpunkt liegt in der Erarbeitung von innovativen Nutzungskonzepten zur Energieholzzerzeugung in Kurzumtriebsplantagen (KUP). Ziel des KUP-Anbaus ist die maximale Produktion von Energieholz zur weiteren thermischen Verwertung. Zur Reduzierung des vorhandenen Wasserdefizits wäre der Einsatz von biologisch geklärtem Abwasser für die Bewässerung von KUP eine prüfenswerte Fragestellung. Dadurch ist es möglich, Wasser in der Region zu halten, welches sonst über die Vorfluter in die Flüsse abfließen würde. Damit stehen diese Forschungen in der Region BERTA als Beispiel für die Nutzung von Wasserreserven zur Erzeugung von Holziger Biomasse in Wassermangelregionen. Ziel ist es deshalb, die Effekte des Abwassereinsatzes in unterschiedlich alten Pappel- und Weidenbeständen zu untersuchen. Der Schwerpunkt liegt in der Ermittlung der oberirdischen Biomasse auf den bewässerten und unbewässerten Beständen.

Durch steigende Energiekosten stößt der Anbau von schnellwachsenden Baumarten auf ein wachsendes Interesse (Röhrich und Ruscher, 2009). Dem Landwirt wird es durch eine verbesserte Gesetzgebung (EEG) vereinfacht, auf landwirtschaftlich genutzten Flächen schnellwachsende Baumarten anzubauen.

Schnellwachsende Baumarten verbrauchen im Vergleich zu traditionellen Ackerfrüchten mehr Wasser (Lamersdorf und Schulte-Bisping, 2010; Petzold et al., 2009; Dimitriou et al. 2009). Bei nicht ausreichender Wasserversorgung können Zuwachseinbußen entstehen.

2 Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die für die Untersuchungen eingerichteten Versuchsflächen „BERTA I“ und „BERTA II“ liegen in der Thüringer Ackerebene, nordwestlich des Ortes Großfahner (Abbildung 1).

In die Untersuchungen wurden zwei Standorte mit jeweils zwei unterschiedlichen Baumarten einbezogen. Die Versuchsflächen „BERTA I“ sind durch eine carbonathaltige Lössfließerde über stark humosem Sediment charakterisiert. Es handelt sich hierbei um eine Braunerde. Anfang April 2011 lag der Grundwasserflurabstand bei ca. 80 cm Bodentiefe.

Durch Wasserhaltungsmaßnahmen im Bereich der Bestandesflächen sank der Grundwasserstand ab Herbst 2011 unter 2,8 m (Tiefe des gesetzten Pegels). Bei „BERTA II“ handelt es sich um eine Braunerde-Rendzina. Carbonathaltige, umgelagerte Keuperablagerungen liegen auf tonig kalkhaltigen Ablagerungen (Hartmann, 2014). Auf dem Standort „BERTA II“ liegt keine Grundwasserbeeinflussung vor. Auf beiden Versuchsflächen ist die Bodenart toniger Schluff (Hartmann, 2013). Daraus ergibt sich eine nutzbare Feldkapazität (nFK) von 262 mm („BERTA I“) und 139 mm („BERTA II“) bis 160 cm Bodentiefe.



Abbildung 1
Luftbild der Versuchsflächen „BERTA“ (Bioenergie-Region Thüringer Ackerebene)
(Quelle: Google-Earth)

Das Jahr 2011 war im Vergleich zum langjährigen Mittel ein Trockenjahr. Die ohnehin schon geringen Niederschläge (vgl. Einleitung) liegen im Jahr 2011 mit 399 mm unter den Niederschlagsmengen des langjährigen Mittels. Die Niederschlagshöhe des Jahres 2012 ist ähnlich der des langjährigen Mittels (507 mm). In den Jahren 2011 und 2012 ist nach Abbildung 2 eine Frühjahrstrockenheit festzustellen. Bei höheren Temperaturen sind geringere Niederschläge gefallen. Im Gegensatz zum trockenen Frühjahr ist in beiden Jahren ein feuchterer und wärmerer Sommer als im langjährigen Mittel zu erkennen. Außer im August 2012 sind die Niederschlagsmengen in beiden Jahren höher als im langjährigen Mittel. Im Herbst beider Jahre wird ein Niederschlagsdefizit deutlich. Außer im Oktober 2011 und im November 2012 sind auch im Herbst beider Jahre weniger Niederschläge gefallen als im langjährigen Mittel. Die Durchschnittstemperaturen sind insgesamt leicht erhöht.

Das Untersuchungsgebiet „BERTA I“ ist mit Pappel- und Weidenklonen per Stecklingspflanzung in unterschiedlichen Jahren bepflanzt worden. Japanklon (Pappel) und Tora (Weide) wurden im Jahr 2008 auf „BERTA I“ zu Einzelreihen angepflanzt. Bei einer Dichte von fast 30.000 Individuen pro Hektar (0,75 x 0,45 m) ist der Japanklon sehr dichtstehend. Tora wurde zu ca. 13.500 Individuen pro Hektar (1,67 x 0,45 m) gepflanzt. Das Versuchsflächendesign von „BERTA I“ ist in Abbildung 3 dargestellt.

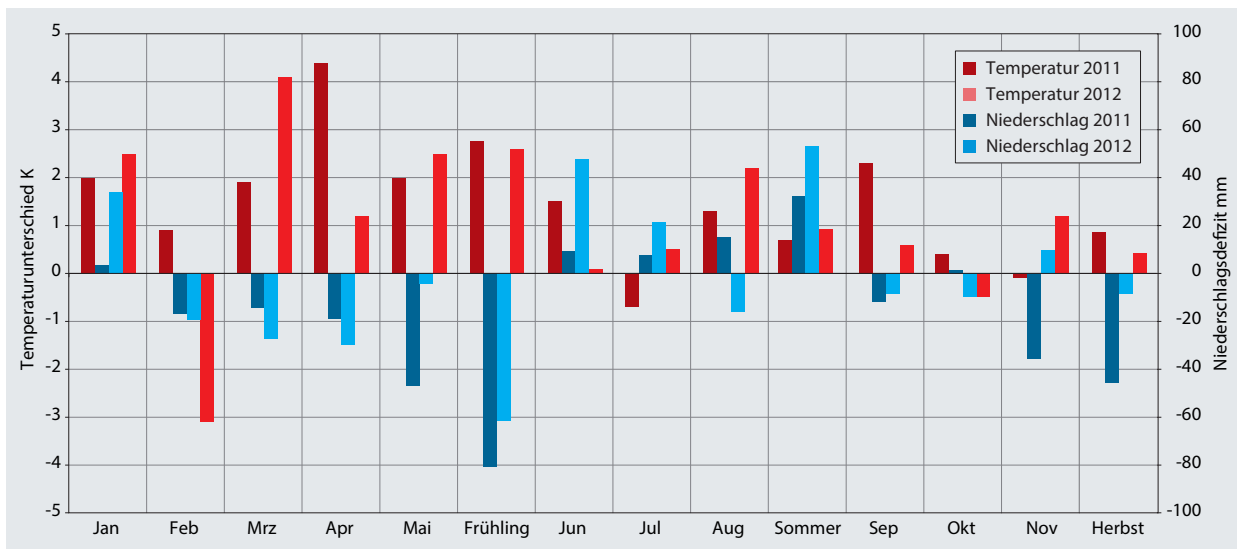


Abbildung 2 Vergleich des Wetters der Jahre 2011 und 2012 mit dem langjährigen Mittel

