Anbau schnellwachsender Bäume im Kurzumtrieb: Ertragsentwicklung und Nährstoffverhältnisse im Boden eines langjährigen Feldversuchs in Nordostdeutschland

P. Kahle und A. Gurgel

Short rotation coppice: biomass production and nutrient status of soils in a long-term field experiment in Northeastern Germany

1 Einleitung und Zielstellung

Die Kurzumtriebswirtschaft mit Pappeln und Weiden (*Populus* und *Salix* spp.) stellt aufgrund hoher Biomasseproduktion und reduzierten Bedarfs an Düngung, Pflanzenschutz und Bodenbearbeitung eine energieeffiziente und zugleich umweltfreundliche Möglichkeit zur Erzeugung von Biomasse für die Energiegewinnung dar (Makeschin et al., 1989; Dimitriou et al., 2009).

Im Unterschied zu annuellen landwirtschaftlichen Kulturpflanzen erfolgt der Anbau über 10–25 Jahre in 3- bis 10-jährigen Rotationen, geerntet wird im laublosen Zustand in den Wintermonaten und die Befahrungen außerhalb der Ernte beschränken sich auf die Pflanzung sowie den Umbruch zum Nutzungsende der Kurzumtriebsplantage (Rowe et al., 2009; Petzold et al., 2010). Umweltauswirkungen dieser extensiven Landnutzungsform betreffen beispielsweise die Emissionen klimarelevanter Gase (Heller et al., 2003; Scholz et al., 2011), den Stoffaustrag aus dem Boden (Makeschin, 1994, Aronsson & Bergström, 2001, Goodlass et al., 2007; Petzold et al.,

Summary

In a 18 years-old short rotation coppice (SRC) in Northern Germany the annual biomass production of *Populus nigra* × *maximowiczii* clone Max 4 and *P. maximowiczii* × *trichocarpa* clone 10/85(49) were 13.3 t ha^{-1} vs. 18.8 dt ha^{-1} and 9.2 t ha^{-1} for *Salix dasyclados*. The vertical distribution of the plant-available phosphorus (P), potassium (K) and magnesium (Mg) reveals a changed gradient under SRC and former SRC compared to continuously annually tilled arable soils. The concentrations of P and Mg of the topsoils (0–30 cm) under SRC were significantly smaller and the concentrations of K were significantly higher than those in tilled arable soils. A tendency of acidification was found under SRC.

Key words: Short rotation forestry, poplar, willow, yields, plant-available nutrients.

Zusammenfassung

Nach 18-jähriger Kurzumtriebswirtschaft mit Pappeln und Weiden in Nordostdeutschland betrug der mittlere Jahreszuwachs an Holztrockenmasse bei den Pappelklonen *Populus nigra* × *maximowiczii* Klon Max 4 und *P. maximowiczii* × *trichocarpa* Klon 10/85(49) 13,3 und 18,8 t ha^{-1} und beim Weidenklon *Salix dasyclados* 9,2 t ha^{-1}. In den Böden der Kurzumtriebsplantage und der ehemaligen Kurzumtriebsplantage nach Rückführung in Ackerland variierten die Konzentrationen an pflanzenverfügbarem P, K und Mg signifikant in Abhängigkeit von der Bodentiefe. In den Oberböden (0–30 cm) unter Kurzumtriebsplantage waren die P- und Mg-Gehalte signifikant geringer sowie die K-Gehalte signifikant höher als unter Acker. Die Ober- (0–30 cm) und Unterböden (30–90 cm) der Kurzumtriebsplantage sind durch schwache Versauerungstendenzen gekennzeichnet.

Schlagwörter: Kurzumtriebswirtschaft, Pappeln, Weiden, Erträge, pflanzenverfügbare Nährstoffe.

2011) und die Sanierung kontaminierter Böden und Wässer (PERTTU, 1998, MIRCK et al., 2005).

Das Potenzial von Kurzumtriebsplantagen zur C-Sequestrierung und deren Abhängigkeit von den standörtlichen Ausgangsbedingungen, dem Alter der Bäume, der analysierten Bodentiefe und dem Bewirtschaftungsregime wurde von zahlreichen Autoren untersucht (HANSEN, 1993, GRIGAL & BERGUSON, 1998, MANN & TOLBERT, 2000, PACALDO et al., 2013). Mehrfach wurden Akkumulationen von organischem Kohlenstoff im Oberboden festgestellt und mit dem Anfall der Laub- und Wurzelstreu sowie der ausbleibenden Bodenbearbeitung begründet (GARTEN, 2002, BAUM et al., 2009, BENE et al., 2011). Darüber hinaus wurden zunehmende Differenzierungen des ursprünglich homogen ausgebildeten Oberbodenhorizontes und tiefenabhängige Verteilungsmuster der C- und N-Gehalte beobachtet (JUG et al., 1999a).

Die Entwicklung des Versorgungszustandes der Böden von Kurzumtriebsplantagen mit den Makronährelementen Phosphor, Kalium und Magesium bei Düngungsverzicht wurde bisher nur in Teilaspekten untersucht, obwohl dem Düngungsverzicht ökologisch eine bedeutsame Rolle zukommt und die Nährstoffversorgung eine wesentliche Kontrollgröße der Biomasseproduktion darstellt. Fallstudien aus Regionen mit subkontinentalen und mediterranen Bedingungen gehen davon aus, dass die Bäume auch bei fehlender Düngung ausreichend mit Nährstoffen versorgt sind und begründen dies mit der guten Nährstoffausstattung der vormals ackerbaulich genutzten Böden (PETZOLD et al., 2010, BENE et al., 2011). Weitgehend ungeklärt ist die Frage, wie sich die Makronährstoffgehalte des Bodens bei mehrjähriger Kurzumtriebswirtschaft entwickeln, wie die Nährstoffreserven vormaliger Ackerböden genutzt werden und wie sich die vertikale Verteilung der Nährstoffkonzentrationen im Boden darstellt. Informationsbedarf gibt es auch hinsichtlich der Auswirkungen des Umbruchs von Kurzumtriebsplantagen und der Rückführung zum Anbau annueller Kulturen auf die Nährstoffverfügbarkeit in den Böden (TOENSHOFF et al., 2013).

