

## Standortsökologische Aspekte und Anbaupotenziale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades  
Doctor rerum silvaticarum (Dr. rer. silv.)

vorgelegt von  
**Dipl. Forstwirt Rainer Petzold**

Gutachter:

Herr Prof. Dr. Karl-Heinz Feger  
Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften

Herr Prof. Dr. Norbert Lamersdorf  
Georg-August-Universität Göttingen, Fakultät Forstwissenschaften und Waldökologie

Herr Prof. Dr. Albrecht Bemann  
Technische Universität Dresden, Fakultät Umweltwissenschaften

Dresden, 22.05.2013

Erklärung des Promovenden

Die Übereinstimmung dieses Exemplars mit dem Original der Dissertation zum Thema:

**„Standortsökologische Aspekte und Anbaupotenziale von Kurzumtriebsplantagen in Sachsen“**

wird hiermit bestätigt.

.....  
Ort, Datum

.....  
Unterschrift (Vorname Name)

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
1.1	Holz aus Kurzumtriebsplantagen – ein Baustein für die nachhaltige Energie- und Rohstoffversorgung? .....	1
1.2	Kurzumtriebsplantagen – Weiterentwicklung einer alten Idee.....	2
1.3	Begriffsklärung „Kurzumtriebsplantage“ .....	3
1.4	Aufbau und Gliederung der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Motivation und Zielstellung</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Überblick zur Pappelforschung und zu standortkundlichen Grundlagen von Kurzumtriebsplantagen</b> .....	<b>7</b>
3.1	Historische Entwicklung der Pappelforschung in Deutschland.....	7
3.2	Beispiele zur standortsökologischen Forschung auf KUP .....	10
3.3	Standörtliche Voraussetzungen und Potenziale für Kurzumtriebsplantagen.....	13
3.3.1	Bedeutung von Standortfaktoren.....	13
3.3.2	Standortsansprüche schnellwachsender Baumarten .....	14
3.3.2.1	Pappel ( <i>Populus ssp.</i> ).....	14
3.3.2.2	Weide ( <i>Salix ssp.</i> ).....	16
3.3.2.3	Robinie ( <i>Robinia pseudoacacia L.</i> ).....	17
3.3.2.4	Sonstige für den Kurzumtrieb geeignete Baumarten	18
3.3.3	Abschätzung von regionalen Standortpotenzialen .....	18
3.3.4	Zusammenfassung.....	20
3.3.5	Literatur .....	21
<b>4</b>	<b>Methodologie</b> .....	<b>23</b>
4.1	Vorbemerkung .....	23
4.2	Erhebung empirischer Daten für die Darstellung ökologischer Zusammenhänge auf Standortebene .....	23
4.2.1	Auswahl der Untersuchungsfläche.....	23
4.2.2	Messkonzept Wasserhaushalt .....	25
4.2.3	Messkonzept Stoffhaushalt .....	28
4.3	Prozessorientierte Modellierung des Wasserhaushalts.....	28
4.4	Entwicklung raumplanerischer Grundlagen für die Verknüpfung von Biomasseproduktion auf KUP mit Belangen des Natur- und Bodenschutzes .....	28

---

5	<b>Ergebnisse</b> .....	30
5.1	Empirische Befunde für die Darstellung ökologischer Zusammenhänge auf Standortebene .....	30
5.1.1	Transpiration einer Hybridpappel-Plantage in Sachsen in Abhängigkeit von Klima und Bodenbedingungen - Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions .....	30
5.1.1.1	Abstract.....	30
5.1.1.2	Introduction .....	31
5.1.1.3	Materials and methods.....	32
5.1.1.4	Results .....	37
5.1.1.5	Discussion.....	42
5.1.1.6	Conclusions .....	45
5.1.1.7	References.....	46
5.1.2	Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in Sachsen .....	50
5.1.2.1	Zusammenfassung .....	50
5.1.2.2	Einleitung und Zielsetzung.....	50
5.1.2.3	Material und Methoden .....	51
5.1.2.4	Ergebnisse und Diskussion.....	55
5.1.2.5	Schlussfolgerungen .....	64
5.1.2.6	Literatur.....	65
5.2	Prozessorientierte Modellierung des Wasserhaushalts.....	67
5.2.1	Parametrisierung, Prüfung der Modellstruktur und Unsicherheitsanalyse .....	67
5.2.1.1	Einleitung .....	67
5.2.1.2	Methoden .....	68
5.2.1.3	Ergebnisse .....	73
5.2.1.4	Diskussion.....	78
5.2.1.5	Schlussfolgerungen .....	79
5.2.1.6	Literatur.....	80
5.2.2	Modellgestützte Bewertung des Wasserhaushalts von KUP .....	82
5.2.2.1	Bedeutung und modellgestützte Bewertung .....	82
5.2.2.2	Bodenwasserdynamik, Wasserbilanz und Grundwasserneubildung .....	84
5.2.2.3	Literatur.....	88

---

5.3	Raumplanerische Grundlagen für die umweltgerechte Biomasseproduktion.....	90
5.3.1	Verknüpfung von Biomasseproduktion auf KUP mit Belangen des Natur- und Bodenschutzes – Linking biomass production in short rotation coppice with soil protection and nature conservation .....	90
5.3.1.1	Abstract.....	90
5.3.1.2	Introduction .....	90
5.3.1.3	Materials and methods.....	92
5.3.1.4	Results .....	97
5.3.1.5	Discussion.....	104
5.3.1.6	Conclusions .....	105
5.3.1.7	References.....	105
6	<b>Zusammenfassende Bewertung und Perspektiven</b> .....	109
7	<b>Zusammenfassung</b> .....	112
8	<b>Abstract</b> .....	114
9	<b>Literatur</b> .....	115

**Abbildungsverzeichnis**

Abb. 3.3.1-1: Ölpreisentwicklung 1970-2011 .....	9
Abb. 3.3.3-1: Klimatische Wasserbilanz während des Sommerhalbjahres .....	19
Abb. 4.2.1-1: Untersuchungsstandorte in Sachsen .....	24
Abb. 4.2.1-2: Luftbild der Pappelplantage in Methau II .....	25
Abb. 4.2.2-1: Versuchsaufbauten .....	26
Abb. 5.1.1-1: Distribution of tree diameters at breast height .....	33
Abb. 5.1.1-2: Time series of stand transpiration ( $T$ ), crop reference evaporation ( $ETP$ ), root extractable water ( $REW$ ), precipitation ( $P$ ), leaf area index ( $LAI$ ), soil temperature at 20 cm depth ( $T_s$ ), global radiation ( $RG$ ) and vapour pressure deficit ( $VPD$ ) in 2007 and 2008. ....	38
Abb. 5.1.1-3: Ratio of normalised Transpiration to crop reference Evapotranspiration.....	39
Abb. 5.1.1-4: Modelled vs. measured transpiration in 2007 .....	40
Abb. 5.1.1-5: Residuals (measured – modelled canopy transpiration).....	41
Abb. 5.1.1-6: Empirical transpiration model .....	41
Abb. 5.1.2-1: Jährliche Stickstoffeinträge mit dem Regenwasser am Standort Methau .....	52
Abb. 5.1.2-2: Charakteristik des untersuchten Pappelbestandes .....	55
Abb. 5.1.2-3: Boxplots der Trockenrohddichte in verschiedenen Tiefenstufen .....	59
Abb. 5.1.2-4: Boxplots des pH-Wertes in verschiedenen Tiefenstufen .....	59
Abb. 5.1.2-5: Austauschbare Kationen in Tiefenstufen bis 60 cm.....	60
Abb. 5.1.2-6: Boxplots der $C_{org}$ -Gehalte in verschiedenen Tiefenstufen .....	61
Abb. 5.1.2-7: Vergleich der Boden-Nitratkonzentrationen.....	62
Abb. 5.1.2-8: Acker und Plantage im Vergleich der Gesamtvorräte.....	62
Abb. 5.2.1-1: Häufigkeitsverteilung der Parameter aus akzeptierten Modellläufen.....	75
Abb. 5.2.1-2: Validierungsvariablen zum Wasserhaushalt.....	77
Abb. 5.2.1-3: Modellierter Gesamtabfluss .....	78
Abb. 5.2.2-1: Zu Parametrisierung und Validierung .....	84
Abb. 5.2.2-2: Zeitlicher Verlauf der Änderungen des Bodenwasservorrates. ....	86
Abb. 5.2.2-3: Zusammensetzung der durchschnittlichen Jahreswasserbilanz (1996-2008) ..	87
Abb. 5.2.2-4: Durchschnittliche Gesamtsickerrate auf den vier sächsischen Modellstandorten unter Winterweizen und Pappel-KUP.....	88
Abb. 5.3.1-1: Relationship between $AWC_{RD}$ and biomass production.....	94
Abb. 5.3.1-2: Response functions for a) low mean annual air temperatures and b) drought ..	95

Abb. 5.3.1-3: Potential surface area and site-based biomass production in SRC on arable land in the State of Saxony .....	98
Abb. 5.3.1-4: Site-based biomass production potential of SRC plantations on arable land deemed to have either a high or a very high synergy effect with respect to soil protection and/or nature conservation .....	103
Abb. 5.3.1-5: Site-based biomass production of SRC plantations on areas identified as having a high or very high synergy effect.....	104
Abb. 5.3.1-6: Distribution of synergy classes with respect to SRC on arable land.....	104

### **Tabellenverzeichnis**

Tab. 3.3.1-1: Transpirationsleistung von Pappel im Vergleich zu anderen Baumarten	10
Tab. 3.3.1-2: Einige bodenökologische Aspekte, Umweltwirkung von KUP .....	12
Tab. 3.3.2-1: Bedeutsame Pappelarten für den Kurzumtrieb, deren natürliche Vorkommen und Ansprüche an den Standort .....	14
Tab. 3.3.2-2: Für den Kurzumtrieb besonders geeignete Pappelklone.....	15
Tab. 3.3.2-3: Wertebereich der Blattelementgehalte für die optimale Ernährung von Balsampappeln und intersektionellen Hybriden mit Schwarzpappel im Kurzumtrieb .....	16
Tab. 3.3.2-4: Für den Kurzumtrieb besonders geeignete Weidenklone.....	17
Tab. 3.3.2-5: Wertebereich der Blattelementgehalte für die optimale Ernährung von Weide	17
Tab. 3.3.2-6: Standortsansprüche der Robinie .....	18
Tab. 3.3.2-7: Standortsansprüche ausgewählter sonstiger Baumarten für den Kurzumtrieb.	18
Tab. 4.2.2-1: Angewendete Messverfahren zur Bestimmung von Zustands- und Prozessgrößen des Wasserhaushalts auf Standortsebene .....	27
Tab. 5.1.1-1: Monthly sum of corrected precipitation and monthly precipitation deficit.....	32
Tab. 5.1.1-2: Biometric data of sample trees for sap flow measurements .....	33
Tab. 5.1.1-3: Soil physical and hydrological properties at the study site.....	35
Tab. 5.1.1-4: Regression statistics for the transpiration model .....	40
Tab. 5.1.1-5: Measured $T$ , modelled $T$ , and measured weather conditions of the poplar stand in Methau .....	42
Tab. 5.1.1-6: Comparison of measured evapotranspiration of stands of poplar, Norway spruce, European beech, and various agricultural crops on sites in Saxony.....	44
Tab. 5.1.2-1: Bewirtschaftungsmaßnahmen der ackerbaulich genutzten Vergleichsfläche 1999-2008.....	52
Tab. 5.1.2-2: Untersuchte Parameter an Boden- bzw. Pflanzenproben.....	54
Tab. 5.1.2-3: Elementgehalte in den Biomassekompartimenten der Pappel .....	57

