

# Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in Sachsen (Deutschland)

Rainer Petzold, Bianka Schubert und Karl-Heinz Feger

## Biomass accumulation, nutrient allocation and soil ecological effects of a short-rotation poplar plantation in Saxony (Germany)

### 1 Einleitung und Zielsetzung

Der Anbau von Pappeln und anderen schnellwachsenden Baumarten auf Ackerflächen für die Produktion von Biomasse als nachwachsender Rohstoff oder für die Energiegewinnung ist eine interessante Alternative zu Biomasseanbau-Systemen mit meist einjährigen landwirtschaftlichen

Kulturen (z.B. BEMMANN und KNUST, 2010). Solche Kurzumtriebsplantagen (KUP) stellen im Vergleich zu landwirtschaftlicher Produktion eine extensive Landnutzungsform dar. Eine Befahrung findet nur im Jahr der Flächenanlage und nach Beendigung des mehrjährigen Wachstumszyklus zur Ernte statt. Die Ernte selbst erfolgt im laublosen Zustand, wodurch die in den Blättern gespeicherten Nähr-

### Summary

In the present study, the above and below ground biomass and therein accumulated elements of a ten year old hybrid poplar plantation (*Populus maximowiczii* x *P. nigra*) in the hilly loess region of Saxony (Germany) was investigated. Soil chemical properties of the short rotation plantation (SRP) were examined in comparison to a control plot in an arable field. In contrast to conventional forest poplar management, a higher biomass yield was observed. An optimal nutritional status of the plantation on the former arable land was confirmed. Element export by harvested woody biomass was relatively low and may be currently balanced by atmospheric deposition and nutrient supply from the soil. In the long-term however, the nutritional status of the plantation may be in a need of adapted harvesting and maintenance soil liming. There was no difference between the soil organic carbon pools of the two plots. This finding fits in the contradictory results on soil C sequestration by other studies in SRP in Germany.

**Key words:** Nutrient allocation, carbon sequestration, biomass, short rotation forestry.

### Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden die Vorräte der oberirdischen und unterirdischen Biomasse sowie die darin gespeicherten Elemente einer 10-jährigen Pappelplantage (*Populus maximowiczii* x *P. nigra*) im Mittelsächsischen Löss-Hügelland (Deutschland) erfasst. Die bodenchemischen Eigenschaften wurden auf der Kurzumtriebsplantage (KUP) im Vergleich zu einer benachbarten Acker-Kontrollfläche analysiert. Es wurde im Vergleich zu Erträgen aus forstlicher Bewirtschaftung ein überdurchschnittliches Wachstum der Pappelplantage festgestellt. Entsprechend der früheren ackerbaulichen Nutzung ist die Nährstoffversorgung als optimal einzustufen. Die Elemententzüge durch Ernte sind vergleichsweise gering und werden gegenwärtig durch atmosphärische Deposition und die Nachlieferung aus dem Boden ausgeglichen. Langfristig ist hier jedoch auch eine Steuerung der Nährelemententzüge durch angepasste Ernteverfahren und Erhaltungskalkung erforderlich. Zwischen den beiden Flächen wurden keine Unterschiede bezüglich des organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden festgestellt. Dieser Befund fügt sich ein in die heterogenen Ergebnisse bisheriger Studien zum C-Sequestrierungspotenzial im Boden unter KUP.

**Schlagworte:** Nährstoffkreislauf, Biomasse, Kurzumtriebsplantage, Pappel, Boden-C-Sequestrierung.

stoffe auf der Fläche verbleiben. Die Nährstoffentzüge durch Ernte sind deshalb im Vergleich zu einjährigen landwirtschaftlichen Kulturen wesentlich geringer. Der hohe Nährstoffvorrat auf vormaligen Ackerflächen aufgrund der vorangegangenen regelmäßigen Kalkungs- und Düngungsmaßnahmen sowie atmosphärische Stoffdepositionen können somit trotz Biomasseentzug aus Plantagenutzung zu einer ausgeglichenen Nährstoffbilanz führen (vgl. LAMERSDORF et al., 2010). Zudem wurde festgestellt, dass Pappeln im Gegensatz zu Weide nicht mit Zuwachssteigerung durch zusätzliche Düngegaben reagierten (JUG et al., 1999). Verschiedene Autoren ziehen deshalb den Schluss, dass Pappelplantagen auf vormalig ackerbaulich genutzten Flächen unter mitteleuropäischen Standortbedingungen während der ersten Erntezyklen nicht gedüngt werden müssen (z.B. JUG et al., 1999a; SCHOLZ et al., 2001; KAHLE et al. 2007). Dennoch empfehlen diese Autoren die Beobachtung des Ernährungszustandes insbesondere von älteren Pappelplantagen, um entstehende Defizite der Nährstoffversorgung rechtzeitig zu erkennen.

Mit der Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen ist auch die Möglichkeit verbunden, langfristig organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) im Boden anzureichern (Jug et al., 1999b). Das wäre insbesondere der Fall, wenn durch vormalige landwirtschaftliche Nutzung in Verbindung mit regelmäßiger konventioneller Bodenbearbeitung von einem niedrigen Humusgehalt ausgegangen werden kann (vgl. GROGAN und MATTHEWS, 2002). Die wenigen Befunde von Langzeituntersuchungen auf Versuchsflächen in Deutschland (STETTER und MAKESCHIN, 1999; JUG, 1997; KAHLE 2007, 2010) zeigen jedoch, dass solche Humusanreicherungen nicht generell unterstellt werden können, sondern stark von den standörtlichen Ausgangsbedingungen, dem Alter der KUP, der betrachteten Bodentiefe sowie dem KUP-Bewirtschaftungsregime abhängen. Daher sind weitere Untersuchungen des Stoffhaushalts erforderlich, vor allem auf älteren Kurzumtriebsplantagen, um Langzeiteffekte dieser relativ neuen Landnutzungsform besser abschätzen zu können.

Mit der vorliegenden Fallstudie auf einer 10-jährigen Pappelplantage im Mittelsächsischen Löss-Hügelland (Deutschland) sollten deshalb folgende Fragen geklärt werden:

- I) Wie verteilt sich die Biomasse auf die verschiedenen Kompartimente der Pflanze?
- II) Wie hoch liegen die Nährstoffentzüge durch Ernte der oberirdischen Biomasse?
- III) Inwieweit lassen sich nach 10 Jahren Pappelanbau nach Ackernutzung Bodenveränderungen feststellen?

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet und Versuchsanlage

Die Untersuchungsfläche bei Methau befindet sich im Mittelsächsischen Löss-Hügelland (51°05'N, 12°49'O; 210 m ü. NN). Die Region ist durch ein subkontinentales Klima mit einem durchschnittlichen jährlichen Niederschlag von 770 mm und einer Jahresmitteltemperatur von 9,4 °C geprägt (PETZOLD et al., 2010). Die Pappelplantage wurde 1999 als Demonstrationsvorhaben für den Test verschiedener Pappelklone, Pflanzverbände und Flächenvorbereitungen mit dem Ziel der umweltgerechten Papierholzproduktion im 10-jährigen Umtrieb angelegt (WOLF und BÖHNISCH, 2004). Insgesamt wurden 13,4 ha bepflanzt. Vor der Plantagenanlage erfolgte auf der Fläche eine regionaltypische ackerbauliche Nutzung (1996 Mais, 1997 Winterweizen, 1998 Mais). Unsere Untersuchungen konzentrierten sich auf einen Block von 828 m<sup>2</sup> (ohne Ränder), der mit Stecklingen (Klon Max 1: *Populus maximowiczii* x *P. nigra*) im Pflanzverband 2 m x 3 m angelegt worden war. Im untersuchten Block waren nach Pflanzung keine weiteren Bewirtschaftungsmaßnahmen erfolgt. Zum Vergleich der bewirtschaftungsbedingten Bodeneigenschaften wurde eine unmittelbar benachbarte, hinsichtlich Relief und pedologischen Ausgangsbedingungen vergleichbare Fläche ausgewählt, die im Versuchszeitraum weiter ackerbaulich bewirtschaftet worden war (siehe Tabelle 1).

Aus den Messergebnissen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie an der agrarmeteorologischen Messstation Methau (ALBERT, persönliche Mitteilung) geht hervor, dass die nassen Stickstoffdepositionen seit Mitte der 1990er-Jahre rückläufig waren und sich zwischenzeitlich auf Werte unter 20 kg N ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> eingepegelt haben (siehe Abbildung 1).