In der vorliegenden Untersuchung sollen anhand einer 18-jährigen Kurzumtriebsplantage in Nordostdeutschland der Nährstoffentzug in Abhängigkeit von der Ertragsentwicklung schnellwachsender Bäume verfolgt und die Gehalte und Vorräte an pflanzenverfügbarem Phosphor (P), Kalium (K) und Magnesium (Mg) sowie die pH-Werte im Boden unter Kurzumtriebsplantage (KUP), Umbruch vormaliger KUP (UM) und Ackernutzung (AL) bodentiefenabhängig geprüft werden.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsstandort und Probenahme

Der Standort Gülzow (53°49‘20“ N, 12°04‘05“ E) liegt in Nordostdeutschland und ist charakterisiert durch eine Jahresdurchschnittstemperatur von 8,6 °C und eine Jahresniederschlagsmenge von 578 mm (1980–2011). Auf glazigenen Sedimenten haben sich vorrangig Braunerden entwickelt. Die Korngrößenzusammensetzung des Oberbodens ist sandig, gekennzeichnet durch 70,6 % Sand, 23,8 % Schluff und 5,6 % Ton. Die Gehalte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg, bestimmt nach dem Doppellaktatverfahren, betragen im Oberboden 66 mg g^{-1} P, 151 mg g^{-1} K und 26 mg g^{-1} Mg. Entsprechend dem deutschen System der Nährstoffgehaltsklassen „gering“, „mittel“, „optimal“, „hoch“ und „sehr hoch“ erweist sich die Versorgung mit Mg und P als optimal und die K-Versorgung als hoch.

Die KUP Gülzow wurde 1993 auf einer bis zu diesem Termin ackerbaulich genutzten Fläche begründet. Etabliert wurde eine randomisierte Blockanlage mit 3 Wiederholungen. Je Block wurden 28 Pappel- und Weidenklone in jeweils 3 Reihen im Abstand von 1,50 m × 0,50 m gepflanzt. Die Parzellengröße betrug jeweils 135 m^2, die Pflanzdichte lag bei 13,330 Stck. pro Hektar (Details siehe BOELCKE & KAHLE, 2000). Bislang wurde weder gedüngt, noch kamen Pflanzenschutzmittel oder Beregnung zum Einsatz. Die Ernten des 3-jährigen Umtriebs fanden jeweils im Winter (Januar oder Februar) 1996, 1999, 2002, 2005 und 2008 und 2011 statt.

Im März 2010 wurde ein Block der KUP nach 17-jähriger Bewirtschaftung umgebrochen und in annuelle Bewirtschaftung überführt. Als Nachfrüchte wurden Sommergerste (2010) und Feldgras (2010, 2011) angebaut und mit 120 kg ha^{-1} N bzw. 90 kg ha^{-1} N gedüngt.

Als Referenz diente eine angrenzende konventionell bewirtschaftete Ackerfläche mit vergleichbaren Bodenverhältnissen. Die jährliche Düngung betrug hier 140–200 kg ha^{-1}N; P und K wurden jedes dritte Jahr gedüngt, zuletzt 2009 (35 kg ha^{-1} P, 166 kg ha^{-1} K, 18 kg ha^{-1} Mg). Seit 2010 werden die Umbruch- und Ackerflächen mit einheitlicher Fruchtfolge und Düngung bewirtschaftet.

Die anstehende Untersuchung der KUP- und der Umbruchvariante umfasst die Parzellen der beiden Pappelklone (*Populus nigra* × *maximowiczii* Klon Max 4 und *P. maximowiczii* × *trichocarpa* Klon 10/85(49)) und den Weidenklon (*Salix dasyclados*). Der Pappelklon 10/85 (49) ist mittlerweile unter dem Namen Matrix zugelassen.

2.2 Ertragserfassung und Bodenprobenahme

Die Erfassung des Biomasseertrages erfolgte im Winter 2011 im laublosen Zustand exemplarisch für die Mittelreihen der Parzellen mit anschließender Kalkulation der Biomasseproduktion pro ha. Für die Bestimmung des Wassergehalts und der pflanzlichen Inhaltsstoffe wurden Teilproben der Holzbiomasse aus Trieben mittleren Durchmessers entnommen. Von diesen wurden repräsentative Abschnitte aus dem unteren, mittleren und oberen Drittel für die Trockensubstanzbestimmung entnommen und gehäckselt. Die Trocknung der jeweils ca. 1 kg FM umfassenden Probe erfolgte bei 65 °C bis zur Gewichtskonstanz.

Die Darstellung der Ertragsentwicklung erfolgt unter Einbezug der Daten vorhergehender Untersuchungen an diesem Standort (GURGEL, 2013).

Für die Bodenuntersuchungen wurden die Managementvarianten KUP, die ehemaligen Parzellen dieser Klone der Umbruchvariante (UM) und die Referenzvariante Ackerland (AL) ausgewählt. Die Bodenproben wurden im Februar 2011 mittels eines von Schlepperhydraulik getriebenen Bohrstockes über den Tiefenbereich 0–90 cm in jeweils 5 Wiederholungen pro Parzelle entnommen. Zur Untersuchung der vertikalen Differenzierung wurden die Bodenproben in jeweils 10 cm Sektionen unterteilt. Die Bodenproben wurden luftgetrocknet und gesiebt (< 2 mm).

2.3 Chemische Analysen und Kalkulationen

Die aufbereiteten Biomasseproben wurden gemahlen und mittels Röntgenfluoreszenzanalyse auf die Elemente P, K und Mg untersucht (VDLUFA, 1997).

Die Konzentrationen des Bodens an pflanzenverfügbarem P, K und Mg wurden im Doppellaktextrakt (VDLUFA, 1997) photometrisch bzw. mittels ICP bestimmt. Der pH-Wert wurde elektrometrisch in 0,01 M $CaCl_2$-Lösung erfasst.

Der Entzug der Nährelemente P, K und Mg wurde aus der Kombination von Ertrag und den Konzentrationen in der geernteten Biomasse wie folgt berechnet:

Nährstoffentzug (kg ha^{-1}) = Biomasse (t TM ha^{-1}) × Nährelementkonzentration (mg g^{-1} TM).

Die Kalkulation der Nährstoffvorräte im Boden erfolgte für die obersten drei Bodensegmente und gesamt für den Oberboden (0–30 cm) nach folgender Formel:

Nährstoffvorrat (kg ha^{-1}) = Nährelementkonzentration (g 100 g^{-1} Boden) × Trockenrohdichte (g cm^{-3}) × Bodentiefe (cm) × 1000

Zur Bestimmung der Trockenrohdichte wurden je 4 Stechzylinderproben (250 cm^3) pro Parzelle aus den Tiefenbereichen 0–10 cm, 10–20 cm und 20–30 cm entnommen.

Die Nährstoffkonzentrationen der Ober- (0–30 cm) und Unterböden (30–90 cm) der Managementvarianten KUP, UM und AL wurden varianzanalytisch verrechnet und die Unterschiede mittels t-Test geprüft.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Erträge und Ertragsentwicklung

Nach 18-jähriger Kurzumtriebswirtschaft betrug der mittlere jährliche Ertragszuwachs 18,8 t ha^{-1} Holztrockenmasse bei dem Pappelklon 10/85(49), 13,3 t ha^{-1} bei dem Pappelklon Max4 und 9,2 t ha^{-1} bei dem Weidenklon *S. dasyclados*.

Über den Versuchszeitraum 1996–2011 diffenzierte sich die Ertragsentwicklung klonspezifisch (Abb. 1). Die Pappelklone zeigten ein vergleichsweise höheres Niveau und eine stärkere Dynamik der Erträge als der Weidenklon. Den höchsten Ertragszuwachs hatten die Pappelklone zu den Ernten 2002 und 2008.