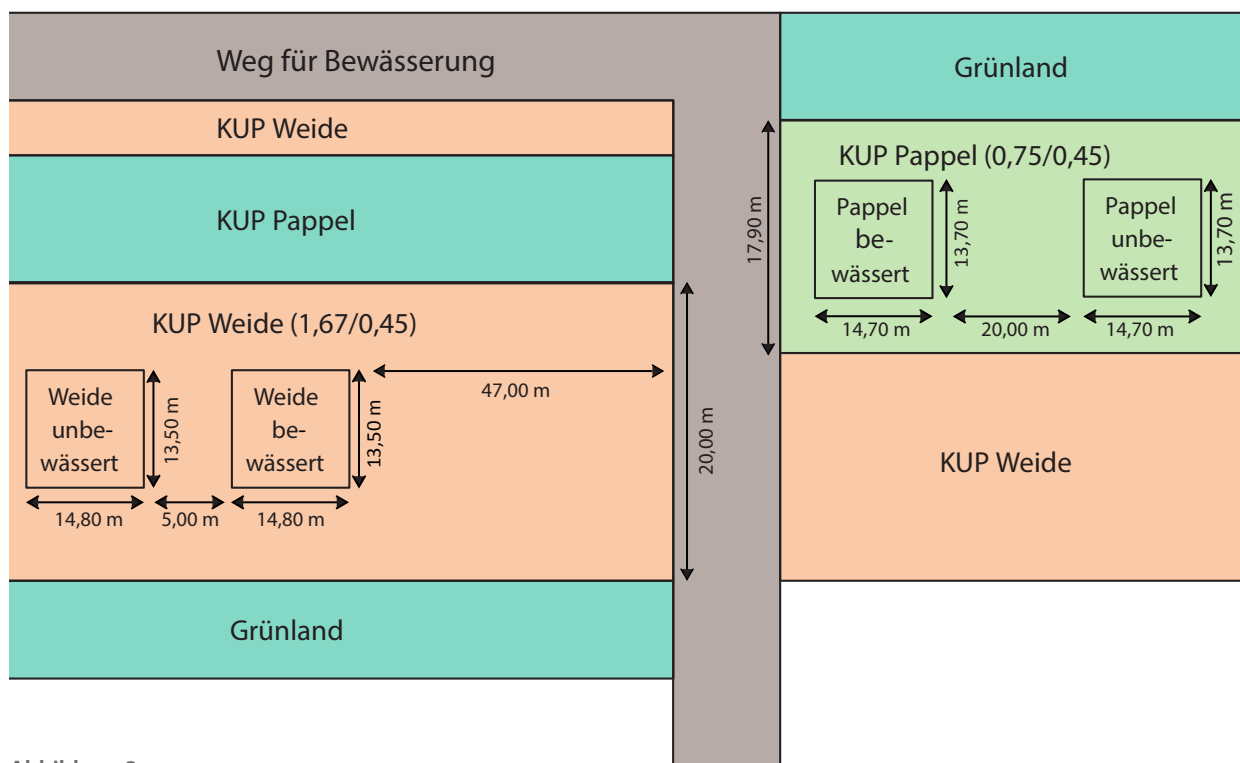


Abbildung 3 Schematische Darstellung der Versuchsfläche „BERTA I“

Im Frühjahr des Jahres 2011 wurden auf „BERTA II“ Max 1 (Pappel) und Tordis (Weide) in Doppelreihen gepflanzt. Max 1 weist dabei eine Individuendichte von 9.000 Pflanzen pro Hektar (0,75 x 1,00 x 1,50m) auf. Tordis wurde in einem engeren Pflanzabstand von 12.000 Pflanzen pro Hektar (0,75 x 0,75 x 1,50 m) durch eine Stecklingspflanzung in den Boden eingebracht. Die bewässerten und unbewässerten Versuchsflächen haben eine Fläche von jeweils 200m². Das Versuchsflächendesign von „BERTA II“ ist in Abbildung 4 dargestellt.

2.2 Instrumentierung der Versuchsflächen

Der Freilandniederschlag wird auf „BERTA I“ und „BERTA II“ in einem Meter Höhe mit jeweils drei Niederschlags-sammlern gemessen. Sie haben eine Oberfläche von 100cm². Der Kronendurchlass wird auf „BERTA I“ mit Hilfe von Niederschlagsrinnen und der Stammabfluss durch Stammabflusskragen gesammelt und gemessen (Abbildung 5). Beide Elemente des Bestandesnieder-schlag werden einmal monatlich ermittelt (Tabelle 1).

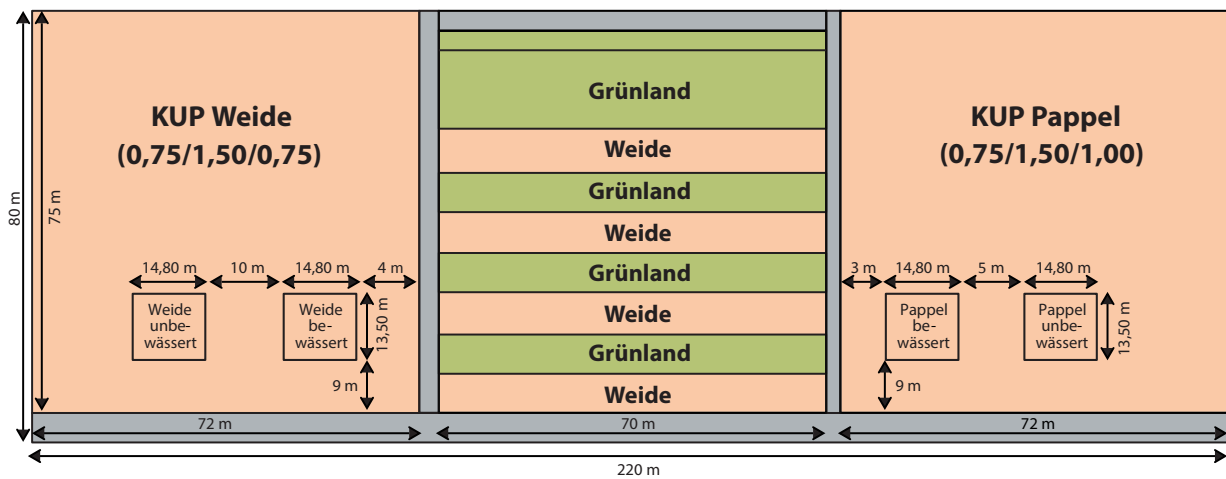


Abbildung 4

Schematische Darstellung der Versuchsfläche „BERTA II“



Abbildung 5

Messung des Bestandesniederschlags mittels Rinnen auf der Versuchsfläche „BERTA I“

Auf „BERTA II“ war es nicht möglich, durch die tiefe Belaubung Niederschlagsrinnen und durch die geringen Stammdurchmesser Stammabflusskragen zu installieren. Es wurden Bodentransekte von Niederschlagssammlern auf den Versuchsflächen installiert. Aus dem Verhältnis zwischen dem Bestandes- und dem Freilandniederschlag lässt sich die Interzeption berechnen.

Die Wirkung der Zusatzbewässerung auf die Stammdurchmesser wird auf den Versuchsflächen von „BERTA I“ kontinuierlich mit Dauerumfangmessbändern (Dendrometer) ermittelt (Tabelle 2). Aus den sich ergebenden Differenzierungen hinsichtlich der Entwicklung der radialen Stammdurchmesser zwischen den bewässerten und unbewässerten Beständen wird auf eine Mehrertragswirkung durch die Abwasserbewässerung geschlossen. Dabei wurden repräsentative Individuen der Kraft'schen Klassen I und II (I: vorherrschend, II: mitherrschend) (Kraft, 1884) ausgewählt. Nach Murach et al. (2008) hängt die Baumhöhe von der Wasserverfügbarkeit ab. Auf den Versuchsparzellen von „BERTA II“ wird deshalb der aus den Bewässerungen entstandene Mehrertrag durch die kontinuierliche Messung der Einzelbaumhöhen an repräsentativen Individuen erfasst (Tabelle 2).

Am Ende jeder Vegetationsperiode wird auf allen Versuchsflächen eine Vollaufnahme bzw. Vollklappung durchgeführt. Konkret werden dabei auf „BERTA I“ von allen Trieben (Leittrieb + Stockausschlag) die BHD (Brusthöhendurchmesser $d_{1,3}$) ermittelt. Um eine repräsentative Bestandes-Höhenkurve errechnen zu können, wurden zusätzlich ca. 40 Individuen pro Versuchsfläche ausgewählt, bei denen die Einzelbaumhöhe gemessen wurde. Auf „BERTA II“ wird eine Vollaufnahme durchgeführt. Von jedem Stockausschlag und Leittrieb werden der WHD (Wurzeldurchmesser $d_{0,1}$), der BHD und die Einzelbaumhöhe gemessen. Die Bestandes-Höhen-

Tabelle 1

Methoden zur Messung von Wetterdaten

| Parameter | Geräte | Erfassungsrhythmus | |
|----------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| | | BERTA I | BERTA II |
| Freilandniederschlag | Niederschlagssammler | 3 Niederschlagssammler, nach Niederschlagsereignis | 3 Niederschlagssammler, nach Niederschlagsereignis |
| Kronendurchlass | Niederschlagssammler Niederschlagsrinnen | 4 x 2 Niederschlagsrinnen, 1 x pro Monat | 4 x 15 Niederschlagssammler, 1 x pro Monat |
| Stammabfluss | Stammabflusskragen | 4 Stammabflusskragen nach Niederschlagsereignis | ---- |

kurve ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen WHD und der Einzelbaumhöhe.

$$h_i = a_1 * e^{\left(\frac{a_2}{b}\right)} + b$$

- h_i Einzelbaumhöhe (m)
- a_i Regressionskoeffizienten
- d Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) / Wurzelhalsdurchmesser ($d_{0,1}$) in cm
- b Regressionskoeffizient ($d_{1,3} : 1,3; d_{0,1} : 0,1$)

Die Bestandes-Höhenkurve beschreibt nach Gadow (2003) „eine einheitliche bzw. generelle Beziehung zwischen dem Baumdurchmesser [BHD/WHD] und den -höhen [h].“ Die Einzelbaumhöhe wird mit der Michailov-Funktion berechnet. Die Projektion von Einzelbaumhöhen für Bäume, bei denen diese nicht gemessen wurde, ist dadurch möglich. Die Grundflächenmittelhöhe ergibt sich wie folgt:

$$h_m = \frac{\sum (h_i * g_i)}{G}$$

- h_m Grundflächenmittelhöhe (m)
- h_i Einzelbaumhöhe (m)
- g_i Einzelbaumgrundfläche (m²)
- G Bestandesgrundfläche (m²/ha)