Auf beiden Flächen kann hinsichtlich der Bewirtschaftung und der Bodeneigenschaften bis 60 cm Bodentiefe von einheitlichen Ausgangsbedingungen im Jahr der Versuchsanlage 1999 ausgegangen werden. An einem Leitprofil wurde als Bodenform eine „Pseudogley-Parabraunerde aus äolischem Lehmschluff über äolischem Tonschluff über tiefem Lehmschluff“ angesprochen. Auf der Pappelfläche war ab einer Tiefe etwa 100 cm Tonschiefer anzutreffen. Hingegen wurde auf der Ackerfläche aufgrund etwas mächtigerer Lössüberdeckung kein Einfluss des Grundgesteins in dieser Tiefe festgestellt.

Tabelle 1: Bewirtschaftungsmaßnahmen der ackerbaulich genutzten Vergleichsfläche 1999–2008  
 Table 1: Management scheme of the arable reference plot 1999–2008

Jahr	Fruchtfolge	Düngung [kg ha <sup>-1</sup> ]			Kalkung [kg ha <sup>-1</sup> ] Kalkmergel
		N	P	K	
1999	Sommerweizen	170	36	170	–
2000	Raps	260	23	147	–
2001	Winterweizen	230	18	137	–
2002	Mais	104	36	171	–
2003	Sommergerste	50	–	–	–
2004	Mais	130	29	222	–
2005	Feldgras	140	17	133	–
2006	Feldgras	230	22	170	–
2007	Raps	230	17	135	3100 entspricht Mg: 315 + Ca: 626
2008	Winterweizen	200	–	–	–

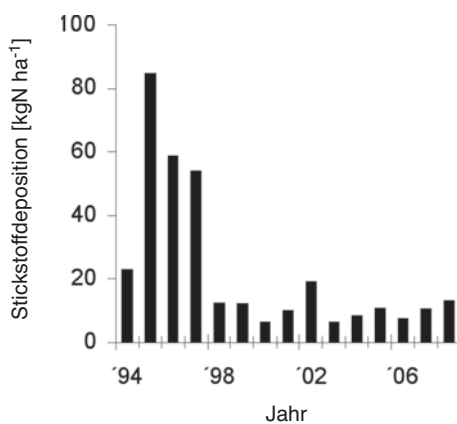


Abbildung 1: Jährliche Stickstoffeinträge mit dem Regenwasser am Standort Methau (ALBERT, persönliche Mitteilung)

Figure 1: Annual wet nitrogen deposition at Methau

## 2.2 Biomasseerhebungen und Probennahme

Für die Bestimmung der Biomasse wurden zunächst an allen Bäumen der Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe ( $d_{1,3}$ ; pro Baum Mittelwert aus zwei um 90° versetzten Messungen mit Kluppe) und die Baumhöhe (Vertex III, Haglöf) gemessen. Die an den Grenzen der Fläche stehenden Bäume wurden nicht berücksichtigt, um Randeffekte auszuschließen. Anhand der Durchmesserverteilung erfolgte die Auswahl von 7 repräsentativen Probebäumen.

Diese Bäume wurden bodengleich gefällt. Danach erfolgte baumweise die Aufteilung in jeweils drei verschiedenen Größenklassen (Zweige  $\varnothing < 3$  cm, Äste  $\varnothing 3-7$  cm, Derbholz  $\varnothing > 7$  cm). Alle Kompartimente wurden getrennt und frisch im Feld gewogen. Repräsentative Proben je Baum und Größenklasse wurden für die Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes und weitere Laboranalysen entnommen. Aus den ermittelten Wassergehalten und den Frischmassen der Probebäume bzw. deren Kompartimen-

ten wurden die Trockenmassen hergeleitet. Der vielfach festgestellte straffe Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser und Gesamttrockenmasse der Einzelbäume (vgl. VERWIJST und TELENUS, 1999; RÖHLE et al., 2006) wurde für die Herleitung einer allometrischen Biomassefunktion verwendet. Diese diente für die Ermittlung der Biomasse des Gesamtbestandes aus der Durchmesserverteilung.

An zwei Bäumen erfolgten Wurzelgrabungen für die Abschätzung der unterirdischen Biomasse. Dabei wurde sowohl die Profilwandmethode (BOLTE et al., 2003) als auch die Polygonmethode (Thiessen-Polygone, vgl. RASPE et al., 1998) verwendet. Von einer Hälfte des Wurzelsystems wurden alle Wurzeln  $\varnothing > 2$  mm ausgegraben, von anhaftenden Bodenpartikeln befreit und entsprechend den Proben der oberirdischen Biomasse weiterverarbeitet.

An den 7 Probebäumen wurden Anfang September 2008 je Meter Kronenhöhe jeweils 3 voll entwickelte Blätter entnommen. Der Streuanfall wurde auf der Untersuchungsfläche mit Beginn des Laubaustriebs in wöchentlichen Intervallen mit 8 Streusammlern (Auffangfläche je 2500 cm<sup>2</sup>) erfasst und die Trockenmasse getrennt nach Blättern und Zweigen bestimmt.

Im Januar 2009 wurden sowohl auf der Plantagenfläche als auch auf der Ackerfläche an jeweils 6 zufällig ausgewählten Punkten ungestörte Bodenproben (Bodensäulenzylinder, Eijkelkamp) bis etwa 80 cm Tiefe entnommen. Das Bodenmaterial wurde nach Tiefenstufen von 0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm, 30–45 cm, 45–60 cm und 60–80 cm aufgeteilt.

## 2.3 Laboranalysen

Die Analyse der Boden und Pflanzenproben erfolgte im Labor des Institutes für Bodenkunde und Standortslehre der TU Dresden in Tharandt. Die Gehalte an pflanzenver-

fügbarem P, K und Mg in den Bodenproben wurden im Labor der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) in Leipzig durchgeführt. Holz-, Wurzel- und Frischblattproben wurden im Trockenschrank bei 60 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Anschließend erfolgte die schrittweise Zerkleinerung und Mahlung der Pflanzenproben (Zentrifugalmühle, Retsch). Für einen Teil der Pflanzenproben wurde auch die Masse-Bestimmung nach Trocknung bei 105 °C vorgenommen, um einen Korrekturfaktor für die Berechnung der darrtrockenen Biomasse zu ermitteln. Die untersuchten Parameter der Boden- und Pflanzenproben, verwendete Methoden und Analysegeräte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Die Auswahl der analysierten Nährelemente orientierte sich an deren Bedeutung für das Pflanzenwachstum sowie vorliegenden Vergleichsstudien aus Deutschland (JUG et al., 1997, 1999a, 1999b; KAHLE et al., 2007, 2010). So wurde die vorliegende Untersuchung auf die Makronährelemente N, P, K, S, Ca und Mg beschränkt. In den Routinemessungen mit dem ICP wurden auch die Spektren von den Mikronährelementen Al, B, Cu, Fe, Mn, Na und Zn erfasst. Die Ergebnisse wurden in der vorliegenden Studie jedoch nicht dargestellt, da auf dem Standort keine Defizite von Mikronährelementen zu erwarten waren und uns auch keine Vergleichswerte aus anderen Studien bekannt sind.

## 2.4 Berechnungen und statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Inventur und die ermittelte Biomassefunktion wurden für die Berechnung der oberirdischen Holz-Biomasse ( $t\ ha^{-1}$ ) verwendet. Die Hochrechnung auf

Elementvorräte in der Biomasse ( $kg\ ha^{-1}$ ) erfolgte einzelbaumweise durch Multiplikation der Elementgehalte mit den ermittelten Biomassen, Ableitung einer durchmesserabhängigen Funktion und anschließender Anwendung auf die Durchmesserverteilung.

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff wurde aus der Differenz aus  $C_t$  und  $C_{anorg}$  gebildet.

Die Kohlenstoff- und Stickstoffvorräte,  $C_{org}$  bzw.  $N_t$  sowie die Vorräte an pflanzenverfügbaren P, K und Mg wurden wie folgt berechnet:

$$C_{org} [t\ ha^{-1}] = C_{org} [g\ 100^{-1}g^{-1}] \times TRD [g\ cm^{-3}] \times Tiefe [cm]$$

$$N_t (P, K, Mg) [kg\ ha^{-1}] = N(P, K, Mg)_t [g\ 100^{-1}g^{-1}] \times TRD [g\ cm^{-3}] \times Tiefe [cm] \times 1000$$

Die Analyseergebnisse wurden mit dem Wilcoxon-Rangsummentest auf zweiseitige Verteilungsunterschiede getestet. Für den Vergleich von mehr als zwei Stichproben kam der Kruskal-Wallis-Test zur Anwendung.