---

Tab. 5.1.2-4: Hochgerechnete Elementvorräte in den Biomassekompartimenten der Pappel .....	57
Tab. 5.1.2-5: Vorräte pflanzenverfügbarer Nährstoffe P, K und Mg (kg ha <sup>-1</sup> ) im Oberboden sowie im Unterboden unter Acker sowie Plantagennutzung .....	60
Tab. 5.2.1-1: Ausgewählte Modelleinstellungen für die Beschreibung des untersuchten Pappelbestandes .....	70
Tab. 5.2.1-2: Fixe Parametereinstellungen in CoupModel .....	71
Tab. 5.2.1-3: Ausgewählte Parameter für die Bayessche Kalibrierung .....	72
Tab. 5.2.1-4: Validierungsvariablen für die Bayessche Kalibrierung .....	73
Tab. 5.2.1-5: Mittelwerte der Parameterverteilungen vor (prior mean) und nach (post mean und median) der Bayesschen Kalibrierung .....	75
Tab. 5.2.1-6: Matrix der Korrelationskoeffizienten .....	76
Tab. 5.2.1-7: Maße für die Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Messdaten .....	78
Tab. 5.2.2-1: Kurzcharakteristik der vier Untersuchungsstandorte in Sachsen .....	84
Tab. 5.2.2-2: Maße für die Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Messdaten .....	85
Tab. 5.3.1-1: Main geographic regions of Saxony, and the corresponding climate and soil characteristics. ....	93
Tab. 5.3.1-2: Overview of synergy classes for the combination arable land and SRC with regard to the conservation of nature, landscape, and soil. ....	97
Tab. 5.3.1-3: Criteria and indicators for the identification of soil protection synergy effects arising from SRC on arable land in the State of Saxony. ....	99
Tab. 5.3.1-4: Areas characterised by very high synergy if planted with SRC. ....	100
Tab. 5.3.1-5: Areas requiring further evaluation and the consideration of specific protection goals; assessment on a regional and local scale. ....	101
Tab. 5.3.1-6: Areas with no nature conservation synergies .....	102

**Abkürzungen**

Abb.	Abbildung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
C	Kohlenstoff
EC	European Commission
EU	Europäische Union
FFH	Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie der EU
fm	Festmeter (m <sup>3</sup> Derbholz)
FsB	Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten
GIS	Geografisches Informationssystem
GLUE	Generalized Likelihood Uncertainty Estimation
IUCN	International Union for Conservation of Nature
KA5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage (AD-HOC-AG BODEN 2005)
KUP	Kurzumtriebsplantage
LAI	leaf area index (Blattflächenindex)
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
MCMC	Markov-Chain-Monte-Carlo
Mio.	Million
N	Stickstoff
OBS	Organische Bodensubstanz
pdf	probability density function (Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion)
PTF	Pedotransferfunktion
SES	Spatial Expert System
SCI	Sites of community importance
SPA	Special protected area
SRC	Short rotation coppice (Kurzumtrieb aus Stockausschlag)
t <sub>atro</sub>	Einheit für Biomasse; Tonne absolut trockene Biomasse
Tab.	Tabelle
TDR	time domain reflectometry
USLE	Universal soil loss equation
vgl.	vergleiche
VPD	vapor pressure deficit (Dampfdruckdefizit)

# 1 Einführung

## 1.1 Holz aus Kurzumtriebsplantagen – ein Baustein für die nachhaltige Energie- und Rohstoffversorgung?

Die Anlage von Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen und deren energetische oder stoffliche Nutzung stoßen seit etwa 20 Jahren in der Forschung sowie in der Agrar- und Klimapolitik auf steigendes Interesse. Hintergrund ist die Debatte um erneuerbare Energien in der Europäischen Union mit dem Ziel, die Emissionen von Treibhausgasen zu senken. Außerdem sollen erneuerbare Energien die zunehmend knapper werdenden fossilen Energieträger langfristig ersetzen (BEMMANN et al. 2010). Während der Anteil erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in der Bundesrepublik Deutschland im Jahr 2000 noch bei 3,9 % lag, stieg er bis 2011 auf 12,5 %. Dabei stellte Biomasse rund 8 % (BMU 2011). Unter den erneuerbaren Energieträgern spielen biogene Festbrennstoffe eine besondere Rolle. Rund 36 % der Endenergiebereitstellung stammte im Jahr 2011 aus diesen Energieträgern. Zur Bereitstellung von Wärme trug die Verbrennung von biogenen Festbrennstoffen sogar mit 74,4 % bei (BMU 2011). Der bedeutendste biogene Festbrennstoff ist Holz. Der Gesamtholzverbrauch in Deutschland, sowohl für die stoffliche als auch die energetische Nutzung ist seit dem Jahr 2000 jedoch stark angestiegen und lag 2008 bei rund 125 Mio. m<sup>3</sup> (MANTAU 2009). Die meisten Szenarien (vgl. Zusammenstellung in SEINTSCH 2011) gehen davon aus, dass der Holzverbrauch in Deutschland bis 2020 weiter steigen und dieser Anstieg vor allem durch eine stärkere energetische Nutzung von Holz angetrieben werden wird (vgl. THRÄN et al. 2011). Da die nachhaltige Bereitstellung des Rohstoffes Holz aus der Forstwirtschaft nicht in diesem Maße steigerbar ist, lässt sich für 2020 eine theoretische Holzlücke von bis zu 40 Mio. m<sup>3</sup> herleiten (vgl. SEINTSCH et al. 2011).

Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, werden verschiedene Maßnahmen diskutiert. Nach BEMMANN et al. (2010) könnte die Holznachfrage kurzfristig (bis zu 10 Jahre) über eine Mobilisierung noch vorhandener, nachhaltig nutzbarer Waldholzpotenziale befriedigt werden. Hohe Mobilisierungskosten sowie naturschutzfachliche und bodenökologische Bedenken stehen dieser Option jedoch entgegen. Langfristig (mehrere Jahrzehnte bis Jahrhunderte) könnte der zunehmende Holzbedarf über veränderte Waldbaustrategien zur nachhaltigen Produktion von Dendromasse gedeckt werden. Auch diese Option ist problematisch, da vor dem Hintergrund des Klimawandels die aktuellen Waldbaustrategien eher die Anpassung und ökologische Stabilisierung der Wirtschaftswälder statt einer Maximierung der Holzproduktion zum Ziel haben. Als dritte Option sehen BEMMANN et al. (2010) schließlich das Potenzial, mittelfristig (Zeitraum 5 bis 30 Jahre) in Deutschland Kurzumtriebsplantagen auf einer Fläche von 400.000 bis 500.000 ha anzulegen. Dadurch könnte jährlich ein Holzertrag von rund 3 bis 4 Mio t<sub>atro</sub> erzeugt werden. Das würde bei einem jährlichen Holzeinschlag von rund 80 Mio. m<sup>3</sup> etwa 10 % des deutschen Holzeinschlags ausmachen (BEMMANN et al. 2010). Zum Vergleich: 2011 waren in Deutschland höchstens 6000 ha mit Kurzumtriebsplantagen bepflanzt (FNR 2012).

Sollen die genannten Potenziale von Kurzumtriebsplantagen erschlossen werden, sind Flächenkonkurrenzen zur Produktion von Nahrungsmitteln und anderen nachwachsenden Rohstoffen auf landwirtschaftlichen Flächen zu beachten. Außerdem sollten ökologische Aspekte

berücksichtigt werden, damit Kurzumtriebsplantagen tatsächlich einen Beitrag zur nachhaltigen Energie- und Rohstoffversorgung leisten. Die Dissertation wird sich vor allem mit einigen ökologischen Fragestellungen zu Kurzumtriebsplantagen beschäftigen.

Die Erfahrungen zur Nutzung von schnellwachsenden Baumarten durch den Menschen reichen sehr weit zurück, weshalb im folgenden Abschnitt zunächst ein historischer Rückblick erfolgt.

## **1.2 Kurzumtriebsplantagen – Weiterentwicklung einer alten Idee**

Schnellwachsende Baumarten wie Pappeln und Weiden werden von den Menschen schon seit dem Altertum als Baumaterial, Brennstoff und Rohstoff für handwerkliche Produkte verwendet:

Archäologen fanden heraus, dass Pappelholz bereits vor rund 5500 Jahren neben anderen Holzarten für den Bau von Tempeln kupfersteinzeitlicher Kulturen in Anatolien eingesetzt wurde (SADORI et al. 2008). Die Siedlungen jener Zeit waren auf die unmittelbare Nähe von Wasservorkommen wie Seen oder Flüsse angewiesen und befanden sich daher zumeist im natürlichen Verbreitungsgebiet von Pappel- und Weidenarten (ebd.).

Auch in Mitteleuropa wurden Weichlaubhölzer bereits seit Jahrtausenden genutzt. Das Stammholz von Pappel und Weide diente vor allem als Brennholz und für die Herstellung von Holzschuhen und Küchengeräten. Die schnellwüchsigen Austriebe der Bäume („Kopfleite“, aber auch Pappel) wurden als Flechtmaterial verwendet, junge Triebe und Laub als Viehfutter und Einstreu (DÜLL & KUTZELNIGG 1994). Der Weidenheger- und Kopfholzbetrieb mit Umtriebszeiten von 3 bis 10 Jahren war fester Bestandteil der mittelalterlichen bäuerlichen Wald- und Landwirtschaft im Mittleren Schwarzwald (SUCHOMEL & KONOLD 2008).

Im frühmittelalterlichen Bergbau und bei der Metallverhüttung mit Holzkohle wurden in unmittelbarer Nähe der Erzkörper sehr große Mengen Holz benötigt. Dies führte z.B. im Harz bereits im 10. Jahrhundert zur Übernutzung der Wälder und zu lokalen Energiekrisen (KLAPPAUF et al. o.J.). Pionierbaumarten wie Birke und Pappel konnten sich ausbreiten und wurden aufgrund des Mangels an Hartlaubhölzern zur Verkohlung mitverwendet (ebd.). Der Holzunger jener Zeit führte schließlich zu frühen Regelungen der Waldnutzung und Bewirtschaftungskonzepten für ausschlagfähige Baumarten mit festgelegten Umtriebszeiten (ebd.).

Im 14. Jahrhundert wurde erstmals der Begriff „Niederwald“ erwähnt (SUCHOMEL & KONOLD 2008). Dabei bildeten ausschlagfähige Baum- und Straucharten, die nach dem „Auf-den-Stock-setzen“ aus den Proventivknospen des verbleibenden Stubbens wieder austrieben, die Grundlage der Bewirtschaftung. Die Ausprägung von Niederwäldern war vielgestaltig und richtete sich nach deren Nutzung, z.B:

- Hackwald (Kombination aus ackerbaulicher, viehwirtschaftlicher und forstlicher Nutzung),
- Eichenschälwald (Gewinnung von gerbhaltiger Rinde für die Lohgerberei),
- Brennholz- bzw. Haselniederwald (für Brennholz, schwaches Werk- und Schnittholz, Haselgerten für Flechtwerk im Fachwerkbau),
- Kastanienniederwald (Rebpfähle und Baumstützen im Wein- und Obstbau) sowie

- Weidenheger- und Kopfholzbetrieb (SUCHOMEL & KONOLD 2008).

Die Niederwälder hatten je nach Betriebsziel eine Stockdichte von 600-4000 Stück ha<sup>-1</sup> und wurden mit Umtriebszeiten von 5 bis 40 Jahren bewirtschaftet, ihre Biomasseproduktion erreichte 2-6 t<sub>atro</sub>ha<sup>-1</sup>a<sup>-1</sup> (UNSELD 1999). Schnellwachsende Baumarten wie z.B. die Pappel (Aspe) traten dabei zwar nur als Begleitbaumarten auf, dennoch kann man im mittelalterlichen Niederwald bereits einen Vorläufer moderner Kurzumtriebsplantagen sehen. Durch die zunehmende Substitution ihrer Produkte, z.B. die Erfindung synthetischer Gerbstoffe und die Nutzung von Stein- und Braunkohle als Energieträger, verlor die zuvor weitverbreitete Niederwaldbewirtschaftung im 19. Jahrhundert schließlich stark an Bedeutung.