Zur Berechnung der Grundflächenmittelhöhe der Bestände auf „BERTA II“ wird der WHD verwendet. Nicht alle Individuen wiesen 2012 eine Höhe von 1,30 m auf, um dort den Stammdurchmesser (BHD) zu messen. Es führt zu Fehlberechnungen der Einzelbaumhöhe und damit der Grundflächenmittelhöhe, wenn nicht alle Individuen in die Berechnung einbezogen werden. Auf „BERTA I“ wurde der BHD als Berechnungsgrundlage für die Grundflächenmittelhöhe gemessen. Die Auswirkungen eines größeren Wasserangebots auf das Baumwachstum können nach Fischer et al. (2010) für Pappeln und nach Linderson et al. (2007) für Weiden durch die Wasser-

nutzungseffizienz dargestellt werden. Dafür ist es notwendig, einen Wachstumsparameter einer Entwicklung der Wasserverfügbarkeit gegenüber zu stellen. Zur Bewertung der Effizienz des eingesetzten Zusatzwassers wird der berechnete Zuwachs des Stammholzvorrats und der Niederschlag der Vegetationsperioden 2011 und 2012 (01.04. bis 31.10.) und die Bewässerungsmenge genutzt.

$$WE = \frac{(\sum \frac{\pi}{4} d_{i+1}^2) * h_{m,i+1} \cdot f - (\sum \frac{\pi}{4} d_i^2) * h_{m,i} \cdot f}{((N_F - (N_F * I) + N_B)}$$

- WE Wassereffizienz
- d_i Brusthöhendurchmesser ($d_{1,3}$) / Wurzelhalsdurchmesser ($d_{0,1}$) der Einzelbäume im Jahr (m)
- $h_{m,i}$ Grundflächenmittelhöhe im Jahr i (m)
- f Formzahl (Pappel: 0,45; Weide: 0,60)¹
- N_F Freilandniederschlag der Vegetationsperiode (m³/ha)

Nach Fischer et al. (2010) und Linderson et al. (2007) wird die Wassernutzungseffizienz in Gramm Biomasse pro Kilogramm Wassermenge angegeben. Die Biomasse konnte von uns nicht jährlich durch die Benutzung der destruktiven Regressionsmethode (Röhle 2009) berechnet werden. Eine Entnahme einer repräsentativen Menge von Individuen zur Ermittlung der Einzelbaumbiomasse hätte zu einer Veränderung der Bestandesstruktur geführt. Die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchsjahren wäre damit gemindert worden. Somit war es nicht möglich, die gebildete Biomasse pro Hektar zu schätzen. Als Hilfsgröße wurde deshalb der Stammholzvorrat ausgewählt, weil die Berechnung dieser Wachstumsgröße keine Baumentnahme voraussetzt und damit eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Versuchsjahren möglich ist.

Auf „BERTA I“ wird mit Hilfe einer repräsentativen Menge an Laubsammlern in vorgegebenen zeitlichen Abständen die Blattmasse gesammelt, bei 105 °C getrocknet, gewogen und auf einen Hektar hochgerechnet (Tabelle 3). „Auf BERTA II“ ist durch die relativ geringe Baumhöhe und Tiefe der Seitenbestattung und dem damit einhergehenden tiefen Kronenansatz eine Installation von Laubsammlern nicht möglich. Es werden

Tabelle 2
Methoden zur Messung von Wetterdaten

| Parameter | Geräte | Erfassungsrhythmus | |
|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | | BERTA I | BERTA II |
| Änderung des Stammdurchmessers innerhalb der Vegetationsperiode | Dendrometer | 4 x 8 Dendrometer 01.04. – 30.09., 3 x pro Woche | ---- |
| Änderung der Baumhöhe innerhalb der Vegetationsperiode | Teleskop-Höhenmessstange | ---- | 2 x 10 (Pappel) + 2 x 15 (Weide) Höhenmessbäume 01.04. – 30.09. 2 x pro Woche |
| Jährlicher Ertrag | Kluppe, Feinkluppe, Teleskop-Höhenmessstange | Vollkluppung, Höhenmessung an repräsentativen Bäumen, nach der Vegetationsperiode | Vollkluppung, Höhenmessung an allen Bäumen, nach der Vegetationsperiode |

¹ Formzahlen für Pappel und Weide nach den Daten von Smalian aus Rohe et al. (2009) und Baur (1891)

Tabelle 3

Methoden zur Messung der Blattbiomasse

| Parameter | Geräte | Erfassungsrhythmus | |
|---------------|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| | | BERTA I | BERTA II |
| Blattbiomasse | Laubsammler | 4 x 14 Laubsammler (Grundfläche: 0,25 m ² / Laubsammler) 1 x pro Monat bzw. im Herbst 1 x in 2 Wochen | Blatternte von repräsentativen Bäumen Ende der Vegetationsperiode |

Tabelle 4

Methoden der phänologischen Aufnahme

| Parameter | Geräte | Erfassungsrhythmus | |
|------------|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| | | BERTA I | BERTA II |
| Phänologie | Fotokamera | Blattaustrieb: 01.04. - 15.05., 3 x pro Woche, Blattfall: 15.07. - 15.11., 3 x pro Woche | Blattaustrieb: 01.04. - 15.05., 3x pro Woche, Blattfall: 01.08. - 15.11., 3 x pro Woche |

an einer repräsentativen Anzahl von Bäumen Ganzbaum-ernten durchgeführt (Tabelle 3). Zudem werden die Blattoberflächen einer repräsentativen Anzahl von Einzelblättern getrocknet und das Gewicht bestimmt. Außerdem wird die Blattoberfläche ermittelt und das Verhältnis aus Oberfläche und Blattgewicht errechnet. Dadurch ist es möglich, den LAI (Blattflächenindex) zu schätzen.

2.3 Phänologische Aufnahmen

Nach Nüske (2012) beschäftigt sich die Phänologie mit periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungsereignissen. Dabei werden im Rahmen dieses Projektes der Blattaustrieb und der Blattfall beobachtet. Der Blattaustrieb wird im Frühling von Anfang April bis Mitte Mai und der Blattfall von Mitte Juli bis Mitte November beobachtet (Tabelle 4). Drei Mal wöchentlich wird die Phänologie in diesem Zeitraum erfasst.

Die verschiedenen Blattaustriebsstadien werden in sechs Phasen unterteilt (Null bis fünf). Pappeln und Weiden unterscheiden sich sehr deutlich in der Art des Blattaustriebes (Tabelle 5).

Der Blattfall wird mit Hilfe des Belaubungs- und Verfärbungsprozentes aufgenommen. Aus der Kombination von Belaubungs- und dem Verfärbungsprozent wird die photosynthetisch aktive Belaubung (PAB) in Prozent ermittelt:

$$PAB = P_b - (P_b * \frac{P_v}{100})$$

PAB Photosynthetisch aktive Belaubung (%)

P_b Belaubungsprozent (%)

P_v Verfärbungsprozent (%)

Es ist notwendig, die PAB zu berechnen, weil im Jahr 2012 die Weide auf „BERTA II“ noch weit in den Spätherbst gelbbraune Blätter behielt (Belaubungsprozent sehr hoch), die nicht mehr in der Lage waren, Photosynthese zu betreiben. Beispielsweise könnte eine Auffüllung des Bodenwasserspeichers durch die dadurch fehlende Transpiration nicht mehr erklärt werden.

Tabelle 5

Abschätzung des Blattaustriebes bei Pappel und Weide

| Stufe | Pappel | Weide |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 0 | – Knospen geschlossen, Winterruhe | – Knospen geschlossen, Winterruhe |
| 1 | – Aufbrechen der Knospen – Blatt fängt an, sich zu ent- falten – sehr eingeknickt | – Knospen brechen auf – Blatt fängt an, sich zu ent- falten – Länge der Blätter < 2 cm |
| 2 | – Jungblatt ausgetrieben – stark knittrig – hellgrün | – Längenwachstum der Blätter – buschige Blattanordnung erkennbar – Länge der Blätter 2 - 4 cm |
| 3 | – Blatt noch etwas gerollt – hellgrün gefärbt – Blattstiel beginnt sich zu strecken | – deutliche Verbuschung der Blätter erkennbar – Länge der Blätter 4 - 7 cm |
| 4 | – Blatt voll ausgebildet – hellgrün gefärbt | – Länge der Blätter 7 - 10 cm |
| 5 | – Blätter kräftig grün gefärbt und voll ausgebildet | – Länge der Blätter > 10 cm |

Das Verfärbungsprozent als alleinstehendes Merkmal zum Blattfall kann auch nicht mit in die Berechnungen einbezogen werden. Die Weide kann die gelb verfärbten Blätter innerhalb weniger Tage abwerfen. Die am Ast verbleibenden grünen Blätter verfärben sich später. Es kommt somit zu sehr großen Schwankungen, verursacht durch den unregelmäßig verlaufenden Verfärbungsprozess und den Blattfall. Für die Berechnung der PAB werden Belaubungs- und Verfärbungsprozent miteinander kombiniert.