## 3 Ergebnisse und Diskussion

### 3.1 Produktivität und Biomasseverteilung

Die oberirdische Biomasseakkumulation (im blattlosen Zustand) nach 10 Jahren belief sich auf  $74\ t\ ha^{-1}$  (Trocknung bei 60 °C). Bei einer Trocknung bei 105 °C reduziert sich dieser Wert um 2,7 % auf  $72\ t\ ha^{-1}$ . In Abbildung 2 sind die Durchmesserverteilung des Bestandes und die Verteilung der Biomasse auf die einzelnen Kompartimente der untersuchten Bäume dargestellt.

Tabelle 2: Untersuchte Parameter an Boden- bzw. Pflanzenproben, verwendete Extraktionslösungen und Analysegeräte  
Table 2: Investigated parameters of the soil and plant samples respectively, used methods

Parameter	Extraktionslösung/Aufschlussverfahren	Analysegerät
Trockenrohdichte; TRD	–	Trockenschrank (105 °C), Waage
Elementgehalte, Pflanzenproben	Thermischer Druckaufschluss mit $HNO_3$	CCD-ICP-Spektrometer Ciros (Spectro Analytical Instruments)
Mineralisierbarer Stickstoff; $N_{min}$ ( $NH_4^+$ ; $NO_3^-$ )	0,1 M KCL	Elementaranalysator Multi NC (Analytik Jena)
pH-Wert	0,01 M $CaCl_2$	pH-Meter Delta 320 (Mettler-Toledo)
Gesamtkohlenstoff; $C_t$	Verbrennung bei 900 °C	Elementaranalysator Vario EL (Elementar Analysensysteme)
Gesamtstickstoff; $N_t$	HCl, volumetrische $CO_2$ -Bestimmung	Calciometer (Eijkelkamp)
Carbonatgehalt, $C_{anorg}$	Calcium-Acetat-Lactat (CAL) nach VDLUFA	Continuous-Flow-Analysator (SEAL-Analytical)
Pflanzenverfügbare Phosphor und Kalium; P und K		Continuous-Flow-Analysator (SEAL-Analytical)
Pflanzenverfügbares Magnesium; Mg	0,01 M $CaCl_2$	
Effektive Kationenaustauschkapazität; $KAK_{eff}$	0,5 M $NH_4Cl$	
Basensättigung; BS		CCD-ICP-Spektrometer Ciros (Spectro Analytical Instruments)



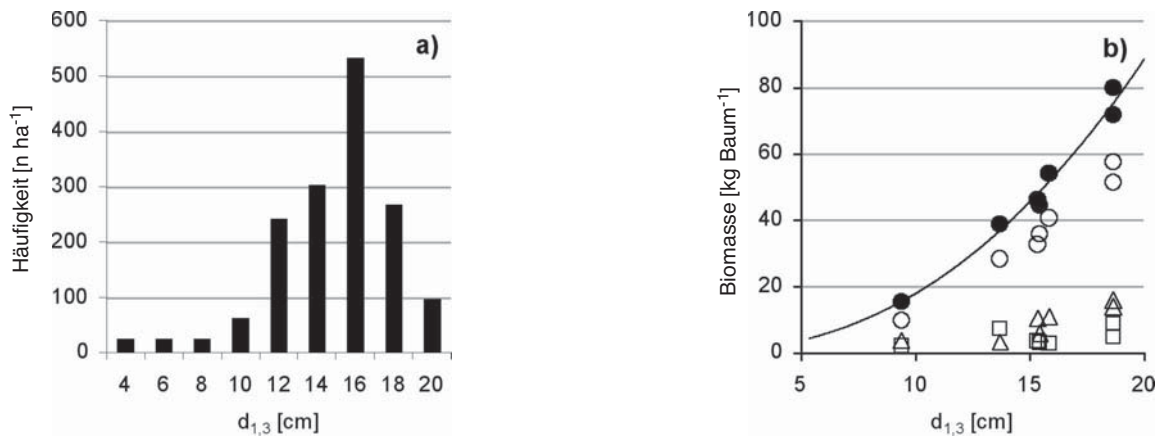


Abbildung 2: Charakteristik des untersuchten Pappelbestandes; a) Verteilung der Stammdurchmesser in 1,3 m Höhe ( $d_{1,3}$ ); b) oberirdische Gesamtbio­masse und Biomasse einzelner Kompartimente der untersuchten Bäume ( $n = 7$ ); Zweige  $\varnothing < 3$  cm ( $\Delta$ ), Äste  $\varnothing 3\text{--}7$  cm ( $\square$ ) und Derbholz  $\varnothing > 7$  cm ( $\circ$ ), Oberirdische Gesamtmasse ( $\bullet$ ), angepasste Biomassefunktion:  $y = 0.0892 \times x^{2.2975}$  ( $r^2 = 0.99$ ,  $p < 0,01$ )  
 Figure 2: Characteristics of the investigated poplar stand; a) stem diameter distribution at 1.3 m b) aboveground total biomass and biomass in different classes of the 7 investigated trees

72 % ( $\pm 5$ ) der oberirdischen Holzbiomasse entfallen auf Derbholz ( $\varnothing > 7$  cm), 10 % ( $\pm 5$ ) auf Äste ( $7 \text{ cm} \geq \varnothing \geq 3$  cm) und 18 % ( $\pm 6$ ) auf Zweige ( $\varnothing < 3$  cm). Die akkumulierte Derbholzbiomasse von  $51,8 \text{ t}_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1}$  entspricht umgerechnet (KRAMER und AKCA, 1995) rund  $140 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  (Vfm  $\text{ha}^{-1}$ ).

Aus den Wurzeluntersuchungen wurde auf eine unterirdische Gesamtbio­masse einschließlich Wurzelstock von  $32,6 \text{ t ha}^{-1}$  hochgerechnet. Somit kann orientierend ein Spross-Wurzel-Verhältnis von 2,3 : 1 abgeleitet werden.

Die akkumulierte Blattbiomasse bzw. Blattstreuproduktion belief sich 2008 auf  $4.46 \text{ t ha}^{-1}$  ( $\pm 0.12$ ,  $n = 8$ ). Streu aus Zweigen und Ästen ( $\varnothing < 7$  cm) summierte sich auf  $0.43 \text{ t ha}^{-1}$  ( $\pm 0.11$ ). Bemerkenswert ist, dass bis zum Beginn des herbstlichen Blattfalls bereits rund  $2 \text{ t ha}^{-1}$  Streu, davon  $0,4 \text{ t ha}^{-1}$  Zweige und Äste zu beobachten waren.

Die nach 10-jähriger Standzeit akkumulierte oberirdische Biomasse entspricht mit  $72 \text{ t ha}^{-1}$  einem durchschnittlichen Gesamtzuwachs von  $7,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ . Damit ist die Biomasseleistung für die gewählte Ausgangspflanzenzahl von 1667 St.  $\text{ha}^{-1}$  als hoch einzuschätzen. Die höheren Leistungen von über  $10 \text{ t ha}^{-1}$  auf guten Standorten in Ostdeutschland (RÖHLE et al., 2008) sind auf die höheren Pflanzzahlen von über 7000 Stück  $\text{ha}^{-1}$  zurückzuführen. Verglichen mit Pappelerträgen der höchsten Bonität auf Waldstandorten (KNAPP, 1973) wird ein Derbholzvorrat von  $140 \text{ Vfm ha}^{-1}$  erst nach 15 Jahren erreicht. Diese Gegenüberstellungen unterstreichen das überdurchschnittliche Wuchspotenzial des getesteten Pappelhybrids auf dem untersuchten Ackerstandort. In einer Studie zum Wasserhaushalt auf der glei-

chen Fläche kommen PETZOLD et al. (2010) zum Schluss, dass auf diesem Standort weit höhere Biomasseleistungen möglich sind, diese jedoch von der Wasserverfügbarkeit begrenzt werden.

### 3.2 Nährstoffallokation in der Biomasse und Nährstoffverluste durch Ernte

Die Gehalte an C, N und weiterer Nährelemente in den verschiedenen Biomassekompartimenten sind in Tabelle 3 dargestellt. Die Elementgehalte in den oberirdischen Biomassekompartimenten unterscheiden sich bis auf C jeweils signifikant ( $p < 0,001$ ,  $n_{\text{Bäume}} = 7$ ). Die höchsten N-Gehalte wurden in der oberirdischen verholzten Biomasse in den Zweigen mit  $7,5 \text{ mg g}_{\text{TS}}^{-1}$  festgestellt, während alle anderen Elemente (außer C) die höchste Konzentration in den Ästen aufweisen. Der hohe N-Gehalt lässt sich auf die an den Zweigen befindlichen Knospen zurückführen. Aufgrund von nur zwei untersuchten Wurzelsystemen stellen die Werte für die unterirdische Baumbiomasse allerdings nur orientierende Werte dar.