Mitte des 20. Jahrhunderts führten verschiedene politische und wirtschaftliche Faktoren (vgl. Kapitel 3.1) erneut zu einem Mangel an Holzrohstoffen in Europa, z.B. für die Zelluloseindustrie. Zudem entwickelte sich das Bewusstsein von der Endlichkeit fossiler Energieresourcen wie Kohle, Erdöl und Ergas. Dadurch erlangte die Plantagenwirtschaft mit schnellwachsenden Baumarten (zunächst mit Pappeln, später auch mit Weiden, Robinien und Birken) wieder an Bedeutung. Der Begriff Kurzumtrieb (im Englischen „short rotation“) bzw. Kurzumtriebsplantage tauchte in Deutschland erstmals in den 1970er Jahren auf, als in Hessen Pappel-Versuchsflächen zur Biomassegewinnung für die Energieerzeugung angelegt wurden (WEISGERBER 1975).

### 1.3 Begriffsklärung „Kurzumtriebsplantage“

Als Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden in der vorliegenden Arbeit - wenn im Text nicht genauer definiert - Anbauten mit schnellwachsenden Baumarten, insbesondere leistungsfähigen Pappelhybriden verstanden, deren maximale Umtriebszeit 20 Jahre beträgt. KUP sind

- für die energetische Verwertung (hohe Pflanzdichte und meist kurze Umtriebszeit von 3 bis 5 Jahren unter Verwendung des Stockausschlags für die Folgerotation) oder
- für die stoffliche Verwertung (geringere Pflanzdichte und längere Umtriebszeit von mindestens 10 Jahren)

vorgesehen.

### 1.4 Aufbau und Gliederung der Arbeit

Die inhaltlichen Grundlagen der vorliegenden Dissertation entstanden in zwei Forschungsvorhaben, in denen der Verfasser als Bearbeiter tätig war. Dabei handelt es sich um folgende Projekte:

- „AGROWOOD - Anbau, Ernte und Verwertung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen in der Region Freiberg (Sachsen) und im Schradenland (Brandenburg)“; Laufzeit 08/2005-07/2009; gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung,
- „Standortpotenziale, Standards und Gebietskulissen für eine natur- und bodenschutzgerechte Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung in Sachsen unter besonderer Berücksichtigung von Kurzumtriebsplantagen“; Laufzeit 01/2009-12/2009; gefördert vom sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG).

Die Ergebnisse aus diesen beiden Projekten wurden vom Verfasser bereits in Tagungsbänden, Buchbeiträgen und internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften mit peer-review-System publiziert.

Die vorliegende Dissertation fasst die wichtigsten publizierten Beiträge in kumulativer Form zusammen. Die Zusammenführung der Einzelbeiträge in der Arbeit folgt dabei einer klassischen Gliederung. Eigenständige Textpassagen ergänzen die Dissertation, während ausgewählte Publikationen des Autors an den entsprechenden Stellen integriert wurden. Im ersten Kapitel werden Motivation und Zielstellung der Arbeit dargestellt. Nach einer kurzen Einführung (Kapitel 1) werden im Kapitel 2 Motivation und Zielstellung der Arbeit erläutert und Thesen formuliert. Kapitel 3 gibt einen Überblick zur Entwicklung und zum Stand der Pappelforschung in Deutschland sowie zu standortsökologischen Aspekten von KUP. Die Methodologie, welche die wissenschaftliche Arbeit leitete, wird in Kapitel 4 vorgestellt. Es folgt das fünfte Kapitel mit der Darstellung der wesentlichen Ergebnisse. Dieser Abschnitt enthält drei wissenschaftliche Aufsätze, die in internationalen wissenschaftlichen Zeitschriften mit peer-review-System publiziert wurden bzw. sich noch im Review-Prozess befinden. Dabei handelt es sich um folgende Zeitschriften:

- European Journal of Forest Research, ISSN: 1612-4669; Springer-Verlag GmbH, Heidelberg;
- Die Bodenkultur - Journal for Land Management, Food and Environment, ISSN 0006-5471, Universität für Bodenkultur, WUV-Universitätsverlag, Wien
- Journal of Biogeosciences and Forestry, ISSN: 1971-7458, Italian Society of Silviculture and Forest Ecology (Manuskript im Review-Prozess)

Kapitel 5 wird außerdem durch einen eigenständigen Aufsatz zur Parametrisierung und Unsicherheitsanalyse von einem prozessorientierten Modell (nicht publiziert) sowie einen begutachteten Buchbeitrag (in: A. BEMMANN UND C. KNUST (Hrsg.): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-89998-159-9) ergänzt.

Das 6. Kapitel dient der abschließenden Wertung der Forschungsarbeit und dem Ausblick.

## 2 Motivation und Zielstellung

Vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen für die Rohstoff- und Energiebereitstellung sind nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Energien in den Focus der Öffentlichkeit gerückt. Neben Wind-, Solar- und Wasserkraft werden auch der Energiebereitstellung aus Biomasse bedeutsame Potenziale in neuen, zukunftsfähigen Energiekonzepten zugesprochen. Die Verwendung von Holz aus forstlicher Produktion als nachwachsender Rohstoff und Energieträger ist nur begrenzt steigerbar, da die Nachhaltigkeitskriterien in der Forstwirtschaft Europas eine Übernutzung nicht zulassen und eine Ausdehnung der Waldfläche nur in sehr geringem Umfang möglich ist (MANTAU et al. 2010).

Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit schnellwachsenden Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen, in Bergbaufolgelandschaften oder auf ehemaligen Industriebrachen könnten eine Möglichkeit bieten, sowohl Faserrohstoffe für die Industrie als auch Biomasse für die Energieerzeugung zu produzieren. Dem Charakter nach sind Kurzumtriebsplantagen nur bedingt mit Wald vergleichbar (vgl. Kapitel 1.3), sie entsprechen eher einer Dauerkultur auf landwirtschaftlicher Fläche. Im Vergleich zur konventionellen, ackerbaulichen Nutzung entfallen aber die intensive Bodenbearbeitung, mehrmalige Befahrung im Jahr sowie der intensive Düngemittel- und Pestizideinsatz. Durch die Ernte im unbelaubten Zustand verbleiben wichtige Nährelemente im Kreislauf und müssen nicht oder nur in geringem Umfang zugeführt werden.

Von KUP können deshalb viele positive ökologische Auswirkungen erwartet werden, die so mit anderen Bioenergielinien einjähriger Kulturen nicht zu erzielen sind. Beispiele sind der im Vergleich zu Energieraps geringere sickerwassergebundene Nitrat-Austrag, der geringere Lachgasausstoß im Vergleich zu N-gedüngten einjährigen Kulturen, die eingeschränkte Erosionsanfälligkeit im Vergleich zu Energiemais und die höhere Zoodiversität (SCHOLZ et al. 2011).

Dagegen ist auch bekannt, dass sich der höhere Wasserverbrauch von schnellwachsenden Baumarten auf die Grundwasserneubildung mit positiven (Verringerung des Schadstoffausstrags) aber auch negativen Folgeerscheinungen (z.B. Rückgang der Grundwasserneubildung mit möglicher Absenkung des Grundwasserspiegels) auswirken kann.

Um mit KUP ökonomisch und ökologisch erfolgreich zu wirtschaften, müssen einige Voraussetzungen beachtet werden. Für diese Art der Primärproduktion sind zunächst die ökologischen Standortfaktoren zu berücksichtigen, die sich auf Anwuchsverhalten und Ertragszuwachs von Baumarten und deren Züchtungsvarianten auswirken. Auch logistische und technische Arbeitsverfahren der Anlage und Ernte von KUP müssen auf Standortfaktoren Rücksicht nehmen. Nicht zuletzt sind neben der Rohstoffproduktion auch andere Ökosystemdienstleistungen zu betrachten, um Zielkonflikte zu vermeiden und Synergieeffekte zu fördern.

Diese Überlegungen gaben den Anlass für die vorliegende Arbeit. Sie soll einen Beitrag zur aktuellen Diskussion über Kurzumtriebsplantagen im Kontext der Versorgung mit erneuerbaren Energien und nachwachsenden Rohstoffen leisten. Im Vordergrund stand dabei, welche Möglichkeiten und Grenzen bei der praktischen Umsetzung von KUP-Konzepten aus standortsökologischer Sicht zu beachten sind.

Ziele waren insbesondere:

- Geeignete Werkzeuge für die Bewertung des Wasserhaushalts von Kurzumtriebsplantagen unter aktuellen Rahmenbedingungen zu identifizieren und anzuwenden;
- Auswirkungen von KUP-Wirtschaft auf die Nährstoffbilanz und die Entwicklung des Bodenkohlenstoffvorrats abzuschätzen;
- Im Vergleich mit anderen Untersuchungen verallgemeinerbare Schlüsse für die Praxis abzuleiten (Standorts- und Bewirtschaftungsempfehlungen);
- Anbau- und Ertragspotenziale unter standortkundlichen Gesichtspunkten zu bewerten.

Aus wissenschaftlicher Sicht leiteten folgende Hypothesen die Arbeit:

- I. Der Wasserverbrauch von Pappel-KUP ist höher als der von landwirtschaftlichen Kulturen und den meisten Waldökosystemen.
- II. Der höhere Wasserverbrauch von KUP im Vergleich zu annuellen Ackerkulturen führt zu einer reduzierten Grundwasserneubildung.
- III. Die Nährelemententzüge durch die Ernte von Pappel-KUP werden aktuell durch die atmosphärischen Depositionen ausgeglichen.
- IV. Pappel-KUP tragen zu einer temporären Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Boden bei.
- V. In Sachsen existiert ein beträchtliches Flächenpotenziale auf dem mit Pappel-KUP positive Wirkungen für Boden- und Naturschutz erzielt werden kann.

### 3 Überblick zur Pappelforschung und zu standortkundlichen Grundlagen von Kurzumtriebsplantagen

Die Auseinandersetzung mit schnellwachsenden Baumarten und Plantagenwirtschaft ist in Deutschland bereits seit vielen Jahrzehnten ein Thema für die angewandte Forschung. Dabei wurden insbesondere Pappeln, später auch weitere Baumarten untersucht. Schon in den 1950er Jahren wurden grundlegende Erkenntnisse zu Standortsansprüchen und Wasserverbrauch von Pappelklonen wissenschaftlich herausgearbeitet, die bis heute nichts an Aktualität eingebüßt haben. Die folgenden drei Abschnitte sollen deshalb - beginnend mit einem historischen Abriss zur Pappelforschung (3.1) über die Darstellung einiger Ergebnisse aus Untersuchungen zu standortsökologischen Aspekten von Pappelplantagen (3.2) - zu einer Zusammenfassung des aktuellen Wissenstandes der standörtlichen Voraussetzungen und Potenziale für Kurzumtriebsplantagen in Deutschland (3.3) führen.