2.4 Bewässerung

Um den Bewässerungsbedarf der Kurzumtriebsplantagen zu ermitteln, wird das Wasserhaushaltsmodell „Zephyr“ (Michel, 2009) benutzt. In diesem Modell werden Wetter-, Boden- und Vegetationsdaten verwendet, um das Transpirations-

defizit zu ermitteln. Es wird die aktuelle Wasserverfügbarkeit (prozentualer Anteil der nutzbaren Feldkapazität) für die unterschiedlichen Versuchsflächen aus den Standortparametern berechnet und daraus Zeitpunkt und Höhe des Zusatzwassereinsatzes abgeleitet. Die Grenze des optimalen Pflanzenwachstums ist bei $\geq 50\%$ nFK (nutzbare Feldkapazität) festgelegt. Nach DWD (2010) ist ein optimales Pflanzenwachstum bei 50 bis 80 % nFK möglich. Bei einer Unterschreitung von 50 % nFK werden die Versuchsflächen bewässert.

Das biologisch geklärte Abwasser wird durch einen „Tankwagen“ in Kombination mit einem Rohrleitungssystem und angeschlossenem Wasserzähler (Wasseruhr) auf die Flächen ausgebracht. Die Abwassergabe innerhalb der Parzelle erfolgt als Furchenbewässerung zwischen den Baumreihen, um ein seitliches Abfließen zu vermeiden und eine gleichmäßige Bewässerung zu ermöglichen (Abbildung 6).



Abbildung 6
Furchenbewässerung mit Abwasser auf der Versuchsfläche „BERTA II“

3 Ergebnisse

3.1 Bewässerung

Die Klimatische Wasserbilanz (KWB) ist ein Indikator für die meteorologische Trockenheit. Sie ist definiert aus der Differenz zwischen Niederschlag und potentieller Evapotranspiration nach Grasreferenzverdunstung (Wendling et al., 1991).

$$KWB = N_F - PET$$

- KWB Klimatische Wasserbilanz (mm)
- N_F Freilandniederschlag (mm)
- PET Potentielle Evapotranspiration (mm)

Wie in Abbildung 7 zu erkennen, ist die kumulierte klimatische Wasserbilanz ohne Zusatzbewässerung in der Vegetationszeit (01.04. bis 31.10.) der Jahre 2011 und 2012 als sehr negativ einzustufen. Im Jahr 2011 war es wegen technologi-scher Anfangsschwierigkeiten bei der Bewässerung nicht gelungen, die Trockenheit mit der Zusatzbewässerung auszugleichen. Diese Schwierigkeiten konnten 2012 behoben werden, so dass durch eine ausreichende Bewässerung kein Wassermangel für die Pflanzen auftrat.

Die Pappeln und Weiden, die im Jahr 2008 angepflanzt worden sind, erhielten 2011 190mm Zusatzwasser. 2012 vergrößerte sich die Abwassermenge auf 420mm. Die neuange-pflanzten Pappeln und Weiden erhielten dagegen im Jahr 2011 nur insgesamt 90mm Zusatzwasser. 2012 verdreifachte sich diese Menge auf 270mm zusätzliches Abwasser (Tabelle 6).

Tabelle 6
Bewässerungsmenge auf „BERTA“ in mm

| Versuchsfläche | 2011 | 2012 |
|-----------------|-------|-------|
| Pappel BERTA I | 104,6 | 210,9 |
| Weide BERTA I | 84,3 | 210,8 |
| Summe | 188,9 | 421,7 |
| Pappel BERTA II | 43,3 | 134,9 |
| Weide BERTA II | 44,4 | 135,7 |
| Summe | 87,7 | 270,6 |

Am Beispiel der Entwicklung der prozentualen nFK der Pappeln auf „BERTA I“ ist in Abbildung 8 erkennbar, dass sich die Graphen der bewässerten und unbewässerten Pappeln bis Mitte Mai in einem sehr geringen Maß differenzieren. Ab Anfang Juni unterscheiden sich die Kurvenverläufe durch die Ende Mai intensiv durchgeführten Bewässerungsmaßnahmen. Beide Graphen liegen bis zur dritten Julidekade jedoch noch über dem Optimum von 50% nFK, was eine gute Wasserversorgung darstellt. Im Spätsommer differenzieren sich beide Graphen stärker. Die prozentuale nFK der bewässerten Versuchsfläche befindet sich klar über der Grenze des optimalen Pflanzenwachstums von 50% nFK. Ab dem 27.07.12 sinkt der Graph der nutzbaren Feldkapazität der unbewässerten Versuchsparzelle deutlich unter das Optimum von 50% nFK. Für die Weide auf „BERTA I“ sind ähnliche Werte berechnet worden.

Auf „BERTA II“ konnte durch die doppelte Bewässerungsmenge die Bodenfeuchtigkeit über 50% nFK gehalten werden. Auf den unbewässerten Versuchsflächen beider Baumarten unterschreitet die nFK am 02.08.12 dauerhaft die Grenze des optimalen Pflanzenwachstums von 50%.

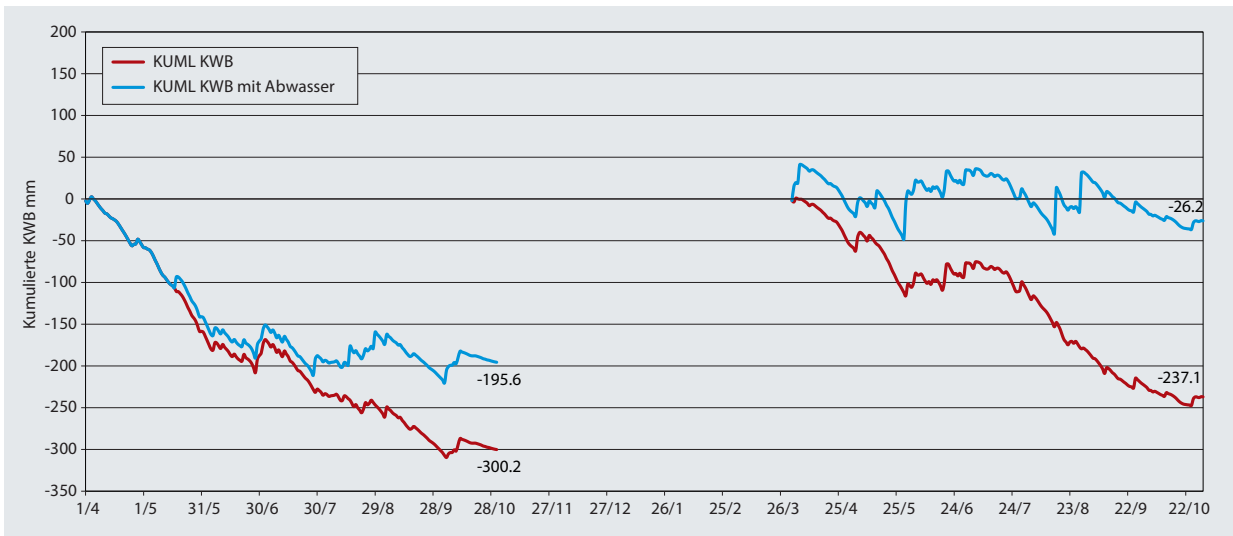


Abbildung 7

Entwicklung der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz (KWB) mit und ohne Abwasserbewässerung der Jahre 2011 und 2012 im Bereich BERTA

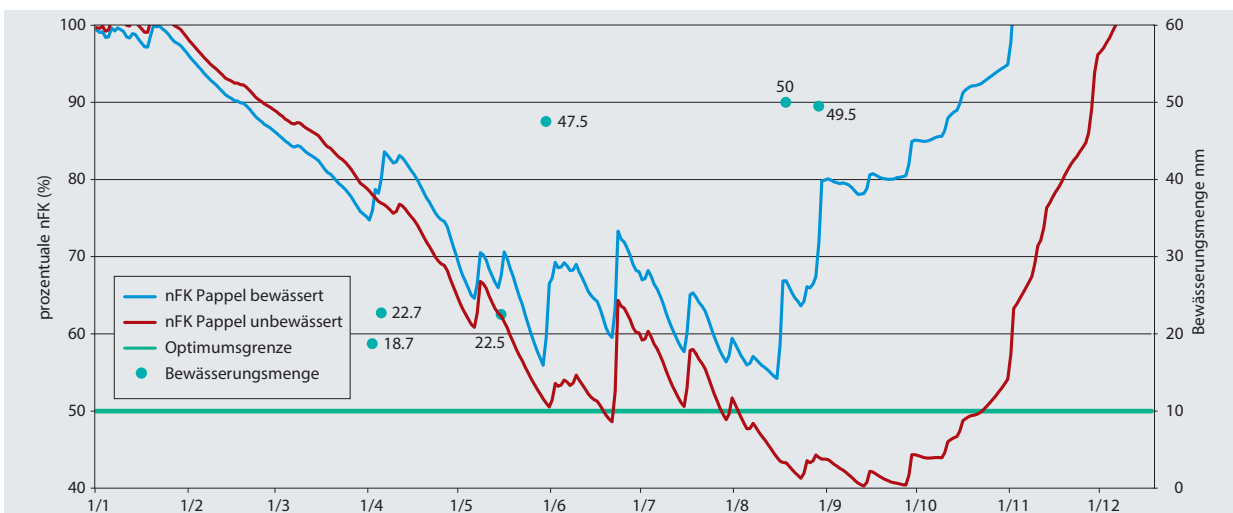


Abbildung 8

Entwicklung der prozentualen nutzbaren Feldkapazität in einer Bodenprofiltiefe von 10 bis 180 cm auf der Versuchsfläche Pappel „BERTA I“ 2012