Der jährliche mittlere Höchstertrag der Pappelklone betrug 23,7 t ha^{-1} (2002) bzw. des Weidenklons 12,6 t ha^{-1} (2005). HOFMANN-SCHIELLE et al. (1999) ermittelten Biomasseerträge von 10–37 t ha^{-1} nach der ersten 5-jährigen Rotation mit Pappeln und Weiden und hoben die entscheidende Bedeutung der Standortverhältnisse für die Ertragsleistung der schnellwachsenden Baumarten hervor. MAKESCHIN et al. (1989) rechneten nach einer Begründungsphase mit geringer Wuchsleistung (5–6 t ha^{-1}) mit einem Ertragsniveau der Bäume von 12–15 t ha^{-1} pro Jahr. Böden des Lausitzer Braunkohlerevieres lieferten im Vergleich zu den vormals ackerbaulich genutzten Böden deutlich geringere Biomasseerträge mit Pappelklonen (3–6,1 t ha^{-1}) pro Jahr (BUNGART &HÜTTL, 2004).

Der Ertragszuwachs der Pappelklone über die ersten Umtriebe ist auf die Zunahme der Bestockung zurückzuführen. Durch den Wiederaustrieb entwickeln sich zunächst 4–5 Triebe je Pflanzstelle, die sich bis zur Ernte infolge intraspezifischer Konkurrenz auf 3–4 ertragswirksame Triebe bei 3-jähriger Rotation reduzieren. Da die Weidenklone

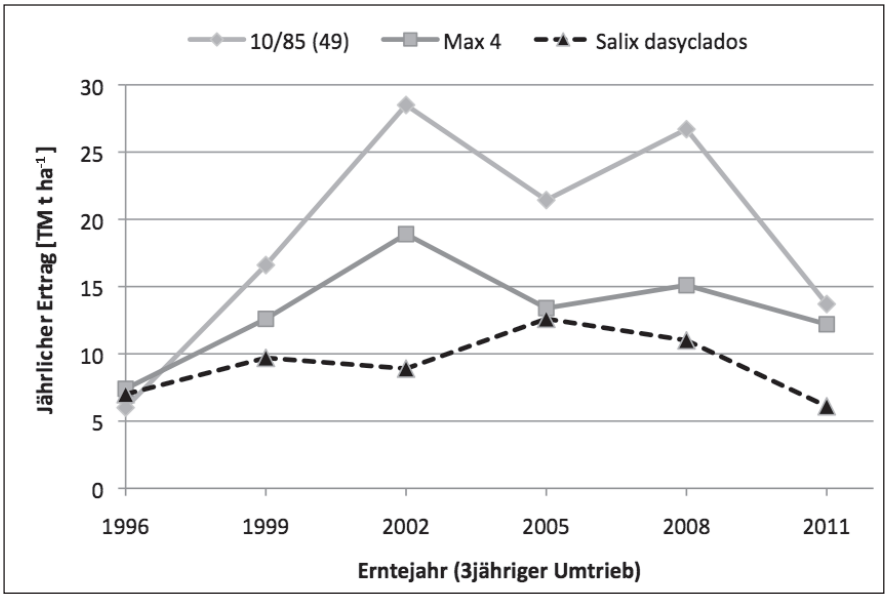

Abbildung 1: Biomasseertrag von Pappel- und Weidenklonen nach 3-jährigem Umtrieb am Standort Gülzow
Figure 1: Biomass production of poplar and willow clones after 3 year-rotation at site Gülzow

bereits im Pflanzjahr mehrtriebig wachsen, fällt der Ertragszuwachs nach der ersten Ernte im Vergleich zu den Pappelklonen geringer aus (BOELCKE & KAHLE, 2008).

Der Ertragsrückgang bei den Pappelklonen im Zeitraum 2002–2005 ist bedingt durch die geringe Niederschlagsmenge in dieser Periode (BOELCKE & KAHLE, 2008). Über Ertragsverluste bei schnellwachsenden Baumarten aufgrund ungünstiger Witterung sowie unzureichender Versorgung mit pflanzenverfügbarem Wasser und/oder Sauerstoff berichten auch HOFMANN-SCHIELLE et al. (1999) und BUNGART & HÜTTL (2004).

Die Ernteergebnisse aus dem Jahr 2011 lassen sowohl bei den Pappelklonen als auch beim Weidenklon einen deutlichen Ertragsrückgang erkennen. Dieser Effekt, der auch für andere Klone des Gülzower Sortiments festgestellt wurde (GURGEL, 2013), könnte im Zusammenhang mit den zunehmenden Ausfällen infolge von Krankheitsdruck (Blattrost bei Pappeln) und Schädlingsbefall (Moschusbock bei Weiden) stehen und als erster Hinweis für den Abschluss der optimalen Nutzungsdauer der KUP gewertet werden. Zudem ist die Schwächung der Stöcke durch die wiederholten Ernten als eine weitere Ursache für Ausfälle anzusehen.

Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass das Ertragsniveau der schnellwachsenden Bäume maßgeblich durch die Baumart, die Klonspezifik und das Alter der Wurzelstöcke bestimmt wird (HOFMANN-SCHIELLE et al., 1999). Darüber hinaus sind die Einflüsse des Standorts und der Umtriebszeit entscheidend (BOELCKE & KAHLE, 2008).

3.2 Nährelementkonzentrationen in der Biomasse

Die mittleren Nährelementkonzentrationen (mg g^{-1}) der Pappelklone betrugen 0,85 P, 1,90 K und 0,65 Mg bzw. 1,20 P, 2,25 K und 0,75 Mg für den Weidenklon (Tabelle 1). Pappelklone und Weidenklon weisen somit weitgehend übereinstimmende Nährelementkonzentrationen in der Biomasse auf. Beim Vergleich der Konzentrationsangaben mit Referenzwerten aus der Literatur (Tabelle 1) scheinen die K-Konzentrationen der Biomasse aus Gülzow etwas geringer und die Mg-Gehalte etwas erhöht. Dieser Fakt könnte durch die spezifische Nährstoffsituation am Standort Gülzow bedingt sein.

Bei Pappeln weisen die Blätter verbreitet die höchsten Konzentrationen an P, K und Mg auf, während unter den verholzten Biomassekompartimenten, die Äste als besonders nährstoffreich gelten (PETZOLD et al., 2010). Die Blattkonzentrationen der Nährelemente haben sich als Indikator der Nährstoffversorgung der Bäume bewährt (BUNGART & HÜTTL, 2004, JUG et al., 1999b).

3.3 Nährstoffentzug mit der Ernte der Bäume

Der Nährstoffentzug mit dem Erntegut wurde anhand der Elementkonzentrationen in der Biomasse und der Erntemenge kalkuliert (Tabelle 2).