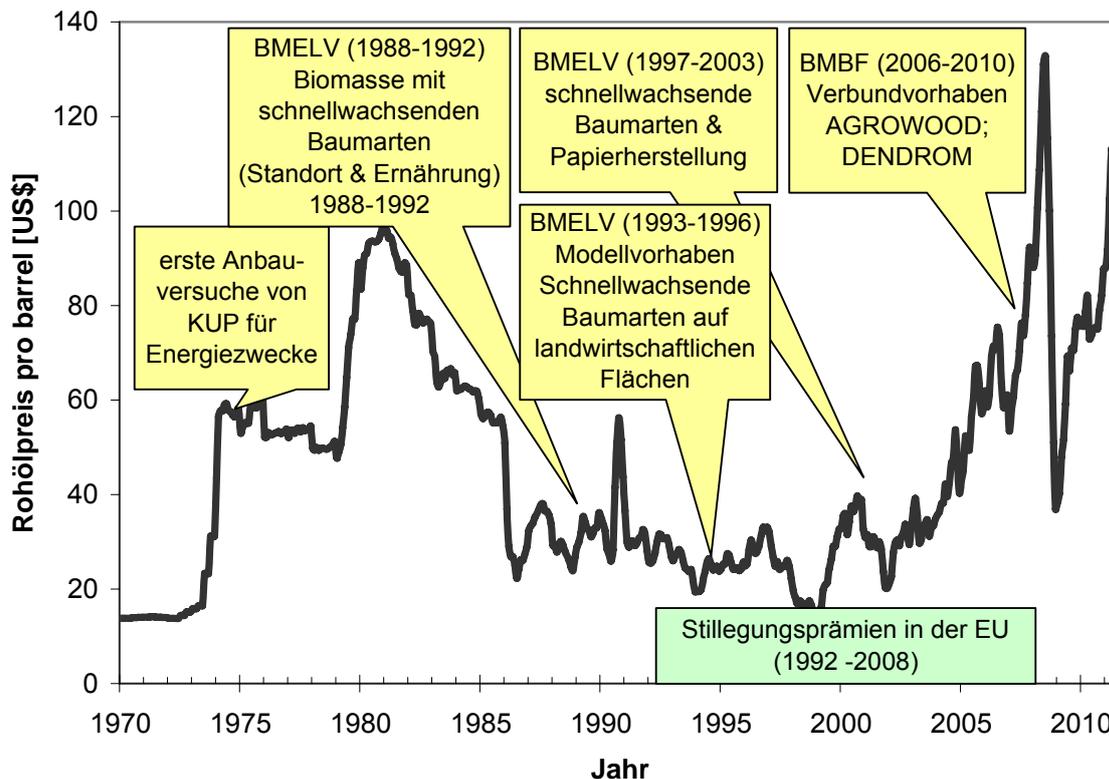
#### 3.1 Historische Entwicklung der Pappelforschung in Deutschland

Die Anfänge der Pappelforschung in Deutschland liegen in den 1930er Jahren. Zunächst standen damals, z.B. am Chemischen Laboratorium der Universität Freiburg i. Br. Untersuchungen zum Zellulosegehalt des Pappelholzes (und anderer Baumarten) im Vordergrund. Ziel war es, neue Wege zu finden, um den stark gestiegenen Bedarf an Zellulose zu decken (STEINSIEK 2008). Hermann Göring forderte in seiner Rolle als Reichsforstminister auf der Tagung des Deutschen Forstvereins 1939 in Berlin einen verstärkten Anbau von Holz außerhalb des Waldes. Vier bis fünf Mio. fm Holz sollten auf diese Weise zusätzlich pro Jahr genutzt und damit die wirtschaftliche Autarkie Deutschlands gestärkt werden. In den folgenden Jahren bis 1943 wurde am Entwurf einer Verordnung über ein „Pappelanbauprogramm“ gearbeitet (STEINSIEK 2008), der jedoch nicht vollendet wurde (ebd.). Flankierend sollte die Forschung dazu beitragen, geeignete Pappelsorten mit besseren Zuwachsleistungen und höheren Zellulosegehalten zu züchten. Tatsächlich wurden bis 1942 etliche Pappelversuchsflächen angelegt, um die Wuchsleistung verschiedener Sorten wissenschaftlich zu untersuchen. Am Institut für Weichlaubholz- und Zellulosefaserpflanzenzüchtung der Technischen Hochschule in Karlsruhe wurde untersucht, wie das Wachstum von zellulosereichen Pflanzen zu steigern sei (ebd.). Bereits in dieser Zeit wurden allgemeine, teils sogar sektionsspezifische Standortsansprüche für den erfolgreichen Pappelanbau formuliert: *„Eine gutwüchsige Pappel verlangt leichten, nährstoffreichen, kalkhaltigen Boden mit fließendem Grundwasser in 60-80 cm Tiefe. Jeder harte, saure Boden sowie stauende Nässe ist ungünstig“* (VON WETTSTEIN 1944, S. 43).

Nach dem II. Weltkrieg wurde die Pappelforschung in West- und Ostdeutschland fortgeführt, um der befürchteten Rohstoffknappheit zu entgegen. Zunächst wurde bereits 1949 die Hauptabteilung Land- und Forstwirtschaft der Deutschen Wirtschaftskommission in der sowjetischen Besatzungszone angewiesen, ein umfangreiches Pappelanbauprogramm durchzuführen (MILNIK et al. 1998). Ziel war, nach 10 Jahren jährlich 1 Mio. fm Pappelholz für die Deckung des Zellstoffbedarfs bereitzustellen. Dieses Programm wurde ohne entsprechenden Forschungsvorlauf gestartet. So geschah es, dass 1955 von 18 Mio. gepflanzten Pappeln bereits ein Drittel ausgefallen war. Als Gründe wurden falsche Standortwahl sowie die Verwendung von ungeeignetem Pflanzmaterial identifiziert. Parallel wurde jedoch auch die Pappelforschung intensiviert. Die Untersuchungen erfolgten insbesondere durch das Institut für

Forstwissenschaften Tharandt (Bereich Forstpflanzenzüchtung) mit der Außenstelle in Graupa und das Institut für Forstwissenschaften in Eberswalde. In dieser Zeit entstanden grundlegende Arbeiten zur Standortsökologie und Ökophysiologie von Pappeln (vgl. GÜNTHER 1953, JOACHIM 1953, POLSTER 1957). Seit Anfang der 1950er Jahre wurden geeignete Standorte für den Pappelanbau erkundet und kartiert (MILNIK et al. 1998). JOACHIM (1953) stellte in seinen umfangreichen Untersuchungen über die Wurzelbildung und die Standortansprüche von Pappelsorten fest, dass sich für verschiedene Standorte unterschiedliche Sorten besonders eignen können. Weiterhin konnte er auch deutliche Bewurzelungsunterschiede zwischen Balsampappeln, Schwarzpappelhybriden und Aspen (*P. tremula*) nachweisen. Ergebnisse dieser Forschungsaktivitäten sind auch neue Pappelhybridzüchtungen, wie z.B. die noch heute im Kurzumtrieb verwendeten Klone Androscoggin (*Populus maximowiczii* x *P. trichocarpa*) oder Hybride 275 bzw. NE 42 (*Populus maximowiczii* x *P. trichocarpa*). Der Pappelanbau wurde in Ostdeutschland jedoch später reduziert und auf besonders geeignete, v.a. grundwassernahe Standorte beschränkt (MILNIK 1998).

In Westdeutschland gründeten sich 1947 die Vereine „Lignikultur, Gesellschaft für Holzzerzeugung außerhalb des Waldes e.V.“ und „Deutscher Pappelverein in Mönchengladbach“, welche Forschungsstellen in Reinbek (Schleswig-Holstein) und in Brühl (Rheinland) unterhielten. Am Anfang waren die Schwarzpappelhybriden von wissenschaftlichem Interesse. Ziel war, die Starkholzerzeugung in Flusssaubereichen zu steigern. Die Forschungseinrichtungen wurden 1962 nach Hannoversch Münden überführt. In dieser Zeit weitete man die Untersuchungen auf Pappeln der Sektionen *Tacamahaca* und *Leuce* aus. Ab 1975 trug die Einrichtung in Hannoversch Münden die Bezeichnung „Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten“, Träger war ein Verein gleichen Namens. Als schnellwachsende Baumarten wurden dort Pappeln, Aspen, Weiden, Birken, Erlen, Robinien und auch einige Nadelbaumarten untersucht (FSB 2012). Im Jahr 1976 wurden in Westdeutschland zu Versuchszwecken erste Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln und anderen schnellwachsenden Baumarten für die Energieerzeugung angelegt (WEISGERBER 1986). Hintergrund war damals die Ölkrise 1973, später nochmals die Krise 1979 (Abb. 3.3.1-1). Die Forschungsergebnisse wurden in den „Schriften des Forschungsinstitutes für schnellwachsende Baumarten“ (z.B. DIMITRI 1988) dokumentiert. Der anschließende Preisverfall von Rohöl und die relativ hohen Kosten für Anlage und Pflege von KUP führten dazu, dass viele Versuchsplantagen in Bayern, Hessen und Niedersachsen wieder aufgegeben wurden.



**Abb. 3.3.1-1: Ölpreisentwicklung 1970-2011 und Auswahl einiger größerer Forschungsprojekte zu schnellwachsenden Baumarten in Deutschland** (Datengrundlage Ölpreis: DAVIS et al. 2012)

Mitte der 1980er Jahre kam die Diskussion um die energetische und stoffliche Nutzung von Kurzumtriebsplantagen wieder in Schwung. Schnellwachsende Baumarten sowie geeignete Bewirtschaftungssysteme insbesondere auf landwirtschaftlichen Flächen rückten wieder in den Fokus der Forschung. Hintergrund war diesmal die Diskussion zur globalen Klimaveränderung verbunden mit dem knapper werdenden Rohstoffangebot und der Notwendigkeit der Suche nach Alternativen zu fossilen Energieträgern und. Weitere Gründe für diesen Paradigmenwechsel in ganz Europa waren die geringe Rentabilität der konventionellen Landwirtschaft, Bodenversauerung, Verschmutzung des Grundwassers sowie die Entvölkerung ländlicher Räume (vgl. CHRISTERSON et al. 1993). Ein Beispiel für die wissenschaftliche Arbeit aus dieser Zeit ist das vom Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderte Verbundprojekt „Modellvorhaben schnellwachsende Baumarten“ (vgl. HOFMANN 1999). In diesem Projekt wurden neben züchterischen und ökonomischen Aspekten auch Fragen wie Standortseignung, Ertragsleistung und bodenökologische Auswirkungen sowie Aspekte des Vogelschutzes untersucht.

Zunehmend wurden Kurzumtriebsplantagen auch von der Politik als Anbaualternative auf landwirtschaftlichen Flächen angesehen, um die Überproduktion agrarischer Produkte in der Europäischen Union abzubauen (Stilllegungsflächen, Energieprämie). Zusätzlich führten jedoch auch die wieder steigenden Preise für Energieträger (vgl. Abb. 3.3.1-1) sowie der stetige Anstieg der Rohholzpreise dazu, dass sich das wissenschaftliche Interesse an schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen erneut verstärkte. Dieses Interesse führte zu großen umsetzungsorientierten Verbundvorhaben, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurden. Im Rahmen dieser Projekte, beispielsweise AGROWOOD (2010) oder DENDROM (2010) erfolgte ein umfangreicher Transfer bisheriger

Erkenntnisse zu schnellwachsenden Baumarten in die Praxis. Ziel war, die Anbaufläche mit unternehmerisch geführten KUPs in ausgewählten Modellregionen deutlich zu steigern. Flankierend wurden wissenschaftliche Fragestellungen zur Standortsökologie, zu technischen Lösungen für die Hackschnitzeltrocknung und zu logistischen sowie ökonomischen Aspekten untersucht (vgl. BEMMANN & KNUST 2010, KNUR et al. 2009).

### 3.2 Beispiele zur standortsökologischen Forschung auf KUP

Im folgenden Abschnitt werden insbesondere der Wasser- und Stoffhaushalt von Pappelplantagen betrachtet. Bei Untersuchungen zum Wasserhaushalt auf Standortebene interessieren besonders die Komponenten des Wasserhaushalts - also Transpiration, Interzeption, Evaporation, Änderung des Bodenwasservorrats sowie die Tiefensickerung.