3.2 Belaubung

Nach den Untersuchungen von Kramer (1996) und Hänninen (1990) ist der wesentliche Faktor für den Blattaustrieb die Temperatur. Zudem stellte Peñuelas et al. (2004) fest, dass Niederschläge und Wasserverfügbarkeit maßgeblich die phänologische Entwicklung beeinflussen. Dadurch ist die Phänologie auch zwischen temperatur- und wasserinduziert zu unterscheiden. Der herbstliche Blattfall wird durch niedrigere Temperaturen und der Blattfall innerhalb der Vegetationsperiode durch Wassermangel hervorgerufen.

Nach Abbildung 9 trieben 2012 die Pappeln früher aus als die Weiden. Innerhalb der Baumart ist bei den Pappeln kein Unterschied bezüglich des Blattaustriebes zwischen bewässerten und unbewässerten Individuen zu erkennen. Der Blattaustrieb der Weiden unterscheidet sich gering. Im Zeit-

raum vom 19.03. bis 14.05.12 liegt nach Abbildung 8 die prozentuale nFK der Pappelparzellen in einem Bereich von 84 bis 65% (bewässert) und 84 bis 61% (unbewässert). Die prozentuale nFK der Weide liegt zwischen 86 bis 70% (bewässert) und 81 bis 61% (unbewässert). Auf allen Versuchsflächen liegt eine ausreichende Wasserversorgung vor. Durch diese geringen Unterschiede in den Bodenwassermengen weisen bewässerte und unbewässerte Individuen der beiden Baumarten auch einen ähnlich verlaufenden Blattaustrieb auf.

Der Blattfall ist weitaus differenzierter als der Blattaustrieb. Die bewässerten und unbewässerten Weiden verlieren schon bis zum 25.07.12 20% der gesamten photosynthetisch aktiven Blattmasse (PAB) (Abbildung 10). Die bewässerten Pappeln verlieren nur einen unwesentlichen Anteil der PAB bis zum herbstlichen Blattfall.

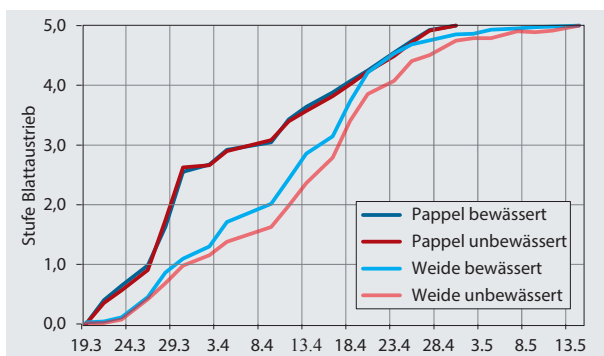


Abbildung 9
Verlauf des Blattaustriebes „BERTA I“ 2012

Eine Verringerung (20%) der PAB ist bei der unbewässerten Pappel vom 21.08. bis zum 24.09.12 zu erkennen. Am 20.08. beträgt die prozentuale nFK auf der unbewässerten Pappel-Versuchsfläche noch 42%, was als Initial des Blattfalls innerhalb der Vegetationsperiode angesehen werden kann. Zum gleichen Zeitpunkt liegt die nFK der bewässerten Pappel bei 65% und ist als optimal anzusehen. Durch die Unterschiede in der Bodenwasserverfügbarkeit setzt der Blattfall bei der unbewässerten Pappel früher ein als bei der bewässerten. Der intensive herbstliche Blattfall (temperaturinduziert) der bewässerten und unbewässerten Pappeln beginnt in der vierten Septemberdekade. Bei der unbewässerten Pappel endet der Blattfall am 15.10.12, bei der bewässerten am 19.10.12 (Abbildung 10). Das bedeutet, dass der herbstliche Blattfall bei der bewässerten Pappel etwa vier Tage länger dauert als bei der unbewässerten.

Bei der bewässerten und unbewässerten Weide beginnt der herbstliche Blattfall (temperaturinduziert) am 17.08.12 und endet am 19.10.12 (Abbildung 10). Durch den starken Verlust von Blattmasse bei den bewässerten und unbewässerten Weiden vor dem 17.08.12 ist davon auszugehen, dass die Grenze des Optimums der Wasserversorgung höher liegen muss als bei den Pappeln. Die PAB der bewässerten Weide sinkt bis zum 24.08.12 stärker ab als die PAB der bewässerten. Jedoch endet der Blattfall auf beiden Versuchsfeldern zum gleichen Datum. Keine Unterschiede sind bei der Dauer des Blattfalls zwischen den bewässerten und unbewässerten Weiden festzustellen. Die PAB der unbewässerten sinkt aber bis zur vierten Augustdekade weitaus stärker ab als bei der bewässerten. Eine sehr starke Minderung der PAB ist bei der bewässerten Weide erst in der dritten Septemberdekade festzustellen.

Insgesamt ist einzuschätzen, dass die bessere Bodenwasserversorgung der bewässerten Pappeln die Verringerung der PAB verzögert. Die unbewässerten Weiden vermindern schneller ihre PAB als die bewässerten, jedoch sind keine Unterschiede in der Gesamtdauer des Blattfalls festzustellen.

Nach Dammann et al. (2010) besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Wasserverfügbarkeit und der gebildeten Blattbiomasse. Bei Wasserstress war an den untersuchten Bäumen eine reduzierte Blattmasse festzustellen.

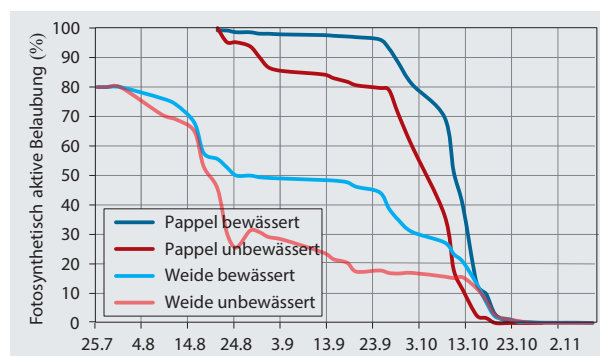


Abbildung 10
Verlauf des Blattfalls „BERTA I“ 2012.

Die bewässerten Pappeln und Weiden auf „BERTA I“ produzierten im Jahr 2012 mehr Blattbiomasse als die unbewässerten (Abbildung 11). Dabei ist bei der Pappel nur ein leichter Bewässerungseffekt zu erkennen. Die bewässerten Weiden bildeten 23% mehr Blattmasse als die unbewässerten Individuen aus. Es ist also ein größerer Bewässerungseffekt bzgl. der Entwicklung der Blattmasse bei den Weiden als bei den Pappeln festzustellen.

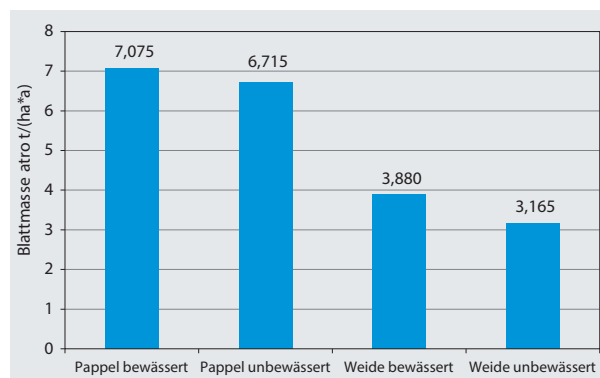


Abbildung 11
Gebildete Blattmasse auf „BERTA I“ 2012

Auf den Versuchspartellen „BERTA II“ bildeten die bewässerten Pappeln fast dreimal so viel Blattmasse wie die unbewässerten (Tabelle 7). Die bewässerten Weiden produzierten nur eine etwa doppelt so große Blattmasse wie die unbewässerten.