Tabelle 1: KUP Gülzow: Nährelementkonzentrationen der Biomasse (Sprosse ohne Blätter) nach 18jähriger Standdauer der Stöcke und 3-jähriger Rotation der Bäume und Referenzwerte aus der Literatur
Table 1: SRC Gülzow: nutrient concentrations in dry woody biomass after 3year- rotation at 18 years old root systems of fast growing trees and reference data from literature

	Nährelementkonzentration [mg g^{-1}]			
Klon	P	K	Mg	
10/85 (49)	0,8	1,6	0,7	
Max 4	0,9	2,2	0,6	
Salix dasyclados	1,2	2,3	0,8	
Klon/Baumart	Referenzwerte [mg g^{-1}]			Quelle
Muhle Larsen	0,9	3,0	0,4	JUG et al. (1999b)
Salix viminalis	0,8	2,2	0,4	
Max1	0,4	2,3	0,4	PETZOLD et al. (2010)
Pappeln	1,1	3,3	0,8	AUTORENKOLLEKTIV (2006)
Weiden	0,9	2,4	0,7	
Muhle Larsen	1,0	3,7	0,5	SCHWARZE, RÖHRICHT (2006)
Max1	1,1	4,3	0,6	
Max3	1,0	4,7	0,6	
Beaupre	1,1	3,7	0,6	
Zieverich	0,8	2,4	0,5	

Tabelle 2: KUP Gülzow: Nährstoffentzug über die Ernte nach 3-jähriger Umtriebszeit (Ernte Winter 2011)
Table 2: SRC Gülzow: Nutrient removal through harvesting of biomass after 3year rotation (in winter 2011)

	Nährstoffentzug [kg ha^{-1}]		
Klon	P	K	Mg
10/85 (49)	11,0	22,0	9,6
Max 4	11,0	26,9	7,3
Salix dasyclados	7,3	13,7	4,6

Die Nährstoffentzüge durch die Ernte der Biomasse erreichten folgende Spannweiten: 7,3–11,0 (P), 13,7–26,9 (K) und 4,6–9,6 (Mg) kg ha^{-1}. Damit werden Angaben von BOELCKE & KAHLE (2008) nach 12-jährigem Kurzumtrieb von Pappeln und Weiden in Nordostdeutschland (6–29 kg (P) bzw. 16–88 (K) kg ha^{-1} K), ADEGBIDI et al. (2001) an Pappel-und Weidenpflanzungen in USA (10–11 (P), 27–32 (K), 4–5 (Mg) kg ha^{-1}, JUG et al. (1999b) an Pappeln und Weiden nach 5-jähriger Rotation an verschiedenen Standorten in Mittel- und Süddeutschland (6 (P) und 24 (K), 3 (Mg) kg ha^{-1}) und ENGLISCH et al. (2009) nach 10-jähriger Standzeit von Pappeln vergleichbarer Wuchsleistung in Österreich (6 (P), 25 (K), 7 (Mg) kg ha^{-1}) bestätigt.

Bezogen auf die Versuchsperiode von 1996–2011 variieren die jährlichen Nährstoffentzüge wie folgt: 4,8–21,4 (P), 9,6–45,6 (K) und 4,2–20,0 (Mg) kg ha^{-1}. Bis zur Ernte 2008 konnten diese Nährstoffentzüge offenbar über die Nährstofffreisetzung aus den Bodenvorräten kompensiert werden. Darauf deuten die über Jahre hohen Erträge der Bäume hin (BOELCKE & KAHLE, 2008). Neben dem Ertragsniveau bestimmen auch die Bestandesdichte, die Rotationszeit, die Klonspezifik und das Management die Höhe der Nährstoffentzüge (ADEGBIDI et al., 2001, PETZOLD et al., 2010).

3.4 Nährelementkonzentrationen und pH-Werte des Bodens in Abhängigkeit von der Managementvariante und Bodentiefe

Die Verteilung der Nährelemente P, K, Mg im Boden unter den Managementvarianten KUP, UM und AL wird nach Tiefenstufen differenziert dargestellt und nach Ober- (0–30 cm) und Unterboden (30–90 cm Bodentiefe) zusammengefasst (Abb. 2, Tabelle 3).

Beurteilt nach dem System zur Nährstoffbewertung in der landwirtschaftlichen Praxis (SCHWEDER et al., 2004) weisen die Oberböden mittlere (Variante KUP), hohe (Va-