Wenn Untersuchungen zum Stoffhaushalt von KUP auf vormals ackerbaulich genutzten Flächen bewertet werden, ist zu berücksichtigen, dass solche Flächen durch Düngung sowie Bodenbearbeitung meist mit einem höheren Nährstoffpotenzial ausgestattet sind. Das unterscheidet sie von natürlich gewachsenen Böden unter Wald oder künstlichen Böden in Rekultivierungslandschaften.

#### Wasserhaushalt von Pappeln unter besonderer Berücksichtigung der Transpiration

Bereits 1957 berichtete POLSTER über die Transpirationsleistung verschiedener Pappelklone aus Versuchsanbauten in Graupa (Sachsen). Die Quantifizierung der Transpiration erfolgte über Messungen des Masseverlustes frisch geernteter Pappelblätter innerhalb einer bestimmten Zeiteinheit und die Bestimmung der Blattmasse von Beständen. Bei den untersuchten Pappelsorten handelte es sich um einjährige Aufwüchse aus Stecklingsvermehrung. POLSTER kam zu bemerkenswerten Ergebnissen (vgl. Tab. 3.3.1-1), wenngleich er ausdrücklich auf methodisch bedingte Unsicherheiten bei den Messungen und den Hochrechnungen der absoluten Transpirationsmengen auf Bäume und ganze Bestände hinwies.

**Tab. 3.3.1-1: Transpirationsleistung von Pappel im Vergleich zu anderen Baumarten**  
(aus POLSTER 1957)

Baumart <sup>(a)</sup>	Bestandestranspiration [mm Vegetationszeit <sup>-1</sup> ]
Birke	350
Buche	230-300
Kiefer	120-310
Fichte	250-320
Pappel; starke Transpiration <sup>(b)</sup>	577
Pappel; mittlere Transpiration <sup>(c)</sup>	466
Pappel; schwache Transpiration <sup>(d)</sup>	333

(a) Bei den Werten der Vergleichsbaumarten zitiert POLSTER Arbeiten von KIRWALD und PISEK aus dem Zeitraum 1931-1952. POLSTER (1957) gibt detailliert über die Rangfolge der Transpirationsleistung [ $g_{\text{Wasser}} g_{\text{Blattfrischgewicht}}^{-1} h^{-1}$ ] verschiedener Klone Auskunft. Starke Transpirierer (b) sind danach ausschließlich Schwarzpappelhybride. Balsampappelhybride gehören zu den schwachen Transpirierern (d). Kreuzungen aus Balsam- und Schwarzpappeln finden sich überwiegend in der mittleren Gruppe (c). Der Hochrechnung auf Bestandestranspiration liegen Unsicherheiten zugrunde, die dem damaligen Stand der Messtechnik geschuldet sind.

Die Erkenntnisse von POLSTER (1957) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Verschieden Pappelklone unterscheiden sich deutlich in ihrer Transpirationsleistung.
- Die mittlere Transpirationsleistung der Pappel übertrifft die aller anderen heimischen Baumarten.
- Hohe Erträge erreicht die Pappel nur auf Standorten mit guter Wasserversorgung. Einige Klone erscheinen jedoch auch bei weniger günstigen Wasserbedingungen noch anbauwürdig.
- Pappelbestände mit großer Blattmasseentwicklung und in engem Pflanzverband reagieren bei niedrigem Bodenwasservorrat sehr sensibel auf Trockenperioden.

Die Arbeiten und Ergebnisse waren wegweisend für spätere Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Pappelplantagen. Diese – wenn auch unter Verwendung weiterentwickelter Methoden sowie unter Einbeziehung weiterer Pappelsorten, anderer schnell wachsender Baumarten und moderner Plantagensysteme – bestätigten immer wieder die Grundaussagen von POLSTER (1957, vgl. auch HALL et al. 1996, MEIRESONNE et al 1999, STEPHENS et al. 2001).

#### Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen

Bereits bei der Anlage von KUP auf vormals landwirtschaftlich genutzten Flächen in den 1970er Jahren wurde betont, dass diese Landnutzungsform Auswirkungen auf die chemischen, biologischen und physikalischen Bodeneigenschaften haben kann. Die Möglichkeit, durch Kurzumtriebsplantagen die hohen Nährstoffvorräte im Boden zu verringern wurde früh erkannt. MAKESCHIN et al. (1989) wiesen darauf hin, dass damit langfristig zu einem ausgeglichenen Nährstoffhaushalt und einer Reduzierung der diffusen Stoffausträge aus der Landwirtschaft beigetragen werden kann. In den folgenden Jahren entstanden zahlreiche Studien zu verschiedenen Fragen der Bodenökologie und zu Umweltwirkungen von KUP (vgl. MAKESCHIN 1994, JUG et al. 1999, BAUM et al. 2009, LAMERSDORF et al. 2010).

Tab. 3.3.1-2 stellt die Auswirkungen von KUP auf verschiedene bodenökologische Aspekte sowie deren Ursachen dar. Aus dem bisherigen Wissenstand geht hervor, dass der Anbau von Kurzumtriebsplantagen mit schnellwachsenden Baumarten auf Ackerflächen deutliche bodenökologische Vorteile gegenüber einjährigen Acker-, aber auch Energiepflanzen bringen kann. Mögliche negative Effekte können dagegen durch geeignete Flächenauswahl und angepasstes Management weitgehend minimiert werden.

Tab. 3.3.1-2: Einige bodenökologische Aspekte, Umweltwirkung von KUP auf vormals landwirtschaftlich genutzten Flächen und mögliche Folgen

Aspekt	Wirkung von KUP	Folgen	Anmerkung	Quellen
Nährstoffaustrag	geringere Tiefensickerung durch erhöhten Wasserverbrauch; Nährstoffaufnahme durch Wurzeln auch in tieferen Bodenschichten	Verminderung, insbesondere Nitrat	Potenzial für Abwasserreinigung (Weide) durch höhere N-Akkumulation in Blättern, nach Grünlandumbruch stärkere N- und C-Verluste im Sickerwasser möglich	a,b,c
Nährstoffbilanz	kleiner Nährstoffkreislauf durch Verbleib der Blattstreu im Bestand; stärkerer Nährstoffentzug durch hohe Rinden- und Knospenanteile in der Biomasse bei sehr kurzen Rotationen	zunächst ausgeglichen, jedoch langfristig Defizit möglich (Biomassentzug)	langfristig Kompensationskalkung zur Stabilisierung des pH-Wertes und Zuführung von K und Mg notwendig; standortsangepasste Baumartenwahl, Umtriebszeiten und Ernteverfahren für Steuerung der Elemententzüge	a,b,d,e
C-Speicherung im Boden	erhöhter Streuanfall durch Wurzeln und Laub; ausbleibende Bodenbearbeitung nach Pflanzung; niedrigere Bodentemperaturen (Beschattung); geringere Bodenfeuchte	abhängig vom Ausgangszustand; tendenziell Zunahme und Stabilisierung von organischer Bodensubstanz	nach Grünlandumbruch C-Verluste möglich, Langzeitwirkungen insbesondere nach Rückumwandlung noch unklar	a,d,f,g
Schadstoffaustrag	Immobilisierung von Schadstoffen in Humuskomplexen; geringere Tiefensickerung durch erhöhten Wasserverbrauch	Verringerung, insbesondere Schwermetalle und organische Verbindungen	Potenzial für Phytoremediation, Phytoextraktion unter Feldbedingungen fraglich, langfristig pH-Absenkung und erneute Mobilisierung möglich	f,h
Erosion	ganzjährige Bodenbedeckung; Bodenstabilisierung durch Wurzeln, organische Substanz, ausbleibende Bodenbearbeitung, Windschutz	Verminderung; partikelgebundener P-Austrag reduziert	Optimierung durch angepasste Flächenanlage (Streifenanbau, Pflanzreihen parallel zu Höhenlinien)	i,k
Treibhausgase	ausbleibende bzw. verringerte Düngung und Bodenbearbeitung	Reduktion, insbesondere N <sub>2</sub> O	erhöhte N <sub>2</sub> O-Freisetzung bei N-Düngung	a,m
Bodenmikroorganismen	klon spezifische Mykorrhiza; ausbleibende Bodenbearbeitung	Mykorrhiza; vertikale Redistribution; vielfältigere Bodenfauna	vielfältige Wechselwirkungen im Nährstoffkreislauf, bei Streu-Abbauraten und C-Umsatz	f

a) LAMERSDORF et al. (2010), b) MEIRESONNE et al. (2006), c) SCHMIDT-WALTHER & LAMERSDORF (2012), d) KAHLE et al. (2007), e) JUG et al. (1999a), f) BAUM et al. (2009); g) JUG et al. (1999b), h) DIETZSCH (2011), i) PETZOLD et al. (2009), k) KORT et al. (1998), m) DREWET et al. (2011)

### 3.3 Standörtliche Voraussetzungen und Potenziale für Kurzumtriebsplantagen

**PETZOLD, R., K.H. FEGER, H. RÖHLE (2010):** Standörtliche Voraussetzungen für Kurzumtriebsplantagen (Kap. 1.3). In: A. BEMMANN UND C. KNUST (Hrsg.): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-89998-159-9, S. 44-53

#### 3.3.1 Bedeutung von Standortfaktoren

Schnellwachsende Baumarten in Kurzumtriebsplantagen benötigen für das Erreichen von wirtschaftlich interessanten Biomassezuwächsen entsprechende Standortbedingungen. Obwohl viele der verwendeten Baumarten, Sorten und Hybridzüchtungen potenziell ein breites Spektrum an Standorten besiedeln können, müssen Mindestanforderungen hinsichtlich Strahlungs- und Wärmeangebot, Wasser- sowie Nährstoffverfügbarkeit erfüllt sein. Als wirtschaftlich interessant werden zur Zeit Biomassezuwächse von mehr als 8 bis 10  $t_{\text{atro}}\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  angesehen, die jedoch nur auf mittleren bis besseren Standorten erreicht werden (MURACH et al. 2009).

Schnellwachsende Baumarten sind Lichtbaumarten und erfordern für eine optimale Photosyntheseleistung deshalb ein hohes Strahlungsangebot (Globalstrahlung bzw. photosynthetisch aktive Strahlung). Auch die Blattflächenentwicklung (Austrieb, Höhe des Blattflächenindex, Blattfall) wird in hohem Maße durch das Strahlungsangebot beeinflusst. Die Wärmebedürftigkeit von leistungsfähigen Sorten für den Kurzumtrieb bedingt notwendige Jahresmitteltemperaturen von  $> 6,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (RASCHKA 1997, SCHILDBACH 2009). Die Lufttemperatur steuert die Blattentwicklung und beeinflusst den Gasaustausch zwischen Blatt und umgebender Luft. Auch die Wurzelentwicklung beginnt erst ab ausreichend hohen Bodentemperaturen.

Das Nährstoffangebot sollte für schnell wachsende Baumarten, v.a. Pappel und Weide, hoch sein. Gemessen an der forstlichen Standortklassifikation sind nur eutrophe bis mesotrophe Standorte mit pH-Werten  $> 5$  geeignet (LIEBHARD 2007). Vormalig landwirtschaftlich genutzte Flächen in Deutschland, insbesondere nach Ackernutzung, sind jedoch in der Regel ausreichend mit Nährstoffen versorgt und eine Düngung ist in den ersten Jahren nicht notwendig (JUG et al. 1999, KAHLE et al. 2007).