Tabelle 7
Blattmassen auf „BERTA II“ 2012

| Versuchsfläche | Blattmasse (t _{atro} / ha *a) |
|--------------------|----------------------------------------|
| Pappel bewässert | 3.86 |
| Pappel unbewässert | 1.37 |
| Weide bewässert | 0.55 |
| Weide unbewässert | 0.27 |

Der Vergleich zwischen den Versuchsflächen lässt den Schluss zu, dass die jüngeren Bestände („BERTA II“) eine größere Reaktion bezüglich der Blattmassenentwicklung auf eine Zusatzbewässerung zeigen als die älteren („BERTA I“). Beispielsweise bildete die ältere bewässerte Pappel nur 5 % mehr Blattmasse aus als die unbewässerte. Die jüngere bewässerte Pappel weist im gleichen Jahr eine fast dreimal so große Blattmasse auf wie die unbewässerte.

Insgesamt reagieren die jüngeren Bestände durch die Ausbildung einer höheren (relativen) Blattmasse weitaus sensibler auf Bewässerungsmaßnahmen als die älteren.

3.3 Wachstum

Die innerjährliche Änderung des Stammdurchmessers wird an repräsentativen Individuen der Kraft'schen Klassen I und II gemessen. In Abbildung 12 ist eine klare Differenzierung der Entwicklung des Stammdurchmessers zwischen Pappeln und Weiden zu erkennen. Innerhalb der Vegetationsperiode 2012 weisen die Pappeln eine größere Änderung des Stammdurchmessers auf als die Weiden. Bei einem Vergleich zwischen den bewässerten und unbewässerten Beständen bildete jedoch die Weide relativ mehr Stammholz als die Pappel. Die Änderung des Stammdurchmessers der Weide (4,1 mm) ist demnach mehr als doppelt so hoch als bei der Pappel (1,7 mm). Insgesamt wiesen die bewässerten Individuen in der Vegetationsperiode 2012 eine größere Durchmesseränderung auf als die unbewässerten.

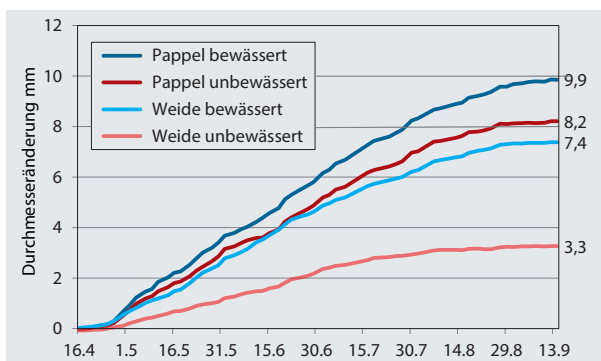


Abbildung 12

Kumulierte Stammdurchmesseränderung an ausgewählten Messbäumen auf „BERTA I“ 2012

Die Höhenänderung der Pappel auf den Versuchspartellen „BERTA II“ (Abbildung 13) beginnt etwa einen Monat später als der Blattaustrieb (vgl. Abbildung 9). Die Höhenänderung der Weide beginnt wesentlich später (ca. drei Monate) als der Blattaustrieb. Trotz der intensiven Frostschäden der Weide und dem damit verbundenen Absterben des Terminaltriebes können nur sehr geringe Unterschiede zwischen den Baumarten festgestellt werden. Die bewässerten Bäume sind bei beiden Baumarten 65 bis 70 % höher als die unbewässerten. Dies lässt bezüglich der Höhenentwicklung auf einen Bewässerungseffekt und eine ähnliche Sensitivität auf Bewässerungsmaßnahmen schließen.

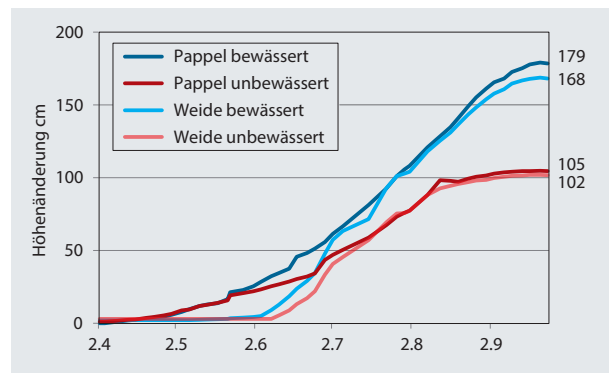


Abbildung 13

Kumulierte Baumhöhenänderung an ausgewählten Messbäumen auf „BERTA II“ 2012

In Abbildung 14 ist zu erkennen, dass die Bestandes-Höhenfunktion aller Baumarten einen ähnlichen Verlauf hat. Bei gleichen BHD weisen alle Baumarten ähnlich große Baumhöhen auf wie die bewässerten. Hinsichtlich der Ausbildung einer größeren Bestandeshöhe bei gleichem BHD kann also keine Bewässerungswirkung festgestellt werden. Bei der Pappel ist dieser Effekt nicht feststellbar. Die bewässerten Pappeln und Weiden auf „BERTA II“ zeigen im Verhältnis zwischen dem Stammdurchmesser und der Baumhöhe einen deutlichen Bewässerungseffekt. Bei gleichem WHD weisen die bewässerten Bestände eine größere Baumhöhe auf als die unbewässerten.

Nach Shinozaki et al. (1964) ist die Blattfläche mit dem Stammdurchmesser korreliert. Eine größere Blattfläche äußert sich in einer höheren Blattmasse. Durch die weitaus höheren Blattmassen (Tabelle 7) der bewässerten Bestände auf „BERTA II“ bildeten die Bäume im Verhältnis mehr Stammholz. Bei den bewässerten Beständen ist von 2011 bis 2012 ein größerer Grundflächenmittelhöhen-Zuwachs als bei den unbewässerten berechnet worden (Tabelle 8). Ein Bewässerungseffekt, der die Baumhöhen beeinflusst, ist erkennbar. Es ist ein größerer relativer Höhenzuwachs bei den jüngeren Beständen festzustellen. Die relativen Stammholzvolumen-Zuwächse sind bei den jüngeren Beständen viel größer als bei den älteren.

In Abbildung 15 ist die Effizienz des Wassereinsatzes in den fünfjährigen Pappeln und Weiden dargestellt. Bei beiden Baumarten ist eine Verringerung der Effizienz (WE) bei zunehmender Niederschlagsmenge (Bestandesniederschlag + Menge an Zusatzbewässerung) zu erkennen. Die Pappel weist bei geringerem Niederschlag im Vergleich zur Weide eine größere WE auf. Die Wassernutzungseffizienz der Weide bleibt im Vergleich zur Pappel relativ konstant. Eine größere WE bei geringen Niederschlägen weist die Pappel im Vergleich zur Weide auf.

Die WE der jungen Pappeln und Weiden zeigen nach Abbildung 16 einen anderen Verlauf. Bei einer Zunahme der Niederschlagsmenge erhöht sie sich bei beiden Baumarten. Die Effizienzsteigerung ist bezüglich der Bildung des Stammholzvorrates bei größeren Niederschlagsmengen bei der Pappel stärker ausgeprägt als bei der Weide (Abbildung 16).

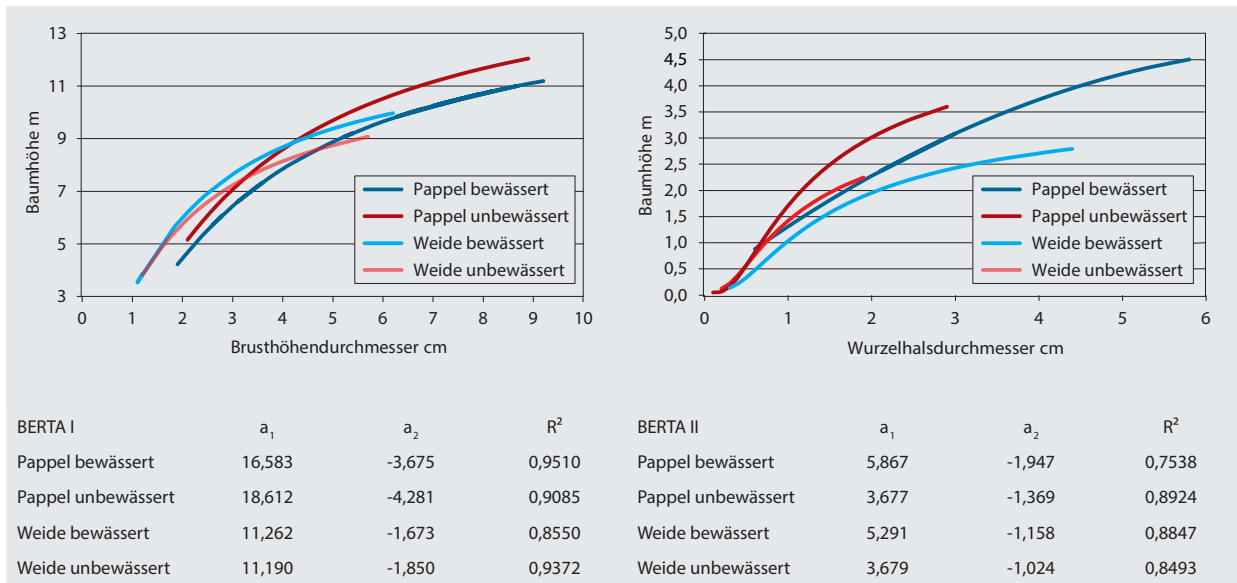


Abbildung 14 Bestandes-Höhenfunktionen „BERTA I (links) und BERTA II (rechts) 2012