In Tabelle 4 sind die hochgerechneten Elementvorräte ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) zusammengefasst. Bei der Betrachtung der oberirdischen verholzten Biomassekompartimente fällt auf, dass die N-Akkumulation in den Zweigen und Ästen höher ist als im Derbholz, während der Vorrat der anderen Elemente jeweils im Derbholz höher ist. Insgesamt ist auch in der Wurzelmasse ein hoher Elementvorrat festgelegt. Die Menge des zum Zeitpunkt der Biomasseinventur in der

Tabelle 3: Elementgehalte [Median in mg g<sub>TS</sub><sup>-1</sup>] in den Biomasse-Kompartimenten der Pappel, Elementgehalte der oberirdischen Biomasseanteile unterscheiden sich bis auf C signifikant (p < 0,001; n<sub>Bäume</sub> = 7), Werte für unterirdische Biomasse orientierend (n<sub>Bäume</sub> = 2)

Table 3: Element concentrations in different biomass compartments of poplar

	Blätter	Zweige (Ø < 30 mm)	Äste (Ø 30–70 mm)	Derbholz (Ø > 70 mm)	Starkwurzel <sup>a</sup> (Ø > 70 mm)	Grobwurzel (Ø 30–70 mm)	Mittelwurzel (Ø 10–30 mm)	Feinwurzel (Ø 2–10 mm)
C	456,2	494,6	495,3	494,4	496,3	493,9	478,1	477,5
N	19,9	7,5	3,0	1,3	1,6	2,1	5,2	5,3
Ca	25,2	4,5	13,2	3,2	4,3	5,1	9,9	14,1
K	13,1	2,5	5,4	2,3	3,2	4,5	8,1	8,1
Mg	2,8	0,5	1,0	0,4	0,6	0,6	1,1	1,0
P	4,0	0,7	1,4	0,4	1,1	1,6	3,5	3,0
S	3,7	0,3	0,7	0,2	0,3	0,4	0,9	1,3

<sup>a</sup> einschließlich Wurzelstock

Tabelle 4: Hochgerechnete Elementvorräte [kg ha<sup>-1</sup>] in den Biomassekompartimenten der Pappel, Klassengrenzen siehe Tabelle 3

Table 4: Calculated element pools [kg ha<sup>-1</sup>] in different biomass compartments of poplar (for class boundaries see table 3)

	Blätter (akkum. Streu)	Zweige	Äste	Derbholz	Oberirdische Dendromasse	Stark- wurzel <sup>a</sup>	Grob- wurzel	Mittel- wurzel	Fein- wurzel	Unter- irdische Biomasse
C	2035	6621	3673	26435	36729	8207	2696	2982	2073	15958
N	89	101	22	67	191	26	12	33	23	93
Ca	112	60	98	172	329	72	28	62	61	223
K	58	33	40	120	193	53	24	51	35	163
Mg	13	6	8	20	33	9	3	7	4	24
P	22	10	10	22	41	19	9	22	13	62
S	17	4	5	10	19	4	2	6	6	18

<sup>a</sup> einschließlich Wurzelstock

Wurzelbiomasse (Ø > 2 mm einschließlich Wurzelstock) gespeicherte Kohlenstoffs beträgt 16 t ha<sup>-1</sup>.

Die Güte des Standorts hinsichtlich der Nährstoffversorgung wird durch die Blattspiegelwerte in Tabelle 3 bestätigt. Sie liegen für die Elemente N, Ca, K, Mg, P und S ausnahmslos in dem von JUG et al. (1999a) für Balsampappeln als optimal angegebenen Bewertungsrahmen.

Aus den beobachteten Elementvorräten in der oberirdischen Biomasse in Tabelle 4 lassen sich potenzielle Erntentzüge in kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> ableiten, die im Vergleich zu Werten in der Literatur und den dort gegebenen Düngempfehlungen diskutiert werden. Danach betragen die potenziellen N-Entzüge bei einer Entnahme der gesamten oberirdischen Biomasse 19 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Würde man durch entsprechend angepasste Ernteverfahren die Entnahme auf das Derbholz (Ø > 7 cm) beschränken, reduziert sich auch der N-Entzug deutlich auf 6,7 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup>. Allerdings würde die Erntebiomasse dann auch um 28 % geringer ausfallen. BERTHOLET et al. (2000) weisen für eine Pappelplantage in Frankreich ebenfalls auf die Steuerungsoptionen der Nährstoffentzüge durch angepasste Ernteverfahren hin.

Für die energetische Nutzung wird jedoch in der Regel

die gesamte oberirdische Biomasse geerntet. ENGLISCH et al. (2009) kalkulieren nach 10-jähriger Standzeit von Pappeln vergleichbarer Wuchsleistung auf Standorten in Österreich mit Nährstoffentzügen von 16 (N), 38 (Ca), 12 (K), 4 (Mg) und 2 (P) kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> und liegen damit im Bereich der von uns gefundenen Werte. Dagegen übersteigen die von JUG et al. (1999a) berechneten Nährstoffentzüge bei fünfjähriger Rotation mit im Durchschnitt 26 (N), 24 (K), 6 (P) kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> deutlich diese Dimensionen, während die Entzüge für Ca und Mg mit 27 bzw. 3 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> unter unseren gefundenen Werten liegen. Bei einer kürzeren Rotationszeit verbunden mit höheren Pflanzzahlen und einer Ganzbaumnutzung für energetische Zwecke ist folglich mit deutlich höheren Nährstoffentzügen zu rechnen (vgl. auch SCHOLZ et al., 2001; ENGLISCH et al., 2009).

Für die Nährstoffbilanzierung müssen jedoch auch die atmosphärischen Depositionen berücksichtigt werden, die für N an unserem Versuchsstandort während der Versuchsdauer ca. 10–15 kg ha<sup>-1</sup> a<sup>-1</sup> (nasse Deposition) betragen (siehe Abbildung 1). Danach und bei Unterstellung von vernachlässigbar geringen N-Sickerverlusten entsprechend einer geringen Gesamtsickerung (PETZOLD et al., 2010)

sowie Ausgasungen (HELLEBRAND et al., 2005) ist unter den gegenwärtigen Standortbedingungen ohne Düngung eine ausgeglichene N-Versorgung für die Pappelplantage zu erwarten. Langfristig ist jedoch mit weiter zurückgehenden N-Depositionen aus der Landwirtschaft zu rechnen (OENEMA et al., 2009) und folglich auch die Entwicklung eines N-Defizits in der Versorgung des Pappelbestands möglich. Eine exakte Bilanzierung ist allerdings schwierig, da die N-Gesamtd deposition wegen direkter Aufnahme über die Vegetationsoberfläche sicherlich höher ist als die am Standort erfasste „nasse“ Deposition. Dabei ist zu beachten, dass die Auskämmung von Aerosolen aufgrund der größeren Wuchshöhe in Gehölzbeständen höher liegen dürfte als bei einjährigen Ackerkulturen.

### 3.3 Trockenrohdichte, Bodenreaktion und austauschbare Kationen

Unter Ackernutzung wurden in den oberen beiden Tiefenstufen signifikant geringere Trockenrohdichten (TRD) gemessen ( $p < 0,05$ ) als in den Tiefenstufen darunter. Unter Pappel ist die TRD im Oberboden ausgeglichen, dagegen ist ab 30 cm Bodentiefe ein signifikanter Anstieg der TRD festzustellen. Bis auf die Tiefenstufe 20–30 cm ( $p < 0,01$ ) wurden im Vergleich der beiden Landnutzungen keine Unterschiede beobachtet (siehe Abbildung 3).

Die Bodenreaktionen lagen sowohl auf der Ackerfläche als auch unter Plantagennutzung in allen Horizonten im Bereich von sehr schwach bis schwach sauer, wobei im Unterboden eine größere Streuung auftrat (Abbildung 4). Die pH-Werte unter Plantagennutzung waren signifikant ge-

ringer (Tiefenstufen bis 30 cm  $p < 0,01$ ; bis 60 cm  $p < 0,05$ ) als unter Acker. Auf der Plantage wurde im Unterboden (ab 30 cm Tiefe) ein deutlich geringerer pH-Wert als im Oberboden festgestellt ( $p < 0,01$ ).