Für eine erfolgreiche Kurzumtriebswirtschaft ist schließlich die Wasserverfügbarkeit von zentraler Bedeutung. Im Vergleich zu anderen landwirtschaftlichen Kulturen erreichen Pappel- und Weidenplantagen während der Vegetationszeit eine höhere Gesamtverdunstungsrate. Dies gewährleistet, entsprechende klimatische Bedingungen vorausgesetzt (hohe potenzielle Verdunstung), einen hohen Gasaustausch von Wasserdampf und Kohlendioxid an der Blattoberfläche und ist somit Voraussetzung für die optimale Photosyntheseleistung. Unterschreitet die Wasserverfügbarkeit im durchwurzelten Boden jedoch etwa 40 % der nutzbaren Feldkapazität, reagieren die meisten mitteleuropäischen Baumarten mit einer deutlich reduzierten Leitfähigkeit (GRANIER et al. 2000). Dieses Verhalten konnte auch an dem Pappelklon Max 1 auf einer Kurzumtriebsplantage in Mittelsachsen (PETZOLD et al. 2009) beobachtet werden. Wenn Pappelbestände während der Vegetationszeit Transpirationsraten von 500 mm und mehr erreichen, kann unter den naturräumlichen Bedingungen in Deutschland (kei-

ne Bewässerung) von optimalen Wuchsbedingungen ausgegangen werden. Standorte mit ausreichender Durchwurzelungstiefe (> 40 cm) und erreichbarem Grundwasser, nach LIEBHARD (2007) zwischen 0,6 und 1,5 m Tiefe, sind, unabhängig von Niederschlägen, besonders für den Kurzumtrieb geeignet.

Die im Vergleich zu anderen Waldbaumarten hohen standörtlichen Ansprüche schnell wachsender Baumarten werden durch art- und klonspezifische Pflanzeigenschaften modifiziert. Darüber hinaus kann die Anlage von Kurzumtriebsplantagen aber auch auf weniger geeigneten Flächen und mit weniger ertragreichen Baumarten sinnvoll sein, wenn sich wirtschaftliche Rahmenbedingungen (ökonomisch interessante Biomasseerträge) ändern oder durch Baumpflanzungen Synergieeffekte mit anderen Landnutzungsansprüchen, z.B. Boden- und Naturschutz, ergeben.

### 3.3.2 Standortsansprüche schnellwachsender Baumarten

#### 3.3.2.1 Pappel (*Populus ssp.*)

##### Sorten, Standortsansprüche

Die Gattung *Populus* zählt zur Familie der Weidengewächse (*Salicaceae*) und umfasst weltweit 29 Arten, die in 6 Sektionen eingeteilt werden (Klassifikation nach ECKENWALDER 1996). Für die Kurzumtriebswirtschaft von Bedeutung sind Pappeln aus den Sektionen *Aigeiros* (Schwarzpappeln), *Tacamahaca* (Balsampappeln) und *Leuce* (Aspen).

Pappelarten aus diesen Sektionen unterscheiden sich sehr deutlich hinsichtlich Wachstum, Wurzelentwicklung und Standortsansprüchen (Tab. 3.3.2-1).

**Tab. 3.3.2-1: Bedeutsame Pappelarten für den Kurzumtrieb**, deren natürliche Vorkommen und Ansprüche an den Standort

	<i>Aigeiros</i> (Schwarzpappel)	<i>Tacamahaca</i> (Balsampappel)	<i>Leuce</i> (Aspe)
Beispielarten (natürliche Verbreitung)	- <i>P. nigra</i> (Europa) - <i>P. deltoides</i> (Nordamerika) - <i>P. x euramericana</i> (natürliche Hybridisierung)	- <i>P. maximowiczii</i> (Ostasien) - <i>P. trichocarpa</i> (Nordostamerika) - <i>P. balsamifera</i> (Nordamerika)	- <i>P. tremula</i> (Europa, Westasien, Nordafrika) - <i>P. tremuloides</i> (Nordamerika)
Bevorzugter natürlicher Standort	Bach- und Flussauen	weite Amplitude	lichte Wälder, Weg- und Waldränder, Brachflächen
Lichtanspruch	hoch	mittel bis hoch	hoch
Temperaturanspruch	hoch	mittel	gering
Nährstoffbedarf	hoch	hoch	gering bis mittel
Wasserverfügbarkeit	hoch	hoch	mittel
Besonderheiten	auch wechselfeuchte Standorte	auch wechselfeuchte Standorte, windanfällig (Trieb- und Kronenbrüche)	keine Staunässe, keine Stecklingsbewurzelung, geringere Ertragsleistung, späte Zuwachskulmination

Mehr als 60 verschiedene Klone, die aus Züchtungen mit den in Tab. 3.3.2-1 genannten Pappelarten hervorgingen, sind nach dem Forstvermehrungsgutgesetz in Deutschland zugelassen (BLE 2008). Davon sind jedoch nach den bisherigen Erfahrungen in Deutschland nur wenige Pappelklone für den Kurzumtrieb geeignet (Auswahl in Tab. 3.3.2-2), da zum Beispiel Hybridklone aus den Kreuzungspartnern *P. deltoides* x *P. trichocarpa* (z.B. Beaupré) häufig von Pilzen befallen werden (SCHILDBACH ET AL. 2009). Für den Anwuchserfolg ist eine ausreichende Wasserversorgung in den ersten beiden Vegetationsperioden nach der Pflanzung notwendig. Während der Vegetationszeit (Mai - September) müssen auf Standorten mit rein terrestrischen Böden (d.h. ohne Stau- oder Grundwassereinfluss) für das Erreichen wirtschaftlich interessanter Zuwächse mindestens 300 mm Niederschlag fallen ( $600 \text{ mm a}^{-1}$ ), verbunden mit einer günstigen Wasserspeicherfähigkeit des Bodens (nutzbare Feldkapazität  $>150 \text{ mm}$ ). Eine schnelle Bodenerwärmung (gut durchlüftete Böden) im Frühjahr ist günstig zu beurteilen, da die Wurzelentwicklung bei Schwarzpappeln erst ab  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  Bodentemperatur beginnt und überdurchschnittliches Wurzelwachstum bei vielen Schwarz- bzw. Balsampappelhybriden ab  $14 \text{ }^\circ\text{C}$  beobachtet wurde (LYR 1996, ZALESNY et al. 2005). Allgemein gilt, dass auf warmen, gut wasserversorgten Standorten mit schwach sauren bis alkalischen Böden (optimaler pH 5,5 - 7,0) die höchsten Erträge erzielt werden. Die Ergebnisse aus aktuellen Anbauversuchen in verschiedenen Regionen Deutschlands sowie Österreich zeigen, dass neben den zugelassenen Sorten weitere Klone wirtschaftlich interessante Zuwachslösungen erbringen.

**Tab. 3.3.2-2: Für den Kurzumtrieb besonders geeignete Pappelklone (in Deutschland zugelassene Klone fett gedruckt)**

Art	Sorten- bzw. Klonbezeichnung	Besonderheiten
<i>P. nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i>	<b>Max<sup>a-e</sup></b> , Kamabuchi <sup>b,c</sup> , <b>(Rochester)</b>	mittleres bis überdurchschnittliches Wachstum vor allem auf warmen Standorten ( $> 8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ Jahresmitteltemperatur), windanfällig
<i>P. maximowiczii</i> x <i>P. trichocarpa</i>	Matrix <sup>d</sup> , <b>Androscoggin<sup>a-e</sup></b> , <b>Hybride 275 (NE 42)<sup>a-e</sup></b> , 10/85 <sup>a</sup>	mittleres Wachstum auf allen Standorten, Hybride 275 und Matrix mit überdurchschnittlichem Wachstum vor allem auf kühleren und feuchten Standorten
<i>P. trichocarpa</i>	<b>Muhle Larsen<sup>a-e</sup></b> , <b>Fritzi Pauley<sup>b,e</sup></b> , Scott-Pauley <sup>e</sup> , Trichobel <sup>b,d</sup>	mittleres Wachstum auf allen Standorten
<i>P. trich.</i> x <i>P. koreana</i> x <i>P. maximowiczii</i>	Koreana <sup>a,e</sup>	bei 2. Ernte im 6-jährigem Umtrieb überdurchschnittliches Wachstum
<i>P. szechuanica</i> x <i>P. trichocarpa</i>	31/84 <sup>a</sup> , 30/84 <sup>a</sup> , 22/84 <sup>a</sup>	überdurchschnittliches Wachstum auf einer Fläche in Mecklenburg-Vorpommern

Quellen: a) BOELCKE 2007, b) LIEBHARD 2007, c) RASCHKA 1997, d) SCHILDBACH et al. 2009a, 2009b, e) SCHOLZ et al. 2006)

### Bewässerung

Wenn die betrieblichen Voraussetzungen gegeben sind, kann die Bewässerung von Kurzumtriebsplantagen eine sinnvolle Maßnahme v.a. für die Reduktion des Ausfallrisikos durch Trockenheit während der Anwuchsphase (1. und 2. Standjahr) sein. Denn durch die erst nach der Pflanzung einsetzende Bewurzelung von Stecklingen kann der im Boden gespei-

cherte Wasservorrat noch nicht voll erschlossen werden. Im Allgemeinen ist die Bewässerung von Kurzumtriebsplantagen zur Ertragssteigerung jedoch nicht zu empfehlen, da Pappeln eine im Vergleich zu Ackerkulturen ungünstige Wassernutzungseffizienz aufweisen, die sich zudem mit zunehmenden Wasserangebot weiter verschlechtert (BUNGART & HÜTTL 2004).

### Düngung

Aus den bisherigen Untersuchungen geht hervor, dass Pappelplantagen auf vormals landwirtschaftlich genutzten Flächen (v.a. Ackernutzung) auch nach mehreren Jahren noch keine Defizite in der Nährstoffversorgung aufweisen (JUG ET AL. 1999, KAHLE ET AL. 2007). Auf Flächen mit ungünstiger Nährstoffausstattung, wie Rekultivierungsflächen in Bergbaufolgelandschaften (BUNGART & HÜTTL 2004), Grenzertragsstandorten oder nach mehreren Rotationsfolgen sind Düngegaben in Betracht zu ziehen. Dafür ist aber vorher das Nährstoffangebot durch Boden- bzw. Blattanalysen zu überprüfen. Wertebereiche für eine optimale Nährstoffversorgung mit den wichtigsten Elementen sind in Tab. 3.3.2-3 gegeben. Zu beachten ist, dass die Blattprobennahme aus dem oberen Kronenraum bei voller Blatentwicklung (Zeitraum August) erfolgen soll. Auch eine schlechte Wasserversorgung wirkt sich ungünstig auf Nährstoffaufnahme und damit die Blattelementgehalte aus.

**Tab. 3.3.2-3: Wertebereich der Blattelementgehalte** (mg g<sup>-1</sup> TM) für die optimale Ernährung von Balsampappeln und intersektionellen Hybriden mit Schwarzpappel im Kurzumtrieb (Jug et al. 1999)

N	P	K	Ca	Mg
17 - 25	1,6 - 5,9	>8	6,0 - 15,1	1,5 - 3,0

### 3.3.2.2 Weide (*Salix ssp.*)

#### Sorten, Standortsansprüche

Die Gattung *Salix* aus der Familie der Weidengewächse (*Salicaceae*) setzt sich aus rund 500 Arten zusammen, die überwiegend in den gemäßigten und kühleren Zonen der Nordhalbkugel vorkommen (ROLOFF & BÄRTELS 1996). Für die Leistungsverbesserung in umfangreichen Zuchtprogrammen kommen rund 10 bis 15 Weidenarten bzw. deren häufige Bastardisierungen zur Anwendung, z.B. *S. viminalis* (Korbweide), *S. schwerinii*, *S. x dasyclados* (Filzastweide), *S. x rubens* (Fahlweide). Tab. 3.3.2-4 stellt einige Weidensorten für KUP dar.