Tabelle 8 Höhenzuwachs und Zuwachs des Stammholzvolumens 2012

| | h _m 2011 (m) | Vorrat 2011 (Vfm/ha) | h _m 2012 (m) | Vorrat 2012 (Vfm/ha) | Höhenzuwachs (m) | Zuwachs Vorrat (%) |
|--------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|
| BERTA I | | | | | | |
| Pappel bewässert | 9,38 | 160,733 | 10,71 | 222,088 | 14,2 | 38,2 |
| Pappel unbewässert | 10,31 | 186,717 | 11,03 | 236,430 | 6,7 | 26,6 |
| Weide bewässert | 7,04 | 73,450 | 8,02 | 116,796 | 13,9 | 44,4 |
| Weide unbewässert | 6,11 | 52,160 | 6,88 | 76,540 | 12,6 | 45,6 |
| BERTA II | | | | | | |
| Pappel bewässert | 1,19 | 0,531 | 3,55 | 12,204 | 198,3 | 2.198,3 |
| Pappel unbewässert | 1,01 | 0,331 | 2,20 | 3,998 | 117,8 | 1.107,9 |
| Weide bewässert | 0,94 | 0,318 | 2,33 | 3,054 | 147,9 | 860,4 |
| Weide unbewässert | 0,77 | 0,170 | 1,37 | 0,806 | 77,9 | 374,1 |

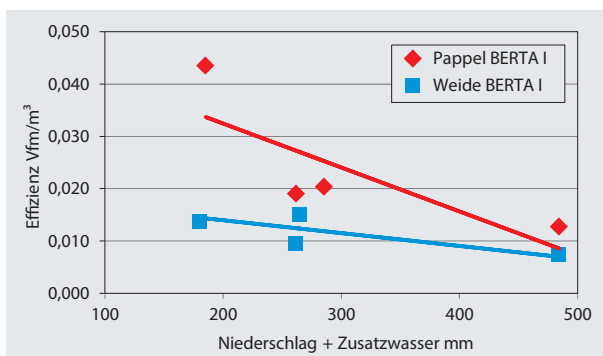


Abbildung 15 Effizienz der Wassernutzung von Pappel und Weide BERTA I

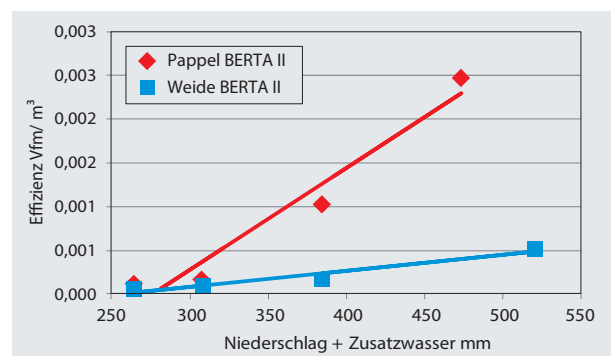


Abbildung 16 Effizienz der Wassernutzung von Pappel und Weide BERTA II

4 Diskussion und Schlussfolgerung

Giovanelli et al. (2007) stellte fest, dass einjährige, bewässerte Pappeln einen größeren Radialzuwachs haben als unbewässerte. Diese Aussage trifft nicht nur auf einjährige Bestände, sondern auch auf mehrjährige bewässerte Pappeln zu. Nach unseren Untersuchungen weisen die bewässerten KUP nach Abbildung 12 einen größeren Radialzuwachs auf als unbewässerte.

Die bewässerten Pappeln und Weiden jeden Alters bildeten auf den untersuchten Flächen größere Grundflächenmittelhöhen-Zuwächse aus als die unbewässerten. Die Untersuchungen von Murach et al. (2008) belegen, dass sich die Baumhöhen von fünf Jahre alten Pappeln und vierjährigen Weiden im Kurzumtrieb bei einer Steigerung des Transpirationswasserangebotes relativ vergrößern. Dies bestätigen die eigenen Untersuchungsergebnisse. Pappeln und Weiden entwickeln bei einer Zunahme des Wasserangebotes auch relativ größere Baumhöhen (Tabelle 8).

Die Ausbildung einer größeren Biomasse bei einer höheren Evapotranspiration stellten Fischer et al. (2010) bei einer siebenjährigen Pappelplantage und Linderson et al. (2007) bei einer dreijährigen Weidenplantage (Tordis) fest. Busch (2009) und Lamersdorf und Schulte-Bisping (2010) stellten eine Zunahme der aktuellen Evapotranspiration bei einer Zunahme des jährlichen Niederschlages bei drei- bis neunjährigen Pappeln und Weiden fest. Das bedeutet, dass sich bei einer höheren Wasserverfügbarkeit durch die steigende Transpiration auch größere Bestandes-Biomassen ausbilden. Nach unseren Ergebnissen sind bei allen Versuchsflächen relativ höhere Biomassen (Stammholzvorrat) bei einer höheren Wasserverfügbarkeit festzustellen, was die Untersuchungen von Linderson et al. (2007) und Fischer et al. (2010) bestätigt.

Zudem stellte Busch (2009) fest, dass drei- bis neunjährige Weiden bei einer Zunahme des jährlichen Niederschlages eine höhere Evapotranspiration haben als gleichaltrige Pappeln und damit im Verhältnis mehr Biomasse bilden. Für die älteren Bestände (BERTA I) trifft dies zu. Die Effizienz der Wassernutzung bei der Weide sinkt bei einer größeren Wasserverfügbarkeit weitaus geringer ab als bei der Pappel. Das bedeutet, dass die Weide bei einem höheren Wasserangebot mit einem relativ stärkeren Biomassezuwachs (Stammholzvorrat) reagiert als die Pappel. Für die jüngeren Bestände (BERTA II) ist dies nicht zutreffend. Die Pappeln weisen eine viel stärkere Erhöhung der Biomasse (relativer Stammholzvorrats-Zuwachs) bei einer Zusatzbewässerung auf als die Weiden. Nach Abbildung 16 kann dies ebenfalls mit der größeren Erhöhung der Wassernutzungseffizienz bei einer steigenden Wasserverfügbarkeit der Pappel im Vergleich zur Weide erklärt werden.

Für einen weiterführenden Vergleich der Nettoprimärproduktion zwischen den einzelnen Beständen wird zum Projektabschluss die Bestandes-Biomasse mit Hilfe der destruktiven Regressionsmethode (Röhle 2009) durchgeführt.

Nach Petzold et al. (2010) ist eine Bewässerung von Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb in den ersten zwei Jahren für die Reduktion des Ausfallrisikos sinnvoll, jedoch

aber nicht zum Zweck der Ertragssteigerung geeignet. Die Wassernutzungseffizienz verschlechtert sich bei zunehmendem Wasserangebot. Bei einer Bewässerung einer fünfjährigen Pappel und Weide trifft diese Aussage für die eigenen Versuchsflächen zu. Für Pappeln und Weiden in der Etablierungsphase ist eine größere Effizienz der Wassernutzung bei einer Erhöhung der Niederschlagsmenge festzustellen. Nach Murach et al. (2008) weisen Pappeln (vierjährig) und Weiden (dreijährig) einen linearen positiven Verlauf der gebildeten Biomasse bei einer Erhöhung der Wasserverfügbarkeit auf. Das bedeutet, dass die Wassernutzungseffizienz gleich bleibt. Dies kann für die eigenen Versuchsflächen nicht bestätigt werden. Die Effizienz der untersuchten älteren Pappeln und Weiden sinkt bei steigendem Wasserangebot.

Von den Ergebnissen einer größeren Biomasseproduktion bei Zusatzwassergabe der untersuchten KUP's profitieren lokale Akteure in der BERTA-Region. In der Ortslage Gierstädt werden durch ein Unternehmen Hackschnitzel aus KUP zur Energiegewinnung genutzt. Bei einer Flächengröße von ca. 6,5 ha (Summe aus Pappel und Weidenfläche BERTA) ist es möglich, aus der gebildeten Holzbiomasse einer Pappel-KUP, die sich im zweiten Anlagejahr der ersten Rotation befindet, ca. 135 MWh² (67,5 MWh/Jahr) Wärmeenergie zu produzieren. Nach Aussagen des Unternehmers C. Fleischmann (2013) wird im Unternehmen 1.200 MWh Wärmeenergie pro Jahr produziert. Das bedeutet, dass der Bedarf des Blockheizkraftwerkes in Gierstädt an Biomasse zu 6% durch die Pappel-KUP mit einer zusätzlichen Abwasserbewässerung gedeckt werden kann. Nach Steinke (2009) weisen KUP in der ersten Rotation die geringsten Erträge auf. Untersuchungen der Wirkung von zusätzlichen Abwassergaben auf die Biomasseerträge von KUP in weiteren Rotationen sind deshalb notwendig.