Die Gehalte austauschbarer Kationen ( $KAK_{eff}$ ) sind in Abbildung 5 dargestellt. Die  $KAK_{eff}$  im Oberboden betrug auf den beiden Vergleichsflächen jeweils  $> 90 \mu\text{mol IÄ g}^{-1}$ . Nach Tiefenstufen wurden unter beiden Nutzungsvarianten signifikante Unterschiede festgestellt ( $p < 0,01$ ). Beim Vergleich von Acker- und Plantagennutzung waren die Unterschiede nur in der obersten Tiefenstufe deutlich ( $p < 0,01$ ) sowie in den zwei untersten Tiefenstufen ( $p < 0,05$ ). Letztere Befunde sind jedoch auf die geringer mächtigen Lössauflagen und den damit stärkeren Einfluss des geologischen Grundgesteins (Tonschiefer) im Unterboden zurückzuführen. Die Austauscherbelegung wird erwartungsgemäß von Ca dominiert, gefolgt von Mg und K sowie geringen Anteilen weiterer Kationen (Al, Fe, Mn). Die Belegung mit Kationen war unter Plantagennutzung in allen Tiefenstufen im Vergleich zur Ackernutzung geringer ( $p < 0,01$ ), wobei sich hauptsächlich die Austauscherbelegung mit Mg-Ionen unter Plantage in allen Tiefenstufen reduzierte ( $p < 0,01$ ).

Diese Befunde spiegeln sich auch in den Vorräten pflanzenverfügbarer Nährstoffe (Tabelle 5) wider. Während im Oberboden (0–30 cm) beide Flächen vergleichbar mit P und K ausgestattet sind, wurden im Oberboden unter Plantage signifikant geringere Mg-Gehalte sowie Mg-Vorräte festgestellt ( $p < 0,01$ ).

Insgesamt lassen unsere Befunde schwache bodenökologische Veränderungen auf der Pappelplantage erkennen. Diese sind durch ausbleibende ackerbauliche Bewirtschaftung als auch durch den Einfluss der Pappelbestockung

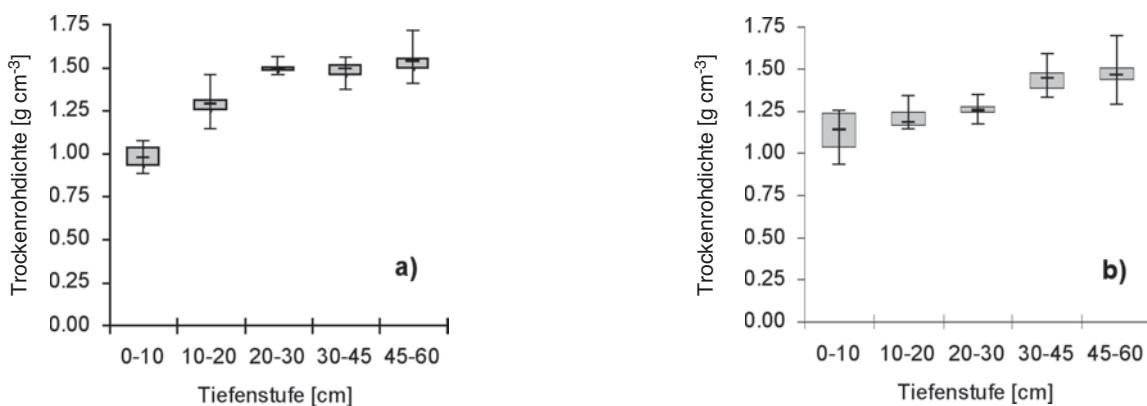


Abbildung 3: Boxplots der Trockenrohdichte in verschiedenen Tiefenstufen a) unter Ackernutzung und b) nach 10-jähriger Standzeit einer Pappelplantage (rechts), Whisker repräsentieren Minimum und Maximum der Stichprobe ( $n = 6$ )

Figure 3: Boxplots of bulk density at different soil depths a) in the arable field; b) in the poplar stand after 10 years

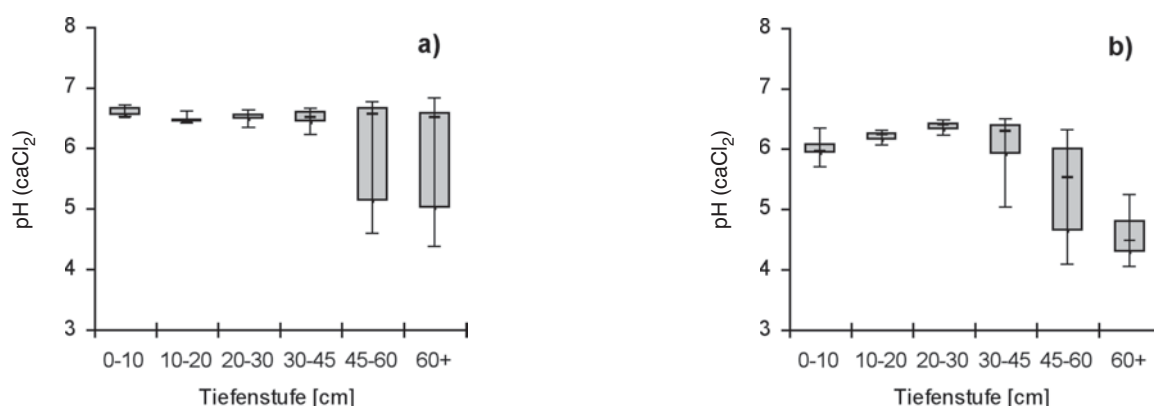


Abbildung 4: Boxplots des pH-Wertes (0,1 M CaCl<sub>2</sub>) in verschiedenen Tiefenstufen unter a) Ackernutzung und b) nach 10-jähriger Standzeit einer Pappelplantage

Figure 4: Boxplots of the pH-value at different soil depths a) in the arable field; b) in the poplar plantation after 10 years

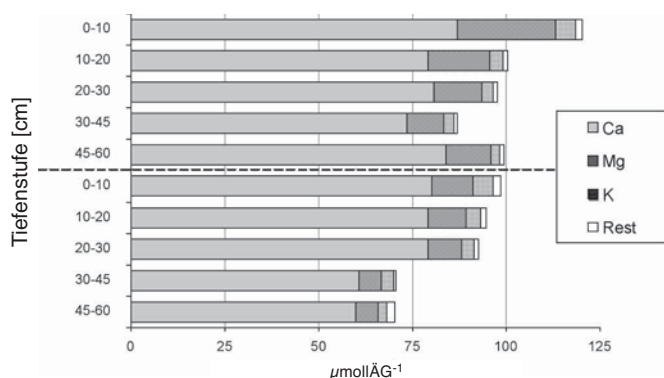


Abbildung 5: Austauschbare Kationen ( $\mu\text{mol Ionenäquivalent g}^{-1}$ ) in Tiefenstufen bis 60 cm auf der Untersuchungsfläche unter Acker (oben) und nach 10-jähriger Plantagennutzung (unten)

Figure 5: Exchangeable cations at different soil depths in the arable field (at the top) and in the poplar plantation after 10 years (bottom)

selbst erklärbar. Im Gegensatz zu KAHLE et al. (2007) konnten wir jedoch keine signifikante Verringerung der TRD in der obersten Tiefenstufe 0–20 cm feststellen. Nur in der Tiefenstufe 20–30 cm wurden von uns auf der Pappelfläche deutlich geringere TRD als auf der Ackerfläche gemessen.

Das lässt auf unserer Versuchsfläche auf ein allmähliches Verschwinden der Pflugsohle und die Ausbildung eines Tiefengradienten der TRD im relativ homogenen Ausgangssubstrat schließen.