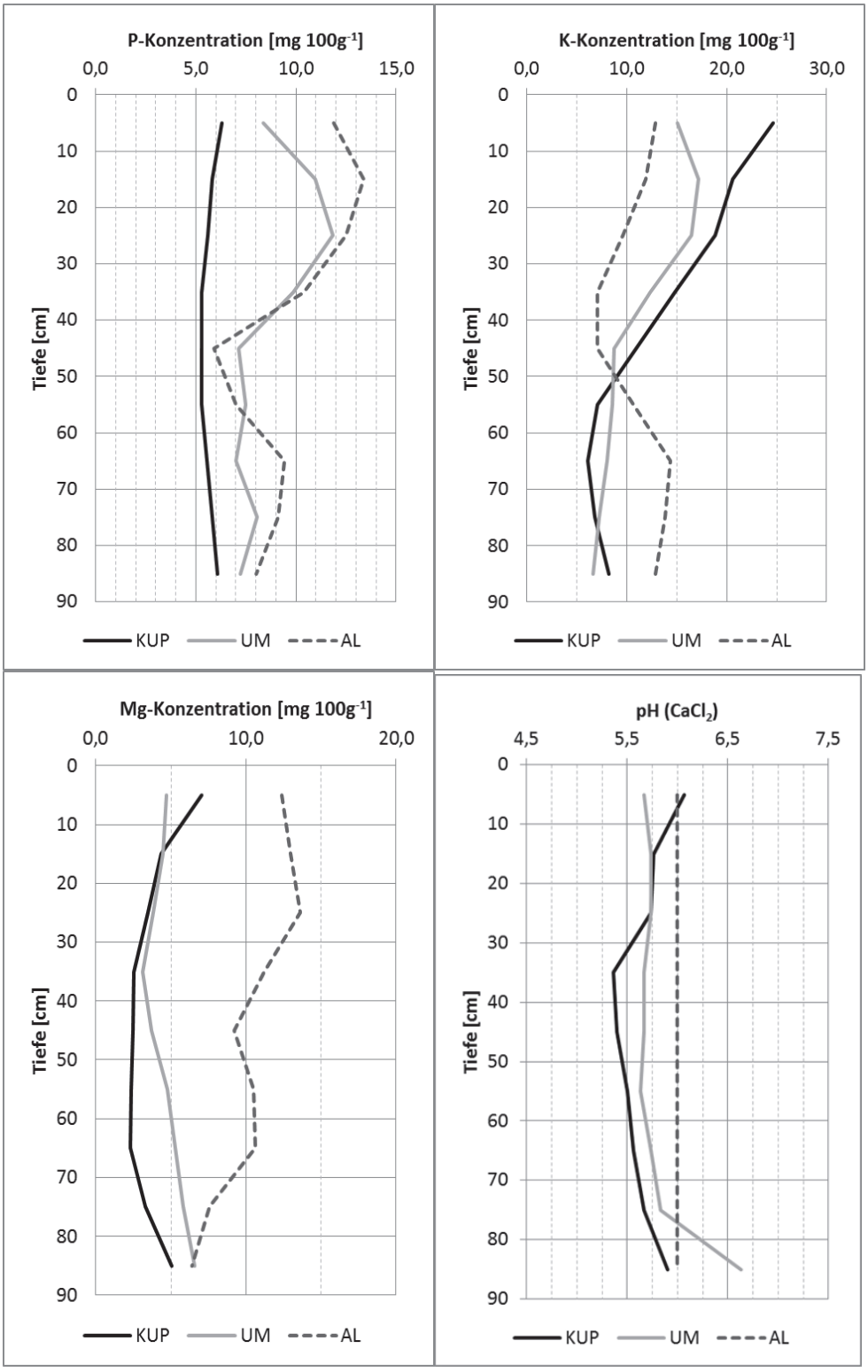

Abbildung 2: Vertikale Verteilung der Konzentrationen von P, K, Mg sowie der pH-Werte in den Böden unter den Managementvarianten Kurzumtriebsplantage (KUP), Umbruch (UM) und Ackerland (AL) im Tiefenbereich 0–90 cm am Standort Gülzow (Winter 2011)

Figure 2: Vertical distribution of the concentrations of P, K, Mg and of the pH value in the soil under short rotation coppice (KUP), former short rotation coppice (UM) and an arable annually tilled treatment (AL) in 0–90 cm soil depth at site Gülzow (winter 2011)

Tabelle 3 : Konzentrationen an pflanzenverfügbarem P, K, Mg und pH-Werte (Mittelwerte und Standardabweichung) in Böden unter Kurzumtriebsplantage (KUP), Umbruch (UM) und Acker (AL) in 0–30 cm (Oberboden) und 30–90 cm (Unterboden) am Standort Gülzow (Winter 2011)

Table 3: Concentration of plant-available P, K and Mg and pH value (means, standard deviation) in soils under short rotation coppice (KUP), former short rotation coppice (UM) and arable annually tilled soil (AL) in 0–30 cm (topsoil) and 30–90 cm (subsoil) soil depth at the site Gülzow (winter 2011)

Tiefe	Variante	P	*	K	*	Mg	*	pH	*
		mg 100 g^{-1}		mg 100 g^{-1}		mg 100g^{-1}			
0–30cm	KUP	5,6 ± 0,8	A	21,4 ± 2,0	A	5,0 ± 0,1	A	5,7 ± 0,48	A
	UM	10,4 ± 1,0	B	16,2 ± 0,8	B	4,3 ± 0,3	A	5,7 ± 0,12	A
	AL	12,6 ± 0,4	C	11,5 ± 0,9	C	13,0 ± 0,3	B	6,0 ± 0,0	A
30–90cm	KUP	4,0 ± 0,7	A	9,0 ± 1,7	A	3,0 ± 0,9	A	5,6 ± 0,34	A
	UM	7,8 ± 1,3	B	8,6 ± 1,5	AB	4,9 ± 0,8	A	5,9 ± 0,15	AB
	AL	8,3 ± 0,8	B	11,0 ± 1,6	B	9,3 ± 0,9	B	6,0 ± 0,0	B

* unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Differenzen zwischen den Varianten innerhalb des Ober-bzw. Unterbodens

riante Umbruch) bzw. sehr hohe P-Versorgung (Variante Acker) auf. Die P-Konzentrationen des Bodens unter KUP sind über das gesamte Tiefenprofil signifikant geringer unter AL. Das bedeutet, dass die Düngung den P-Status stärker beeinflusst als die auf der Fläche verbleibende Laub- und Wurzelstreu der Bäume. Unterstützt wird dieser Effekt durch die vergleichsweise geringen P-Gehalte der verschiedenen Biomassekompartimente der Bäume (Petzold et al., 2010). Über abnehmende Gehalte an Gesamt-P und an extrahierbarem P in Böden nach Aufforstung mit Kiefern berichten auch Smal & Olszewska (2008).

Die P-Gehalte des Bodens unter UM sind signifikant höher als unter KUP und zumeist geringer als unter AL. Bemerkenswert ist die hohe Übereinstimmung der P-Tiefenverteilung in den Varianten UM und AL. Ein Jahr nach dem Umbruch besitzen die Böden der vormaligen KUP bereits stärkere Übereinstimmungen in den untersuchten Parametern mit der Variante AL als mit der Variante KUP. Die Ursache hierfür wird in der einjährigen einheitlichen Bewirtschaftung dieser beider Varianten liegen.

Betrachtet man die Tiefenverteilung, so wurden die vergleichsweise höchsten P-Konzentrationen jeweils im Oberboden (0–30 cm) gemessen. Die höheren P-Konzentrationen unter UM gegenüber KUP wurden offenbar durch die P-Freisetzung aus den Biomasserückständen der Bäume und des Ackergrases verursacht.

Die K-Versorgung der Oberböden erweist sich in den Varianten Umbruch und Acker als hoch und in der Variante KUP als sehr hoch (Schweder et al., 2004). Dieser Befund kann als Folge der (vorangegangenen) intensiven landwirtschaftlichen Nutzung interpretiert werden. Darüber hinaus ist die Dominanz des Tonminerals Illit in der Tonfraktion jungpleistozänen Böden und das daraus resultierende K- Freisetzungspotenzial zu berücksichtigen, insbesondere in den biologisch aktiveren Oberböden (Blume et al., 2010).

Die vertikale Verteilung von K im Bodenprofil unterscheidet sich wesentlich von der Verteilung des Phosphors. Die höchsten K-Konzentrationen wurden in der Variante KUP im Tiefenbereich 0–30 cm gemessen, während in tiefergelegenen Schichten deutlich geringere K-Konzentrationen vorlagen. Im Boden unter UM folgt die Verteilung der K-Konzentrationen weitgehend dem Gradienten unter KUP, während sich die Ackerböden durch vergleichsweise geringere K-Gehalte im Oberboden und höhere K-Gehalte im Unterboden auszeichnen. Die Ursache hierfür könnte im hohen K-Bedarf des Ackergrases liegen.

Die signifikant höheren K-Konzentrationen in den Oberböden der Variante KUP gegenüber denen der Varianten UM und AL und die zunehmende K-Ausschöpfung im Unterboden könnten durch die vergleichsweise hohen K-Konzentrationen der Pappelblätter (Petzold et al., 2010; Bungart & Hüttl, 2004) und die hohen Laubstreumengen von 1–3 t ha^{-1} pro Jahr bedingt sein, die bei der Ernte im laublosen Zustand auf der Fläche verbleiben und die Nährstoffkonservierung im Boden befördern (Jug et al., 1999a). Das spricht für Translokationsprozesse innerhalb des Bodens, wodurch Kalium über die Baumwurzeln aus dem Un-

terboden aufgenommen wird, von dort in die Pflanze gelangt und letztlich mit dem Laubfall in den Oberboden überführt wird.