Die Technik der Zusatzwassergabe mit dem Abwassertransport eines Tankwagens stellt in der jetzigen Form keine betriebswirtschaftlich optimale Lösung dar. Für ein optimales Pflanzenwachstum müssen die festgelegten Grenzen des Bodenwassers eingehalten werden. Durch den größeren Wasserverbrauch von KUP sind im Vergleich von herkömmlichen Ackerkulturen größere Zusatzwassermengen erforderlich. Für eine großflächige Bewässerung wäre es sinnvoll, Speicheranlagen in der Nähe des Bewässerungsortes zu nutzen oder neu anzulegen. Rekonstruierte Feuerlöschteiche bzw. neu angelegte Folienbecken könnten sich für die Abwasserspeicherung anbieten. Die Befüllung der Speicheranlage wird durch einen Tankwagen oder ein vom Klärwerk verlaufendes Rohrleitungssystem durchgeführt. Für eine Bewässerung von 1,7 ha Nutzfläche (BERTA II) mit einer Bewässerungsmenge von 20 mm ist ein Speichervolumen von 340 m³ erforderlich. Bei einem Bewässerungsturnus von zehn Tagen und einer Zusatzwassergabe von 20 mm pro Turnus im Zeitraum April bis August würden insgesamt ca. 300 mm biologisch geklärtes Abwasser zum Einsatz kommen. Hierzu sind noch weitere Untersuchungen in Zusammenhang mit der Nutzungseffizienz des eingesetzten

² Berechnung des Heizwertes von Pappelholz mit einem Wassergehalt von > 50% (1.525 KWh/fm) nach Hahn und Schardt (2007)

zusätzlichen Abwassers und dem Mehrertrag an Netto-primärproduktion notwendig.

Für die Wirtschaftlichkeit des Abwassereinsatzes wäre es sinnvoll:

- Die Kosten für den Abwassertransport durch die Anlage von KUP-Flächen in der Nähe der Abwasserkläranlage zu minimieren.
- Vorhandene Speichereinrichtungen zur Zwischenspeicherung des Abwassers in der Nähe von KUP zu nutzen.

Für die Gewährleistung eines optimalen Pflanzenwachstums ist für die Ermittlung des Zeitpunktes und der Menge der Zusatzwassergabe die Anwendung eines Wasserhaushaltsmodells ratsam. Das erfordert die Bereitstellung von Witterungs-, Boden- und Vegetationsparametern.

5 Danksagung

Das Projekt wurde aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF, FKZ 33L33E) gefördert.

Literatur

- Baur F (1891) Die Holzmesskunde : Anleitung zur Aufnahme der Bäume und Bestände nach Masse, Alter und Zuwachs. Wien : Braumüller, 512 p
- Busch G (2009) The impact of Short Rotation Coppice cultivation on groundwater recharge – a spatial (planning) perspective. *Landbauforsch* 59(3):207-221
- Dammann I, Paar U, Schmidt W, Wendland J, Weymar J, Eichhorn J (2010) Waldzustandsbericht Hessen. Göttingen : Nordwestdeutsche Forstl Versuchsanst, pp 18-21
- Dimitriou I, Busch G, Jacobs S, Schmidt-Walter P, Lamersdorf N (2009) A review of the impacts of Short Rotation Coppice cultivation on water issues. *Landbauforsch* 59(3):197-206
- DWD (2010) Bodenfeuchtegraphik [online]. Zu finden in <http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=_dwdwww_spezielle_nutzer_landwirtschaft_agrarwetter&_state=maximized&_windowLabel=T32400544731165835681815&T32400544731165835681815gsbDocumentPath=Navigation%252FLandwirtschaft%252FRueckblicke%252FBodenfeuchte%252FBoFeu__Erlaeuterungen__node.html%253F__nnn%253Dtrue> [zitiert am 14.01.2014]
- Fischer M, Trnka M, Kučera J, Fajman M, Žalud Z (2010) Biomass productivity and water use relation in short rotation poplar coppice (*Populus nigra* x *P. Maximowiczii*) in the conditions of Czech Moravian highlands. *Acta Univ Agric Silvicult Mendelianae Brunensis* 59(6):141-151
- Fleischmann C (2013) mdl. Mitteilung, Gierstädt
- Gadow K v (2003) Waldstruktur und Wachstum. Göttingen : Universitätsverl, pp 122-126
- Giovanelli A, Deslauriers A, Fragnelli G, Scaletti G, Castro G, Rossi S, Crivellaro A (2007) Evaluation of drought response of two poplar clones (*Populus x Canadensis* Mönch "I-214" and *P. deltoides* Marsh. "Dvina") through high resolution analysis of stem growth. *J Exp Bot* 58(19):2673-2683
- Hahn J, Schardt M (2007) Der Energieinhalt von Holz und seine Bewertung. Freising : LWF, 4 p, Merkbl Bayer Landesanst Wald Forstwirtschaft 12
- Hänninen H (1990) Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. Helsinki : Soc For Finland, 47 p, Acta For Fenn 213
- Hartmann L (2014) Etablierung und anfänglicher Ertrag von Kurzumtriebsplantagen in Süd-Niedersachsen und Mittel-Thüringen. Forstarchiv (im Druck)
- Kraft G (1884) Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellung und Lichtungshieben. Hannover : Klindworth, 147 p
- Kramer K (1996) Phenology and growth of European trees in relation to climate change. Wageningen : Univ, 210 p
- Kunka R (2004) Klimawandel in Thüringen - eine Herausforderung unserer Zeit [online]. Zu finden in <<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:27-20100601-134335-3>> [zitiert am 19.12.2013]
- Lamersdorf N, Schulte-Bispung H (2010) Zum Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. *Arch Forstwes Landschaftsökol* 44:23-29
- Linderson ML, Iritz Z, Lindroth A (2007) The effect of water availability on stand-level productivity, transpiration, water use efficiency and radiation use efficiency of field-grown willow clones. *Biomass Bioenergy* 31(7):460-468
- Michel R (2009) Zephyr Handbuch und Kurzanleitung. Bad Freienwalde, pp 4-59
- Murach D, Hartmann H, Walotek P (2008) Ertragsmodelle für landwirtschaftliche Dendromasse. In: Murach D, Knur L, Schultze M (eds) DENDROM – Zukunftsrohstoff Dendromasse : systemische Analyse, Leitbilder und Szenarien für die nachhaltige energetische und stoffliche Verwertung von Dendromasse aus Wald- und Agrarholz ; Endbericht. Remagen : Kessel, pp 146-149
- Nüske W (2012) Phänologische Beobachtung an Rotbuchen. *Phänologie-J* 38:1-4
- Peñuelas J, Filella I, Zhand XY ZHANG, Llorens L, Ogaya R, Lloret F, Comas P, Estiarte M, Terradas J (2004) Complex spatiotemporal phenological shifts as a response to rainfall changes. *New Phytol* 161(3):S 837-846
- Petzold R, Feger K-H, Schwärzel K (2009) Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: Reeg T (ed) Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Weinheim : Wiley, pp 181–191
- Petzold R, Feger K-H, Röhle H (2010) Standortliche Voraussetzung für Kurzumtriebsplantagen. In: Bemman A, Knust C (eds) AGROWOOD – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Berlin : Weißensee-Verl, pp 44-53
- Rohe W, Milde S, Reich N, Metz E (2009) Zuwachsleistung von Hybridpappel-Stammholbeständen in Nordhessen. *AFZ Wald* 534-537
- Röhle H (2009) Arbeitskreis Biomasse : Verfahrensempfehlungen zur Methodik der Biomasseermittlung in Kurzumtriebsbeständen [online]. Zu finden in <http://www.nw-fva.de/~nagel/SektionErtragskunde/band2009/Tag2009_25.pdf> [zitiert am 16.12.2013]
- Röhrich C, Ruscher K (2009) Anbauempfehlung Schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb [online]. Zu finden in <<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/13410>> [zitiert am 16.12.2013]
- Shinozaki K, Yoda K, Hozumi K, Kira T (1964) A quantitative analysis of plant form - the pipe model theory : II. Further evidence of the theory and its application in forest ecology. *Japan J Ecol* 14(4):133-139
- Steinke C (2009) Ertragsserwartung von Pappelklonen [online]. Zu finden in <http://www.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Elementbibliothek/Bibliothek_Politik_und_Verwaltung/Bibliothek_LLFG/dokumente/KoNaRo/veranstaltungsbeitraege/KoNaRo_18_02_09/Vortrag_180209_Ertrag_Pa.pdf> [zitiert am 14.01.2014]
- Wendling U, Schellin H-G, Thomä M (1991) Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. *Z Meteorol.* 41:468-475