Der leichte Rückgang des pH-Wertes und die Ausbildung eines Tiefengradienten nach 10 Jahren Pappelbestockung ist auf die H<sup>+</sup>-Freisetzung bei der Nährstoffaufnahme an der Wurzel bei gleichzeitig ausbleibender Kalkung und Bodenhomogenisierung zu erklären. Dieser Prozess ging mit einem Rückgang in der KAK<sub>eff</sub> und insbesondere mit einer verringerten Belegung mit Mg-Ionen sowie deren Auswaschung einher. JUG et al. (1999) beobachteten auf Pappelversuchsflächen ebenfalls Rückgänge bei pH und KAK<sub>eff</sub>, wobei sich hier im Versuchszeitraum von 9 Jahren hauptsächlich die Mengen an Ca und Mg am Austauscher verringerten. Dagegen stellten KAHLE et al. (2007, 2010) auf KUP mit Pappel auf Sandböden in Mecklenburg-Vorpommern keine Versauerung im Oberboden fest. Allerdings zeigte sich ein deutlicher Rückgang des pflanzenverfügbaren Mg (KAHLE et al., 2010). Vor diesem Hintergrund sollten Blattspiegelwerte beobachtet werden und Mg-Verluste langfristig durch Kompensations- bzw. Erhaltungskalkungen, z. B. mit Dolomitmergel, ausgeglichen und der pH-Wert stabilisiert werden.

Tabelle 5: Vorräte pflanzenverfügbarer Nährstoffe P, K und Mg ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) im Oberboden sowie im Unterboden unter Acker sowie Plantagennutzung  
Table 5: Pools of plant available nutrients P, K and Mg in the top and the subsoil respectively in the arable field and in the poplar plantation after 10 years

	P (0–30 cm)	P (30–60 cm)	K (0–30 cm)	K (30–60 cm)	Mg (0–30 cm)	Mg (30–60 cm)
Acker	113	46	1728	2067	899 <sup>a</sup>	1049
Plantage	94	41	1407	2077	665 <sup>a</sup>	911

<sup>a</sup> signifikant ( $p < 0.01$ )



### 3.4 Stickstoff und Kohlenstoff im Boden

Die  $C_{org}$ -Gehalte zeigten auf beiden Untersuchungsflächen einen deutlichen Tiefengradienten ( $p < 0.01$ , siehe Abbildung 6). Die höchsten Gehalte wurden mit 1,7 % unter Plantagennutzung bzw. 1,6 % unter Acker in der Tiefenstufe bis 10 cm beobachtet. Signifikante Befunde zwischen Plantage und Acker wurden jedoch in keiner Tiefenstufe festgestellt.

Für die Gehalte an Gesamt-N,  $N_{min}$  sowie dessen Fraktionen  $NO_3^-$  und  $NH_4^+$  wurden ebenfalls Tiefengradienten beobachtet. Im Vergleich zwischen Ackerfläche und Pappelplantage unterschieden sich jedoch nur die  $NO_3^-$ -Konzentrationen in allen Tiefenstufen deutlich ( $p < 0.01$ , Abbildung 7). Die Unterschiede in den  $NO_3^-$ -Konzentrationen spiegeln sich in geringeren  $N_{min}$ -Gehalten sowie den  $N_{min}$ -Vorräten im Boden unter Plantagennutzung wider.

Auf den Vergleichsflächen wurde jeweils ein  $C_{org}$ -Vorrat bis 60 cm Bodentiefe von rund  $50 \text{ t ha}^{-1}$  berechnet (Abbil-

dung 8a). Der  $N_t$ -Vorrat betrug auf beiden Flächen rund  $7 \text{ t ha}^{-1}$  (Abbildung 8b).

Wir konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen N und C sowie C/N auf den beiden untersuchten Flächen feststellen. Lediglich die Nitrat-Gehalte und -Vorräte waren auf der Pappelfläche deutlich geringer. Dies ist auf die fehlende N-Düngung und die langjährige Bodenruhe zurückzuführen, welche eine geringere N-Mineralisierung nach sich zieht. Die deutlich geringeren  $NO_3^-$ -Gehalte auch im Unterboden der Pappelplantage lassen auf ein sehr geringes Potenzial der Nitratverlagerung in das Grundwasser schließen. Zu ähnlichen Befunden kommt MAKESCHIN (1994), der eine deutliche Reduktion der Nitratauswaschung 2 bis 5 Jahre nach Anlage einer Pappelplantage auf Acker in der Oberpfalz (Abbachhof, Süddeutschland) feststellte. JUG et al. (1999b) bestätigen die geringeren  $N_{min}$ - bzw. Nitratgehalte unter Pappel-KUP und Acker auch für Untersuchungsflächen in Canstein (Rheinisches Mittelgebirge) und Wildeshausen (Nordwestdeutsches Tiefland).

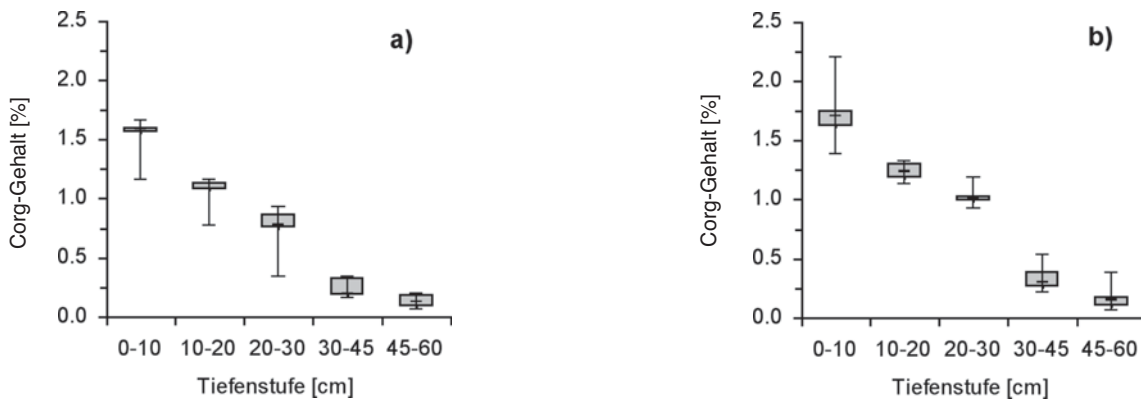


Abbildung 6: Boxplots der  $C_{org}$ -Gehalte in verschiedenen Tiefenstufen a) unter Ackernutzung und b) nach 10-jähriger Standzeit einer Pappelplantage

Figure 6: Boxplots of  $C_{org}$ -contents at different soil depths in the arable field (a) and in the poplar plantation after 10 years (b)

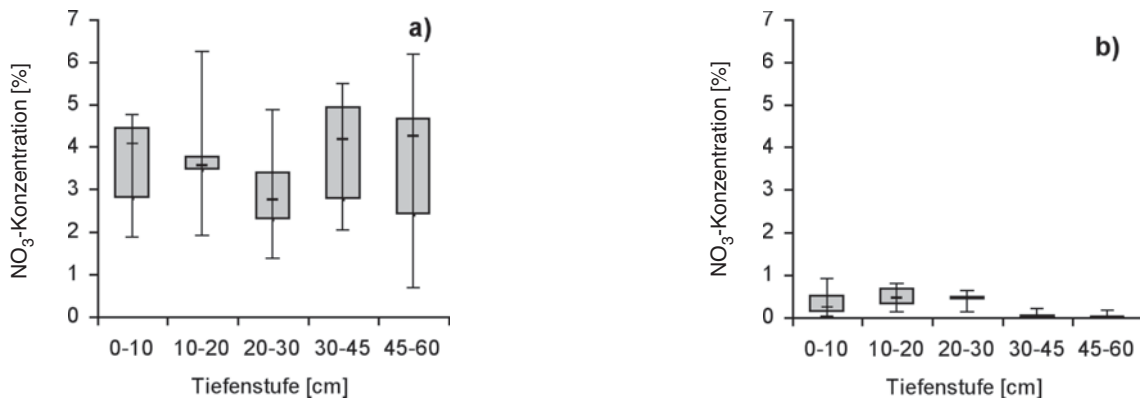


Abbildung 7: Vergleich der Boden-Nitratkonzentrationen zwischen a) Acker und b) nach 10-jähriger Standzeit einer Pappelplantage

Figure 7: Comparison of  $NO_3^-$ -concentration of the soil in the arable field (a) and in the poplar plantation after 10 years (b)