Insgesamt bleiben die Ertragsleistungen der Weidenklone auf gleichen Standorten jedoch hinter denen der Pappel zurück (RASCHKA 1997, RÖHLE ET AL. 2009). Für die meisten Weidensorten sind mittlere Jahrestemperaturen von über 6,5 °C notwendig. Wie Pappeln zeichnen sich auch Weiden durch einen hohen Wasserverbrauch aus. Für hohe Erträge müssen deshalb in der Vegetationszeit mehr als 300 mm Niederschläge (> 600 mm/Jahr) fallen oder Grundwasseranschluss bei ausreichender Durchwurzelungstiefe (> 40 cm). Staunasse und wechselfeuchte Standorte sind ungünstig. Weiden haben im Vergleich zu Pappeln einen höheren Stickstoffbedarf, der in den ersten Jahren auf den meisten landwirtschaftlichen Flächen jedoch gedeckt werden kann (JUG et al. 1999, KAHLE et al. 2007).

**Tab. 3.3.2-4: Für den Kurzumtrieb besonders geeignete Weidenklone** (mit europäischen Sortenschutz belegte Klone fett gedruckt)

Art	Sorten- bzw. Klonbezeichnung	Besonderheiten
<i>Salix viminalis</i>	<b>Jorr</b> <sup>a-d</sup> , Zieverich <sup>e,f</sup>	ertragsstark, Jorr etwas frostempfindlich
<i>Salix dasyclados</i>	<b>Gudrun</b> <sup>d,e</sup> ,	langsame Entwicklung in der Jugend, jedoch hohe Frosttoleranz
<i>S. schwerinii</i> x <i>S. viminalis</i>	<b>Tora</b> <sup>a-e</sup>	Buschartiges Wachstum, ertragsstark, auch in kühlerem Klima, relativ frosttolerant
<i>S. (schwerinii</i> x <i>S. viminalis)</i> x <i>S. viminalis</i>	<b>Tordis</b> <sup>a-d</sup> , <b>Sven</b> <sup>d,e</sup>	Ertragsstark

a) LIEBHARD 2007, b) SCHILDBACH et al. 2009, c) SCHOLZ et al. 2006 d) ANONYM 2009 e) Röhricht 2008 f) Boelcke 2006

### Bewässerung

Wie bei Pappel kann eine zusätzliche Bewässerung im Anlagejahr sinnvoll sein.

Ein relativ neuer Ansatz für die Nutzung von Weidenplantagen ist die Kombination von Biomasseproduktion und biologischer Klärung von nährstoffreichen Abwässern (BÖRJESSON & BERNDES 2006).

### Düngung

Weiden zeichnen sich durch einen höheren Stickstoffbedarf aus und reagieren mit Zuwachsverlusten, wenn Blattelementgehalte unterschritten werden (Tab. 3.3.2-5). Für Weidenplantagen sind Ausgleichsdüngungen deshalb eher in Betracht zu ziehen. Wenn eine Stickstoffzufuhr notwendig ist, wird die Verwendung von organischem Dünger empfohlen. Die Ausbringung sollte jeweils nach Ende des Rotationszyklus erfolgen, durch die erst beginnende Wurzelentwicklung und damit verbundene geringe Aufnahmefähigkeit sowie die mögliche Förderung von Unkräutern (Verdämmungsgefahr) jedoch nicht im Pflanzjahr (SCHOLZ ET AL. 2006).

**Tab. 3.3.2-5: Wertebereich der Blattelementgehalte** (mg g<sup>-1</sup> TM) für die optimale Ernährung von Weide im Kurzumtrieb (Jug et al. 1999)

N	P	K	Ca	Mg
> 30	>2,1	15-21	5-15	2-3

### 3.3.2.3 Robinie (*Robinia pseudoacacia* L.)

Die Robinie aus der Familie der Hülsenfrüchtler (*Fabaceae*) stammt ursprünglich aus dem östlichen Nordamerika mit humiden Klima und hohen Niederschlägen. Nach Europa und Deutschland gelangte sie im 17. Jahrhundert und wurde zunächst in Parks später aber auch als Forstbaumart gezielt angebaut. Sie unterliegt dem Forstvermehrungsgutgesetz. Eine züchterische Bearbeitung speziell für den Kurzumtrieb ist bisher noch nicht erfolgt. Für die Kurzumtriebswirtschaft ist die Robinie jedoch interessant, weil sie auch auf ärmeren und trockenen Standorten, die für Pappel und Weide ausscheiden, noch gute Wuchsleistungen erzielt. Die Robinie bevorzugt jedoch warme Standorte (Tab. 3.3.2-6).

**Tab. 3.3.2-6: Standortsansprüche der Robinie**

<i>Robinia pseudoacacia</i> (Robinie)	
Bevorzugter natürlicher Standort	Pionierbaumart auf Ruderalflächen
Licht	hoch
Temperatur	hoch
Nährstoffbedarf	gering
Wasserbedarf	gering
Besonderheiten	keine extremen Trockenstandorte, keine Staunässe, ausreichende Durchwurzelungstiefe

### 3.3.2.4 Sonstige für den Kurzumtrieb geeignete Baumarten

Neben den ertragreichen Baumarten und Sorten weisen auch andere Baumarten den für eine Kurzumtriebsbewirtschaftung notwendigen Stockausschlag auf. In der Ertragsleistung bleiben sie jedoch hinter Pappel und Weide zurück. Alternative, heimische Baumarten können jedoch bei besonderen Standortsbedingungen sowie bei zu erwartenden positiven Wirkungen für den Bodenschutz (Erosion) oder den Naturschutz interessant sein (Tab. 3.3.2-7). Der Übergang von der kleinflächigen Kurzumtriebswirtschaft für die Bereitstellung von Biomasse zur historischen Niederwaldwirtschaft oder anderen agroforstlichen Landnutzungssystemen ist dabei fließend.

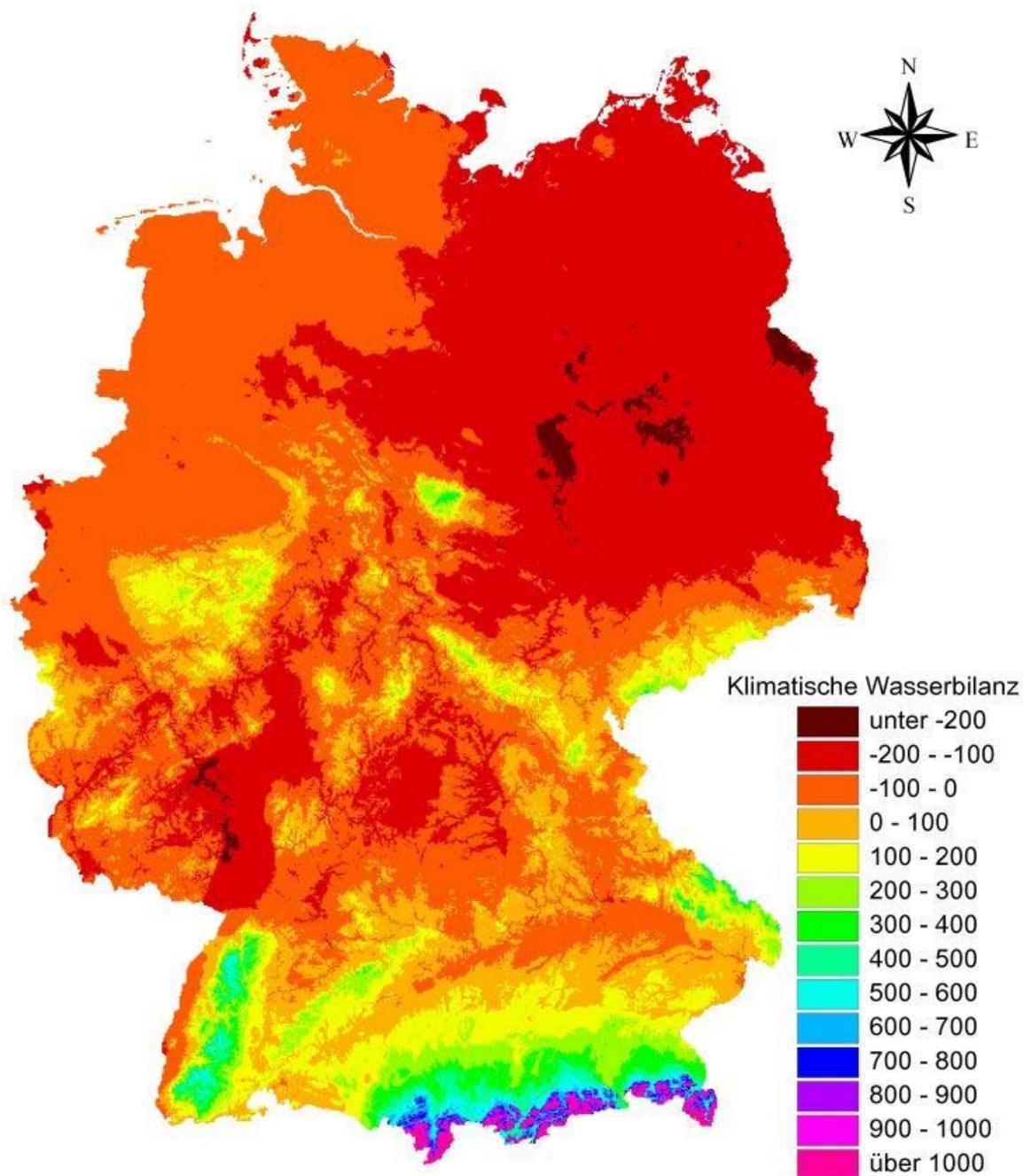
**Tab. 3.3.2-7: Standortsansprüche ausgewählter sonstiger Baumarten für den Kurzumtrieb**

Standort, Standortsansprüche	<i>Alnus glutinosa</i> (Schwarzerle)	<i>Betula pendula</i> (Sandbirke)	<i>Sorbus aucuparia</i> (Vogelbeere)
Bevorzugter natürlicher Standort	Brücher, Auen, Bachläufe	Pionierbaumart auf fast allen Standorten	Vorwaldbaumart in planaren bis subalpinen Bereich
Licht	hoch	hoch	mittel
Temperatur	gering - mittel	gering	gering
Nährstoffbedarf	hoch	gering	gering bis mittel
Wasserverfügbarkeit	hoch	mittel - gering	gering bis mittel
Besonderheiten	erträgt Staunässe jedoch keine lang anhaltende Überflutung	frosthart, emissionsresistent,	frosthart

### 3.3.3 Abschätzung von regionalen Standortspotenzialen

Für die Auswahl von geeigneten Regionen und Standorten für die Anlage von Kurzumtriebsplantagen werden die Standortsansprüche der interessierenden Baumarten mit den verfügbaren digitalen Informationen zu Klima, Lage und Boden verschnitten. Die Bewertung der klimatischen Standortseigenschaften basiert dabei meist auf klimatologischen Flächendaten. Dabei handelt es sich meist um Rasterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die auf der Regionalisierung von Mittelwerten aus langjährigen Wetterbeobachtungen beruhen. Aus

den Jahres-, besser Monatsmittelwerten von Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit werden häufig für eine bessere Interpretation die Potenzielle Verdunstung (*ETP*) bzw. Klimatischen Wasserbilanz abgeleitet. Die *ETP* oder Grasreferenzverdunstung stellt die Verdunstung einer standardisierten Grasbestandes auf einheitlichem Boden bei optimaler Wasserversorgung dar. Berechnungen des DWD beruhen in der Regel auf der empirisch ermittelten Beziehung nach Wendling (1995). Die Differenz aus korrigiertem Niederschlag und Grasreferenzverdunstung ergibt die Klimatische Wasserbilanz, die auch als Trockenindex interpretiert werden kann (Abb. 3.3.1-1).