Das annähernd übereinstimmende Verteilungsmuster der K-Konzentrationen im Boden unter den Varianten KUP und UM ist mit dem erst kürzlich vorgenommenen Landnutzungswechsel zu begründen. Offenbar hat die langjährige Kurzumtriebswirtschaft die K-Verhältnisse im Boden nachhaltig geprägt und den Umbrucheffekt bislang überlagert.

Die Mg-Versorgung der Oberböden erweist sich als mittel (Variante KUP), niedrig (Variante Umbruch) bzw. hoch (Variante Acker). Die Mg-Konzentrationen der Böden der Varianten KUP und Umbruch sind sowohl im Ober- als auch im Unterboden signifikant geringer als die der Ackerböden. In den Varianten KUP und UM scheinen die Mg-Reserven nach langjähriger Kurzumtriebswirtschaft weitgehend erschöpft. Diesen Zustand vermag auch die Mg-Zufuhr über die Biomassekompartimente der Bäume nicht zu ändern, da sowohl die Blätter, als auch Zweige, Äste, Derbholz und Wurzelfraktionen nur geringe Mg-Konzentrationen aufweisen (Petzold et al., 2010). Die Tendenz zur Mg-Verarmung wird zudem durch den geringen Mg-Versorgungsgrad der Böden zum Zeitpunkt der KUP-Begründung (Boelcke & Kahle, 2000), die regelmäßige Mg-Abfuhr mit der Ernte und die ausbleibende Düngung befördert.

In der Literatur wird der Einfluss der Aufforstung auf den Nährstoffhaushalt des Bodens häufig anhand der Belegung der Austauscherplätze an den Bodenkolloiden betrachtet. Die vorliegenden Angaben zur Beeinflussung der Zusammensetzung des Kationenbelages sind indifferent. Während Alriksson & Olsson (1995) unter Fichten und Petzold et al. (2010) unter Pappeln abnehmende Gehalte an Ca, Mg und K feststellten, berichten Olzewska & Smal (2008) über zunehmende Gehalte an Ca, Mg und K nach Aufforstung mit Kiefern sowie Jug et al. (1999a) über zunehmende Ca- und abnehmende Mg-Gehalte nach Kurzumtriebswirtschaft mit Pappeln und Weiden. Damit werden die wesentliche Bedeutung der standortspezifischen Bedingungen hinsichtlich Geogenese und räumlicher Heterogenität sowie die managementspezifische Wirkung auf den bodenökologischen Zustand unterstrichen.

Betrachtet man die Entwicklung der Nährstoffgehalte des Bodens über die Zeit, so haben die P- und Mg-Gehalte nach 18-jähriger Bewirtschaftung im Kurzumtrieb abgenommen, insbesondere im Oberboden, während die K-Gehalte der Varianten KUP und UM gegenüber Ackerland signifikant zugenommen haben.

Die mittleren pH-Werte der Oberböden der Varianten KUP (pH 5,7) und Umbruch (pH 5,7) waren tendenziell, jedoch nicht signifikant, geringerer als die pH-Werte der Oberböden unter Acker (pH 6,0) (Tabelle 3). Im Unterboden setzt sich dieser Trend fort. Hier beträgt der pH-Wert-Unterschied zwischen KUP (pH 5,6) und AL (pH 6,0) 0,4 pH-Einheiten und ist signifikant. Die Oberböden (0–30 cm) der Varianten UM und AL weisen aufgrund der Bodenbearbeitung einheitliche pH-Werte auf (Abb. 2). Im Tiefenbereich 30–90 cm zeigten sich variantenabhängige Unterschiede. Dabei rangieren die pH-Werte des Bodens der Variante UM zwischen denen der Varianten KUP und AL und zeichnen den Tiefengradienten dieses Parameters unter der Variante KUP in abgeschwächter Form nach. In den Varianten KUP und UM steigen die pH-Werte ab 80 cm Tiefe an, was durch punktuelle Durchragungen des anstehenden Geschiebemergels begründet sein könnte (Abb. 2).

Versauerungstendenzen nach Aufforstung vormaliger Ackerböden sind typisch und in der Literatur mehrfach beschrieben (Alrikkson & Olsson, 1995, Jug et al., 1999a, Smal & Olszewska, 2008, Petzold et al., 2010). Als Ursachen kommen natürliche Prozesse, wie die Mineralisierung der organischen Substanz, die Entstehung organischer Säuren und deren vertikale Verlagerung im Boden in Frage. Ein weiterer Aspekt ist die H^+-Freisetzung bei Nährstoffaufnahme an der Wurzel, obwohl ein Großteil der aufgenommenen basisch wirksamen Kationen letztlich mit der Laub- und Wurzelstreu wieder dem Boden zugeführt wird. Die Böden am Standort Gülzow neigen aufgrund der sauren Reaktionsbedingungen und der unzureichenden Puffermöglichkeiten (Abwesenheit von $CaCO_3$) ohnehin zur Versauerung (Boelcke & Kahle, 2008).

3.5 Vorräte an P, K und Mg im Boden unter verschiedenen Managementvarianten

Die Verteilung der Nährstoffvorräte innerhalb des Oberbodens der Managementvarianten KUP, Umbruch und Ackerland wird in Abb. 3 veranschaulicht. Darin treten die vergleichsweise hohen K-Vorräte der Varianten KUP (873 kg ha^{-1}) und UM (766 kg ha^{-1}) gegenüber AL (564 kg ha^{-1}) deutlich hervor. Weitere Differenzierungen ergeben sich hinsichtlich der Mg-Vorräte, die bei KUP (198 kg ha^{-1}) und Umbruch (202 kg ha^{-1}) niedriger ausfallen als bei AL (608 kg ha^{-1}). Die P-Vorräte lassen sich in der Reihe KUP (230 kg ha^{-1}) < UM (488 kg ha^{-1}) < AL (568 kg ha^{-1}) anordnen und unterscheiden sich signifikant.

Bei der Interpretation dieser Ergebnisse sind die in die Kalkulation der Nährstoffvorräte eingehenden Trockenrohdichten zu berücksichtigen. Im Einzelfall kann es vorkommen, dass erhöhte Nährstoffkonzentrationen mit verringerten Nährstoffvorräten einhergehen. Ursache hierfür sind die aus der Akkumulation organischer Substanzen resultierenden reduzierten Trockenrohdichten nach langjähriger Kurzumtriebswirtschaft. Über abnehmende Trockenrohdichten nach Aufforstung vormaliger Ackerböden mit Aspen, Birken, Fichten und Kiefern berichten auch Messing et al. (1997), Wall & Hytönen (2005) und Olszewska &Smal (2008). Am Standort Gülzow betrugen die mittleren Trockenrohdichten in 0–10 cm Bodentiefe 1,22 g cm^{-3} (KUP), 1,49 g cm^{-3} (UM) und 1,61 g cm^{-3} (AL). Unabhängig davon zeichnete sich in den geprüften Managementvarianten eine zunehmende Dichtlagerung mit der Bodentiefe ab, erklärlich aus der wachsenden Auflast.