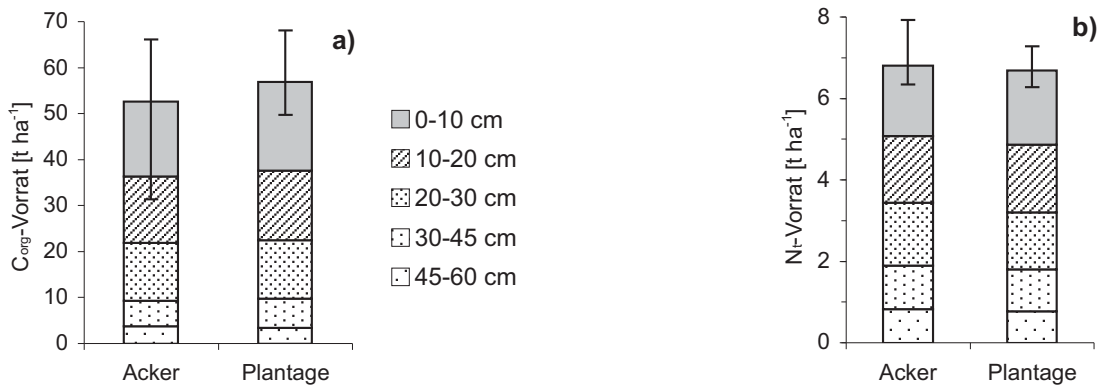


Abbildung 8: Acker und Plantage im Vergleich der Gesamtvorräte an a) organischem Kohlenstoff C<sub>org</sub> und b) Gesamtstickstoff N<sub>t</sub>; Fehlerbalken repräsentieren Minimum und Maximum der Gesamtvorräte bis 60 cm Bodentiefe, keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Varianten

Figure 8: Comparison between arable field and poplar plantation: soil pools of a) organic carbon and b) total N

In den Untersuchungen von JUG et al. (1999b) wurden auf den drei verschiedenen Standorten nach mehrjährigem Pappelanbau im Oberboden (0–30 cm) kaum Veränderungen des C<sub>org</sub>-Vorrates über die Zeit beobachtet. Lediglich in der Tiefenstufe 0–10 cm wurde ein signifikanter Anstieg des C<sub>org</sub>-Vorrates nachgewiesen. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden stieg nur auf der Untersuchungsfläche Abbachhof von ca. 35 t ha<sup>-1</sup> auf 45 t ha<sup>-1</sup> hauptsächlich durch Aufbau des Humusvorrates in der Streuschicht und den oberen 5 cm des Bodens. Auf den anderen beiden Flächen blieb der C<sub>org</sub>-Vorrat bei ca. 45 t ha<sup>-1</sup> (Canstein) bzw. 55 t ha<sup>-1</sup> (Hildeshausen) nahezu unverändert. Auch KAHLE et al. (2010) berichten von gleich bleibenden C<sub>org</sub>-gehalten im Oberboden (Ap-Horizont) einer sandigen Braunerde in Mecklenburg-Vorpommern nach 15-jährigem Anbau von Pappel, während im Unterboden (Bv-Horizont) eine höhere Konzentration unter Pappel festgestellt wurden. Die Autoren kalkulierten für den Oberboden (0–30 cm) unter Ackernutzung einen C<sub>org</sub>-Vorrat von 37,7 t ha<sup>-1</sup>. In der Variante mit 6-jährigem Umtrieb ergab sich mit 40,4 t ha<sup>-1</sup> ein höherer Vorrat, bei 3-jährigem Umtrieb mit 31,5 t ha<sup>-1</sup> dagegen ein niedrigerer Vorrat. Die Autoren weisen jedoch auch auf die Bodenheterogenität als mögliche Erklärung für die Unterschiede hin. Die bisherigen Befunde zum Sequestrierungspotenzial organisch gebundenen Kohlenstoffs im Boden unterstreichen jedoch auch, dass bei der Bilanzierung auch tiefere Bodenkompimente berücksichtigt werden müssen (vgl. auch DON et al., 2007). Trotz hoher Streuraten aus Blättern und Wurzeln (BLOCK et al., 2006) waren in unserer Studie nach 10 Jahren Pappelplantation jedoch keine höheren C<sub>org</sub>-Vorräte als unter Ackernutzung feststellbar. Eine Erklärung liegt darin begründet, dass der

Humusvorrat von > 50 t ha<sup>-1</sup> (0–60 cm) für einen Ackerstandort relativ hoch ist. Außerdem kann es durch die Plantagenbegründung in der ersten Phase danach zu einer Humus-Mineralisierung kommen, die vor allem bei hohen Ausgangsvorräten zu einem deutlichen Verlust an C<sub>org</sub> führt (vgl. VAN DE WALLE, 2007). Danach setzte möglicherweise wieder eine Phase des C<sub>org</sub>-Anstiegs bis zu den ausgeglichenen Verhältnissen zum Zeitpunkt unserer Untersuchung ein mit einem C<sub>org</sub>-Vorrat von rund 50 t ha<sup>-1</sup>. Neben diesem zeitlich dynamischen Aspekt müssen darüber hinaus beim Vergleich verschiedener Studien auch die unterschiedlichen Standortbedingungen berücksichtigt werden, die eine andere C-Dynamik im Boden nach sich ziehen können. Andererseits ist auch der von uns abgeschätzte C-Vorrat in den Grobwurzeln von rund 16 t ha<sup>-1</sup> als relativ stabiler C-Speicher anzusehen (vgl. CAMIRÉ et al., 1991). Es fragt sich somit, wie sich der Bodenumusvorrat mittel- und längerfristig weiter entwickelt. JANDL et al. (2007) führen in ihrem Übersichtsartikel zur C-Sequestrierung in Böden durch forstliche Bewirtschaftung auf, dass Waldböden unter Eichen- bzw. Buchenwäldern einen Kohlenstoffvorrat von 100–150 t ha<sup>-1</sup> aufweisen können. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sich solche Vorräte nach Aufforstung jedoch nur über viele Jahrzehnte aufbauen. Die Baumarten Eiche und Buche liefern im Vergleich zu KUP-Baumarten jedoch schwerer zersetzbar Streu mit weiteren C/N-Verhältnissen und höherem Ligninanteil (HENDRIKSEN, 1990). Die schnelle Zersetzbarkeit der Pappelstreu und i.d.R. günstigere bodenchemische Bedingungen in Ackerplantagen im Vergleich zu etablierten Waldstandorten führen zu einer schnelleren Veratmung des darin gespeicherten C. Wir vermuten daher, dass nur ein geringer

Teil dieses C-Pools in den Mineralboden verlagert beziehungsweise dort stabilisiert werden kann. Ein wesentlicher Aspekt ist auch die Tiefenverteilung und der Umsatz der Wurzelbiomasse. Da sich die Bodenfeuchtedynamik unter KUP v.a. wegen der dort höheren Interzeptionsverdunstung trockener gestaltet als unter ackerbaulichen Feldfrüchten (LAMERSDORF et al., 2010, PETZOLD et al., 2010), ist ein langsamerer Umsatz zu vermuten. Insgesamt ist bei einer längeren Nutzungsdauer von KUP von  $>> 10$  a ein langsamer Anstieg des  $C_{\text{org}}$ -Vorrates im Boden zu erwarten. Ob solch hohe Vorräte wie unter Eichen- oder Buchenwäldern auch bei jahrzehntelanger KUP-Nutzungsdauer erreichbar ist, kann bezweifelt werden (vgl. DECKMYN et al., 2004). Eine verbesserte Prognose des C-Sequestrierungspotenzials in Böden unter KUP ist jedoch nur durch die Untersuchung der Kohlenstoffdynamik, insbesondere der Humusqualität und der Quantifizierung von Kohlenstoffflüssen in diesem Landnutzungssystem möglich. Bisher gibt es auch kaum Informationen, wie sich der in der Wurzelbiomasse gespeicherte Kohlenstoffvorrat nach Rückumwandlung von KUP-Flächen in Acker verhält.

#### 4 Schlussfolgerungen

Die Wuchsleistung des Pappelhybrids *Populus maximo-wiczii* x *P. nigra* (cv. Max 1) war deutlich höher als im Vergleich zu forstlich bewirtschafteten Pappelbeständen. Bei höheren Pflanzverbänden (wie in KUP für die Bioenergiegewinnung üblich) sind unter den gegebenen Standortbedingungen im Mittelsächsischen Lösshügelland auch Biomasseerträge  $> 10 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  möglich. Der potenzielle Stickstoffexport durch Ernte wird aktuell durch atmosphärische Depositionen kompensiert. Auch die Versorgung mit P, K und Mg erscheint ausgeglichen, wobei sowohl die Ausstattung mit pflanzenverfügbarem Magnesium als auch das an den Austauschern gebundene Magnesium durch den Pappelanbau tendenziell zurückgeht. Steuerungsoptionen zur Vermeidung von möglichen Nährstoffdefiziten und zu starker Versauerung bei wiederholten Rotationen und langer Gesamtnutzungsdauer von KUP ergeben sich durch angepasste Ernteverfahren sowie Kompensations- bzw. Erhaltungskalkungen.