Zur Abschätzung der Nachhaltigkeit der Nährstoffversorgung bei Kurzumtriebswirtschaft wurde ein vereinfachter Ansatz nach Englisch & Reiter (2009) herangezogen, wobei die Nährstoffmenge, die bei Vollbaumnutzung über die Ernte abtransportiert wird, dem Nährstoffvorrat an P, K und Mg des Bodens (0–30 cm) gegenüber gestellt wird. Die Nachlieferung über die Verwitterung und die atmosphärischen Einträge, die Nährstoffverluste über Auswaschung und die Stofffreisetzung über Mineralisierung der Laub- und Wurzelstreu bleiben dabei unberücksichtigt. Der Entzug der geprüften Nährstoffe betrug im Jahr 2011 2–5 % der Bodenvorräte. Aus Sicht der Nährstoffversorgung des Bodens kann die Kurzumtriebswirtschaft am Standort Gülzow demnach als nachhaltige Bewirtschaftungsform eingestuft werden.

4 Schlussfolgerungen

Die an einem Standort mit guter Nährstoffversorgung angebauten Pappelklone *Populus nigra* × *maximowiczii* Klon Max 4 und P. *maximowiczii* × *trichocarpa* Klon 10/85(49) sowie der Weidenklon (*Salix dasyclados*) lieferten über 15 Jahre hohe Erträge. Die jährlichen Nährstoffentzüge von 4,8–21,4 (P), 9,6–45,6 (K) und 4,2–20,0 (Mg) kg ha^{-1} belegen eine langsame Abschöpfung der Nährstoffvorräte vormaliger Ackerböden. Nach 18-jähriger Standdauer der Stöcke deuten sich baumarten- und klonspezifische Ertragsrückgänge an, die als Hinweis für den Abschluss der optimalen Nutzungsdauer der KUP zu werten sind. Ursache hierfür könnte neben krankheitsbedingten Ausfällen die einsetzende Mg-Unterversorgung sein. Der Mg-Entzug sollte durch Düngung kompensiert und der pH-Wert stabilisiert werden, um die Produktivität der KUP sicherzustellen.

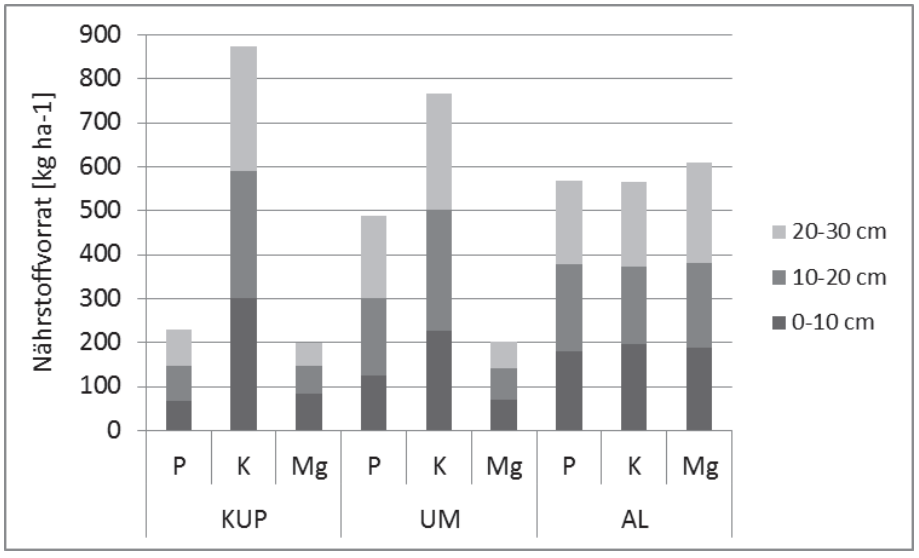

Abbildung 3: Vorräte an P, K, Mg im Oberboden (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm Bodentiefe) der Managementvarianten Kurzumtriebsplantage (KUP), Umbruch (UM) und Ackerland (AL) am Standort Gülzow (Winter 2011)

Figure 3: Stocks of P, K, Mg in the topsoil (0–10 cm, 10–20 cm, 20–30 cm soil depth) under short rotation coppice (KUP), former short rotation coppice (UM) and arable annually tilled treatment (AL) at the site Gülzow (winter 2011)

Die Umstellung der Landnutzung von einjährigen Ackerkulturen zu mehrjähriger Kurzumtriebswirtschaft und die Rückführung zum Anbau annueller Kulturen bewirkten standortspezifische Modifikationen hinsichtlich der Gehalte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg sowie hinsichtlich der pH-Werte. Im Boden unter KUP und Umbruch, jedoch nicht unter Acker, folgten die Konzentrationen aller untersuchten Stoffe einem deutlichen Tiefengradienten.

Künftige Untersuchungen sollten darauf gerichtet werden, die Auswirkungen von Nutzungsumstellungen unter verschiedenen Standortbedingungen zu prüfen, um die Mechanismen der Bodenveränderungen aufzuklären und KUP-bezogene Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt der Böden prognostizierbar zu machen.

Literatur

Adegbidi, H. G., T. A. Volk, E. H. White, L. Abrahamson, R. D. Briggs & D. H. Bickelhaupt (2001): Biomass and nutrient removal by willow clones in experimental bioenergy plantations in New York State. Biomass and Bioenergy 20: 399–411.

Alriksson, A., M. T. Olsson (1995): Soil changes in different age classes of Norway spruce (*Picea abies* L. (Karst.)) on afforested farmland. Plant and Soil 168, 103–110.

Aronsson, P. G., L. F. Bergström (2001): Nitrate leaching from lysimeter-grown short rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. Biomass and Bioenergy 21(3): 155–164.

Autorenkollektiv (2006): Anbauhinweise Pappeln und Weiden. In: KTBL (Hrsg.): KTBL-Datensammlung „Energiepflanzen", Darmstadt, 290–299.

Baum, C., P. Leinweber, M. Weih, N. Lamersdorf, I. Dimitriou (2009): Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. Landbauforschung Völkenrode 59: 183–196.

Bene, C., E. Pellegrino, C. Tozzini, E. Bonari (2011): Changes in soil quality following poplar short-rotation forestry under different cutting cycles. Italian Journal of Agronomy 6: 28–34.

Blume, H. P., G. W. Brümmer, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretzschmar, K. Stahr, B. M. Wilke (2010): Lehrbuch der Bodenkunde (Scheffer/Schachtschabel), Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg.

Boelcke, B. & P. Kahle (2000): Leistung schnell wachsender Baumarten im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Nutzflächen im Nordosten Deutschlands und erste Auswirkungen auf die Bodeneigenschaften. Die Holzzucht: 53, 5–10.

Boelcke, B. & P. Kahle (2008): Energieholzproduktion mit Weiden und Pappeln – Ertragsbildung und Grundnährstoffbedarf. Z. Pflanzenbauwissenschaften 12(2): 78–85.

Bungart, R., R. F. Hüttl (2004): Growth dynamics and biomass accumulation of 8–year-old hybrid poplar clones in a short-rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. European Journal of Forestry Res. 123: 105–115.

Dimitriou, I., C. Baum, S. Baum, G. Busch, U. Schulz, J. Köhn, N. Lamersdorf, P. Leinweber, P. Aronsson, M. Weih, G. Berndes, A. Bolte (2009): The impact of short rotation coppice (SRC) cultivation on the environment. Landbauforschung Völkenrode 59: 159–162.

Englisch, M., R. Reiter (2009): Standörtliche Nährstoff-Nachhaltigeit bei der Nutzung von Wald-Biomasse. BFW-Praxisinformation 18: 13–15.

Englisch, M., M. Wresowar, H. Spiegel, R. Reiter, K. Katzensteiner (2009): Energiewälder im Kurzumtrieb – Möglichkeiten und Grenzen. BFW-Praxisinformation 18: 15–17.

Garten, C. T. (2002): Soil carbon storage beneath recently established tree plantations in Tennessee and South Carolina, USA. Biomass and Bioenergy 23: 93–102.

Goodlass, G., M. Green, B. Hilton, MC Donouch (2007): Nitrate leaching from short rotation coppice. Soil Use and Management 23: 178–184.

Grigal, D. F., W. E. Berguson (1998): Soil carbon changes associated with short-rotation systems. Biomass Bioenergy 14: 371–377.

Gurgel, A. (2013): Ergebnisse der Versuche mit Schnellwachsenden Baumarten nach 18 Jahren Bewirtschaftung in Gülzow (Mecklenburg-Vorpommern). Gülzower Fachgespräche Band 43, Agrarholzkongress 19./20.2.2013, Berlin, Tagungsmaterial.

Hansen, E. A. (1993): Soil carbon sequestration beneath hybrid poplar plantations in the North United States. Biomass & Bioenergy 5 (6): 431–436.

Heller, M. C., G. A. Keoleian, T. A. Volk (2003): Life cycle assessment of a willow bioenergy cropping system. Biomass Bioenergy 25: 147–165.

Hofmann-Schielle, C., A. JUG, F. Makeschin, K. E. Rehfuss (1999): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the

Federal Republic of Germany. I. Site-growth relationships. Forest Ecology and Management 121: 41–55.

Jug, A., F. Makeschin, K. E. Rehfuss & C. Hoffmann-Schielle (1999a): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. III. Soil ecological effects. Forest Ecology and Management 121: 85–99.

Jug, A., C. Homann-Schielle, F. Makeschin, K. E. Rehfuss (1999b): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany. II. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. Forest Ecology and Management 121: 67–83.

Makeschin, F. (1994): Effects of energy forestry on soils. Biomass & Bioenergy, 6 (1/2): 63–79.

Makeschin, F., K. E. Rehfuss, I. Rüsch, R. Schörrry (1989): Anbau von Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb auf ehemaligem Acker: Standörtliche Voraussetzungen, Nährstoffversorgung, Wuchsleistung und bodenökologische Auswirkungen. Forstw. Cbl., 108: 125–143.

Mann, L., V. Tolbert (2000): Soil Sustainability in renewable biomass plantings. Ambio 29, 8: 492–498.

Messing, I., A. Alriksson, W. Johansson (1997): Soil physical properties of afforested and arable land. Soil Use and Management, 13: 209–217.

Mirck, J., J. G. Isebrands, T. Verwijst, S. Ledin (2005): Development of short-rotation willow coppice systems for environmental purposes in Sweden. Biomass & Bioenergy 28: 219–228.

Olszewska, M. & H. Smal (2008): The effect of afforestation with Scots pine (*Pinus silvestris* L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. I. Physical and sorptive properties. Plant and Soil, 305: 157–169.

Pacaldo, R. S., T. Volk, R. D. Briggs (2013): No significant differences in soil organic carbon contents along a chronosequence of shrub willow biomass crop fields. Biomass & Bioenergy 58: 136–142.

Perttu, K. I. (1998): Environmental justification for short rotation forestry in Sweden. Biomass and Bioenergy, 15: 1–6.

Petzold, R., B. Schubert, K. H. Feger (2010): Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in Sachsen (Deutschland). Die Bodenkultur, 61 (3): 23–35.

Petzold, R. K., K. Schwärzel, K. H. Feger (2011): Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in responses to climate and soil conditions. Eur. J. For. Res. 130: 695–706.

Rowe, R. L., N. R. Street, G. Taylor (2009): Identifying potential environmental impacts of large-scale deployment of dedicated bioenergy crops in the UK. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13: 271–290.

Scholz, V. G., M. Heiermann, J. Kern, A. Balasus (2011): Environmental impact of energy crop cultivation. Archives of Agronomy and Soil Sci., 57 (8): 805–837.

Schwarze, H., C. Röhricht (2006): Untersuchungen zum Pappel- und Weidenanbau im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen. (Hrsg.) Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Dresden-Pillnitz.

Schweder, P., H. E. Kape, B. Boelcke (2004): Düngung. Hinweise und Richtwerte für die landwirtschaftliche Praxis. Leitfaden zur Umsetzung der Düngeverordnung. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Schwerin.

Smal, H. & M. Olszewska (2008): The effect of afforestation with Scots pine (Pinus silvestris L.) of sandy post-arable soils on their selected properties. II: Reaction, carbon, nitrogen and phosphorus. Plant and Soil 305: 171–187.

Toenshoff, C., R. G. Joergensen, R. Stuelpnagel, C. Wachendorf (2013): Dynamics of soil oganic carbon fractions one year after the re-conversion of poplar and willow plantations to arable use and perennial grassland. Agriculture, Ecosystems and Environment 174: 21–27.

Vdlufa (1997): Handbuch der landwirtschaftlichen Versuchs- und Untersuchungsmethodik, Bd. 1, 4. Auflage. VDLUFA-Verlag, Darmstadt 12 pp.

Wall, A. & J. Hytönen (2005): Soil fertility of afforested arable land compared to continuously forested sites. Plant and Soil, 275 (1–2): 247–260.

Anschrift der Autoren

Dr. Petra Kahle, Universität Rostock, Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät, Justus-von-Liebig-Weg 6, D-18051 Rostock, Deutschland

Dr. Andreas Gurgel, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, Dorfplatz 1, D-18276 Gülzow-Prüzen, Deutschland