Das geringe Nitratauswaschungspotenzial, die Bodenlockerung sowie die ganzjährige Bodenbedeckung und intensive Durchwurzelung ziehen eine Reihe von ökologischen Vorteilswirkungen nach sich. So ist davon auszugehen, dass KUP zur Verbesserung der Wasserqualität beitragen, das In-

filtrations- und Retentionsvermögen des Bodens verbessern sowie die Erosionsanfälligkeit gegenüber Wasser und Wind mindern.

Zur positiven Klimawirkung tragen vor allem die hohen C-Speicherungen in der oberirdischen und unterirdischen Biomasse bei. Die mittel- bis längerfristige Entwicklung des Humusvorrates unter KUP hängt sehr stark von den Ausgangsvorräten, der Bodentextur sowie der Bodenfeuchtedynamik ab. Wir vermuten, dass sich ein höherer  $C_{\text{org}}$ -Vorrat gegenüber Ackernutzung nur bei sehr langer Nutzungsdauer einstellt. Zur langfristigen Kohlenstoffdynamik im Boden insbesondere bei Flächenrückumwandlung besteht weiterer Forschungsbedarf.

#### Danksagung

Wir danken dem Bundesministerium für Bildung und Forschung für die Finanzierung der Untersuchungen (BMBF-Projekt AGROWOOD – 0330710 A), der StoraEnso Kabel GmbH und dem Staatsbetrieb Sachsenforst für Bereitstellung der Versuchsplantage sowie Herrn Dr. Nitzsche (Staatliche Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft) und Herrn Dr. Albert (Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) für die Durchführung von Analysen und Datenbereitstellung. Unser Dank gilt auch zwei anonymen Gutachtern für die konstruktiven Hinweise zum Manuskript.

#### Literatur

- BEMMANN, A. und C. KNUST (Hrsg.) (2010): AGROWOOD – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. – Weißensee-Verlag, Berlin.
- BERTHELOT, A., J. RANGER and D. GELGAYE (2000): Nutrient uptake and immobilization in a short rotation coppice stand of hybrid poplars in north-west France. *For Ecol Manage* 128: 167–179.
- BLOCK, R.M.A., K.C.J. VAN REES and J.D. KNIGHT (2006): A Review of Fine Root Dynamics in *Populus* Plantations. *Agroforestry Systems* 67: 73–84.
- BOLTE, A., D. HERTEL, C. AMMER, I. SCHMID, R. NÖRR, M. KUHR und N. REDDE (2003): Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln. *Forstarchiv* 74: 240–262.
- CAMIRÉ, C., B. COTÉ and S. BRULOTTE (1991): Decomposition of roots of black alder and hybrid poplar in short-

- rotation plantings: Nitrogen and lignin control. *Plant and Soil* 138: 123–132.
- DECKMYN, G., G. MUYS, J. GARCIA QUIJANO and R. CEULEMANS (2004): Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beechness forest to short-rotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. *Global Change Biology* 10: 1482–1491.
- DON, A., T. SCHOLTEN and E.D. SCHULZE (2008): Conversion of cropland into grassland: Implications for soil organic-carbon stocks in two soils with different texture. *J Plant Nutr Soil Sci* 172: 53–62.
- ENGLISCH, M., M. WRESOWAR, H. SPIEGEL, R. REITER und K. KATZENSTEINER (2009): Energiewälder im Kurzumtrieb – Möglichkeiten und Grenzen. *BFW-Praxisinformation* 16: 15–17.
- GROGAN, P. und R. MATTHEWS (2002): A modelling analysis of the potential for soil carbon sequestration under short rotation coppice willow bioenergy plantations. *Soil Use Manage* 18: 175–183.
- HENDRIKSON, N.B. (1990): Leaf litter selection by detritivore and geophagous earthworms. *Biol Fertil Soils* 10: 17–21.
- JANDL, R., M. LINDNER, L. VESTERDAL, B. BAUWENS, R. BARITZ, F. HAGEDORN, D.W. JOHNSON, K. MINKKINEN and K.A. BYRNE (2007): How strongly can forest management influence soil carbon sequestration? *Geoderma* 137: 253–268.
- JUG, A. (1997): Standortkundliche Untersuchungen auf Schnellwuchsplantagen unter besonderer Berücksichtigung des Stickstoffhaushalts. Dissertation Ludwig-Maximilians-Universität München.
- JUG, A., C. HOFMANN-SCHIELLE, F. MAKESCHIN and K.E. REHFUESS (1999a): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen, and willow on former arable land in the Federal Republic of Germany. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. *For Ecol Manage* 121: 67–83.
- JUG, A., F. MAKESCHIN, K.E. REHFUESS and C. HOFMANN-SCHIELLE (1999b): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects. *For Ecol Manage* 121: 85–99.
- KAHLE, P., E. HILDEBRAND, C. BAUM and B. BOELCKE (2007): Long-term effects of short rotation forestry with willow and poplar on soil properties. *Arch Agron Soil Sci* 53: 673–682.
- KAHLE, P., C. BAUM, B. BOELCKE, J. KOHL and R. ULRICH (2010): Vertical distribution of soil properties under short rotation forestry in Northern Germany. *J Plant Nutr Soil Sci* DOI: 10.1002/jpln.200900230.
- KNAPP, E. (1973): Ertragstabellen für Schwarzpappelsorten. Forschungsbericht d. Inst. f. Rohholzerzeugung, Abt. Waldbau/Ertragskunde. Eberswalde.
- KRAMER, H. und A. AKCA (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. J.D. Sauerländer s Verlag. Frankfurt am Main.
- LAMERSDORF, N., R. PETZOLD, K. SCHWÄRZEL, K.H. FEGER, B. KÖSTNER, U. MODEROW, C. BERNHOFER and C. KNUST (2010): Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen. In: BEMMANN, A. und C. KNUST (Hrsg.): *AGROWOOD – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven..* Weißensee-Verlag, Berlin 170–188.
- MAKESCHIN, F. (1994): Soil ecological effects of energy forestry. *Biomass Bioenergy* 6, 63–79.
- OENEMA, O., H.P. WITZKE, Z. KLIMONT, J.P. LESSCHEN and G.L. VELTHOF (2009): Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133: 280–288.
- PETZOLD, R., K. SCHWÄRZEL and K.H. FEGER (2010): Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions. *Eur J For Res.* DOI: 10.1007/s10342-010-0459-z.
- RASPE, S., K.H. FEGER und H.W. ZÖTTL (1989): Erfassung der Elementvorräte in der Wurzelbiomasse eines 100-jährigen Fichtenbestandes (*Picea abies* Karst.) im Schwarzwald. *Angew. Botanik* 63, 145–163.
- RÖHLE, H.; K.U. HARTMANN, C. STEINKE und J. SCHRÖDER (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. *AFJZ* 177, 178–187.
- RÖHLE, H., L. BÖCKER, K.H. FEGER, R. PETZOLD, H. WOLF und W. ALI (2008): Anlage und Ertragsaussichten von Kurzumtriebsplantagen in Ostdeutschland. *Schweiz Z Forstwes* 159: 133–139.
- SCHOLZ, V., K. KRÜGER und A. HÖHN (2001): Vergleichende Untersuchungen zum umweltverträglichen und energieeffizienten Anbau von Energiepflanzen. *Arch Agron Soil Sci* 47: 333–361.
- STETTER, U. und F. MAKESCHIN (1999): Humushaushalt ehemals landwirtschaftlich genutzter Böden nach Aufforstung mit schnellwachsenden Baumarten. In: Schütte, A. (Hrsg.): *Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten“*. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe 13: 341–368.
- VERWIJST, T. and B. TELENUS (1999): Biomass estimation

procedures in short rotation forestry. For Ecol Manage 121: 137–146.

VAN DE WALLE, I. (2007): Carbon sequestration in short-rotation forestry plantations and in Belgian forest ecosystems. Ph.D. thesis, Ghent University, Ghent, Belgium.

WOLF, H. und B. BÖHNISCH (2004): Modellvorhaben StoraEnso/Verbundvorhaben: Pappelanbau für die Papierherstellung. Abschlussbericht Landesforstpräsidium Sachsen, Graupa.

### **Anschrift der Autoren**

**DFw Rainer Petzold, Dipl.-Ing. Bianca Schubert, Prof. Dr. Karl-Heinz Feger**, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Piennner Str. 19, 01737 Tharandt

### **Korrespondierender Autor**

**Rainer Petzold**  
petzold@forst.tu-dresden.de

Eingelangt am 18. Juni 2010  
Angenommen am 3. März 2011