**Abb. 3.3.3-1: Klimatische Wasserbilanz** (mm) während des Sommerhalbjahres (April-September), abgeleitet aus Rasterdaten des DWD (Messperiode 1971-2000)

Regionen mit deutlicher Sommertrockenheit befinden sich in der Oberrheinischen Tiefebene sowie flächendeckend im Nordosten Deutschlands (Abb. 3.3.3-1). Baumarten mit hohem Wasserbedarf sollten hier nur auf Standorten mit oberflächennahem Grundwasser angebaut werden. Durch die in diesen Regionen sehr hohe potentielle Verdunstung und Jahresmitteltemperaturen von über 8,5 °C, sind hier bei maximaler Wasserverfügbarkeit jedoch die höchsten Biomasseerträge zu erwarten. Die höheren Lagen der Mittelgebirge scheiden aufgrund von Jahresmitteltemperaturen unter 6,5 °C für die Anlage von Kurzumtriebsanlagen aus.

Die Abschätzung der bodenbürtigen Wasserverfügbarkeit erfolgt über standardisierte Verarbeitung bodenphysikalischer Informationen aus Bodenkarten (AD-HOC- ARBEITSGRUPPE BODEN 2005). Zielgrößen sind dabei die Wasserspeicherkapazität (nutzbare Feldkapazität) im Wurzelraum und die mögliche kapillare Aufstiegsrate aus dem Grundwasser, zusammen auch als „natürliche Bodenfruchtbarkeit“ bezeichnet.

Die natürliche Bodenfruchtbarkeit modifiziert das Ertragspotenzial von Kurzumtriebsplantagen vor allem in Regionen mit geringer klimatischer Variation (Nordostdeutschland), während der Klimaeinfluss in den Übergangsregionen vom Tiefland in die unteren Lagen der Mittelgebirge stärker ist (Abb. 3.3.3-1).

In der Praxis wird in vielen Fällen auch die Ackerzahl (syn. Ackerwertzahl, Bodenpunkte) für die Standortbewertung herangezogen. Die Ackerzahl kann Werte von 7 bis 100 annehmen und ist die durch Zu- oder Abschläge für Klima, Hangneigung, Exposition und andere Wert beeinflussende Faktoren korrigierte Bodenzahl. Die Bodenzahl wiederum stellt die relative Wertzahl (Reinertrag einjähriger Ackerfrüchte) aufgrund von Bodenart (Profiltiefe 1 m), Entstehungsart und Zustand dar (BodSchätzG\*). Bei der Verwendung der Ackerzahl ist deren Aktualisierungsstand - die Hauptzeit der Bodenschätzung lag zwischen 1934 und 1955 - v.a. aber das unterschiedliche Durchwurzelungsverhalten von Baumarten, besonders im Zusammenhang mit Grundwasserflurabständen zu berücksichtigen.

Bei der Entwicklung standortbasierter Ertragsfunktionen für die Kurzumtriebswirtschaft sollten sowohl die spezifischen Standortansprüche schnellwachsender Baumarten berücksichtigt, als auch alle verfügbaren klimatologischen und bodenphysikalischen Informationen genutzt werden (vgl. MURACH et al. 2009, RÖHLE et al. 2010).

#### 3.3.4 Zusammenfassung

Ökonomisch interessante Zuwächse von über 8 bis 10  $t_{\text{atro}} \text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  werden von schnellwachsenden Baumarten, insbesondere intersektionellen Hybriden der Schwarzpappel sowie Weiden, im Vergleich zur forstlichen Standortklassifikation nur auf besseren Standorten erreicht. Solche Flächen sind geprägt durch eine gute Nährstoffausstattung, ausreichend Wärme sowie hohe klima- bzw. bodenbedingte Wasserverfügbarkeit. Dabei kann die Berücksichtigung von klon- und sortenspezifischen Standortansprüchen bei der Anlage von KUP die Ertragsleistung und -sicherheit weiter verbessern.

---

\* Gesetz zur Schätzung des landwirtschaftlichen Kulturbodens (Bodenschätzungsgesetz). Artikel 20 G.v. 20.12.2007 BGBl. I S. 3150, 3176; Geltung ab 01.01.2008

Auf ungünstigeren Standorten ist ein wirtschaftlich interessantes Baumwachstum oft nicht gewährleistet. Jedoch existieren weitere Baumarten, wie z.B. Robinie, die unter trockenen und nährstoffarmen Bedingungen eine Alternative darstellen.

Durch den hohen Wasserbedarf von KUP bei gleichzeitig hohem Wärmeanspruch weisen die Regionen in der Oberrheinischen Tiefebene oder in weiten Teilen Nordostdeutschlands ein hohes Ertragspotenzial auf, jedoch nur auf Standorten mit Grundwasseranschluss. Günstige Wuchsbedingungen sind auch in den Übergangsbereichen vom trockenen, warmen Tiefland zu den unteren feuchten Lagen der Mittelgebirge zu erwarten.

### 3.3.5 Literatur

- AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Auflage. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung Hannover. 438 S.
- ANONYM (2009) Weidensorten von Agrobränsle AB. Internetabruf vom 28.04.2009, [www.agrobransle.se](http://www.agrobransle.se)
- BLE – Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2008) Zugelassene Klone und Klonmischungen der Pappel (*Populus ssp.*). Informationsblatt (Stand Januar 2008). Bonn
- BOELCKE, B. (2006) Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen. Leitfaden zur Energieerzeugung. Schwerin. 36 S.
- BOELCKE, B. (2007) Zur Sortenfrage schnell wachsender Baumarten im Kurzumtrieb. Mitt. Der Landesforschungsanstalt Für Landw. und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern 37. 41-46
- BÖRJESSON, P., BERNDIS, G. (2006) The prospects for willow plantations for wastewater treatment in Sweden. *Biomass and Bioenergy* 30/5. 428-438
- BUNGART, R., HÜTTL (2004) Growth dynamics and biomass accumulation of 8-year-old hybrid poplar clones in short-rotation plantation on a clayey-sandy mining substrate with respect to plant nutrition and water budget. *European Journal of Forest Research* 123/2:105-115
- ECKENWALDER, J.E. (1996) Systematics and evolution of *Populus*. In: STETTLER, R.F., BRADSHAW, H.D., HEILMAN, P.E., HINCKLEY, T.M. (Hrsg): *Biology of Populus and its implications for management and Conservation*. NRC Research Press Ottawa, 7-30
- GRANIER, A., LOUSTAU, D., BREDÁ, N. (2000) A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. *Ann. For. Sci.* 57. 755–765
- JUG A., HOFMANN-SCHIELLE C., MAKESCHIN F., REHFUESS K.E. (1999) Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willow on former arable land in the Federal Republic of Germany. II. Nutritional status and bioelement export by harvested shoot axes. *For Ecol Manage* 121:67–83
- KAHLE, P., HILDEBRAND, E., BAUM, C., BOELCKE, B. (2007) Long-term effects of short rotation forestry with willows and poplar on soil properties. *Archives of Agronomy and Soil Science* 53/6: 673-682
- LIEBHARD, P. (2007) Energieholz im Kurzumtrieb – Rohstoff der Zukunft. Leopold Stocker Verlag. Graz. 123 S.

- LYR, H. (1996) Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. *Ann. Sci. For.* 53: 317-323
- MURACH, D., HARTMANN, H., MURN, Y., SCHULTZE, M., ALI, W., RÖHLE, H. (2009) Standortbasierte Leistungsschätzung in Agrarholzbeständen in Brandenburg und Sachsen. In: REEG, T., BEMMANN, A., KONOLD, W., MURACH, D., SPIECKER, H. (Hrsg) *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH. Weinheim, 29-40
- PETZOLD, R., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2009) Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: REEG, T., BEMMANN, A., KONOLD, W., MURACH, D., SPIECKER, H. (Hrsg) *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH. Weinheim. 181-191
- RASCHKA, H.D. (1997) Forstliche Biomasseproduktion im Kurzumtrieb. Abschlußbericht des Forschungsprojektes P/2/24-„Versuche für die Produktion forstlicher Biomasse-Kurzumtriebsversuche“. FBVA-Bericht Nr. 97. Wien 29 S.
- RÖHLE, H., HARTMANN, K.U., STEINKE, C., MURACH, D. (2009) Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsplantagen. In: REEG, T., BEMMANN, A., KONOLD, W., MURACH, D., SPIECKER, H. (Hrsg) *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH. Weinheim. 181-191
- RÖHLE, H., ALI, W., HARTMANN, K.U., STEINKE, C. (2010) Wachstum und Biomasseproduktion schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb. In: BEMMANN, A. & KNUST, C. (Hrsg): *AGROWOOD -Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Weißensee Verlag Berlin, S. 103 – 116
- RÖHRICHT, C. (2008) Anbauergebnisse mit schnellwachsenden Baumarten. Tagung AG Nachwachsende Rohstoffe vom 23.-24.06.2008 Leipzig. Internetabruf vom 28.04.2009 [www.smul.sachsen.de/landwirtschaft/download/Kurzumtrieb\\_SMUL.pdf](http://www.smul.sachsen.de/landwirtschaft/download/Kurzumtrieb_SMUL.pdf)
- ROLOFF, A., BÄRTELS, A. (1996) Gehölze – Bestimmung, Herkunft und Lebensbereiche, Eigenschaften und Verwendung. *Gartenflora Band 1*. Verlag Eugen Ulmer Stuttgart 694 S.
- SCHILDBACH, M., GRÜNDEWALD, H., WOLF, H., SCHNEIDER, B.U. (2009a) Begründung von Kurzumtriebsplantagen: Baumartenwahl und Anlageverfahren. In: REEG, T., BEMMANN, A., KONOLD, W., MURACH, D., SPIECKER, H. (Hrsg) *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH. Weinheim. 57-71
- SCHILDBACH, M., WOLF, H., BÖHNISCH, B. (2009b): 10 Jahre Pappelanbau zur Papierherstellung – eine Bilanz. *AFZ/DerWald* (im Druck)
- SCHOLZ, V., BOELCKE, B., BURGER, F., HOFMANN, M., VETTER, A. (2006) Produktion von Pappeln und Weiden auf landwirtschaftlichen Flächen. Merkblatt KTBL-Datensammlung Energiepflanzen. Potsdam-Bornim. 12 S.
- WENDLING, U. (1995) Berechnung der Gras-Referenz-Verdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung. *Wasserwirtschaft* 85, 602-604
- ZALESNY, R.S.JR., HALL, R.B., BAUER, E.O., RIEMENSCHIEDER, D.E. (2005) Soil temperature and Precipitation Affect the Rooting Ability of Dormant Hardwood Cuttings of Populus. *Silvae Genetica* 54/2: 47-58

## 4 Methodologie

### 4.1 Vorbemerkung

Die im Rahmen der Dissertation durchgeführten Arbeiten verfolgten das Ziel, die in Kapitel 1.4 genannten Forschungsvorhaben aus standortkundlicher Sicht wissenschaftlich zu begleiten. Die Methodologie wurde dreistufig aufgebaut und bestand aus der Gewinnung von Messdaten, der Modellierung und Generalisierungen für die praktische Umsetzung wissenschaftlicher Erkenntnisse.

Zunächst wurden die ökologischen Aspekte (Wasser- und Nährstoffhaushalt) am Beispiel eines Standorts und eines Pappelklons experimentell und laboranalytisch quantifiziert. Darauf aufbauend wurde mittels prozessorientierter Modellierung eine Übertragung der Messergebnisse zum Standortwasserhaushalt auf nicht untersuchte Zeiträume und Standorte vorgenommen. Schließlich wurde die Ausweisung standörtlicher Ertragspotenziale mit Aspekten des Boden-, Natur- und Landschaftsschutzes als räumlicher Planungsansatz für die Praxis kombiniert.

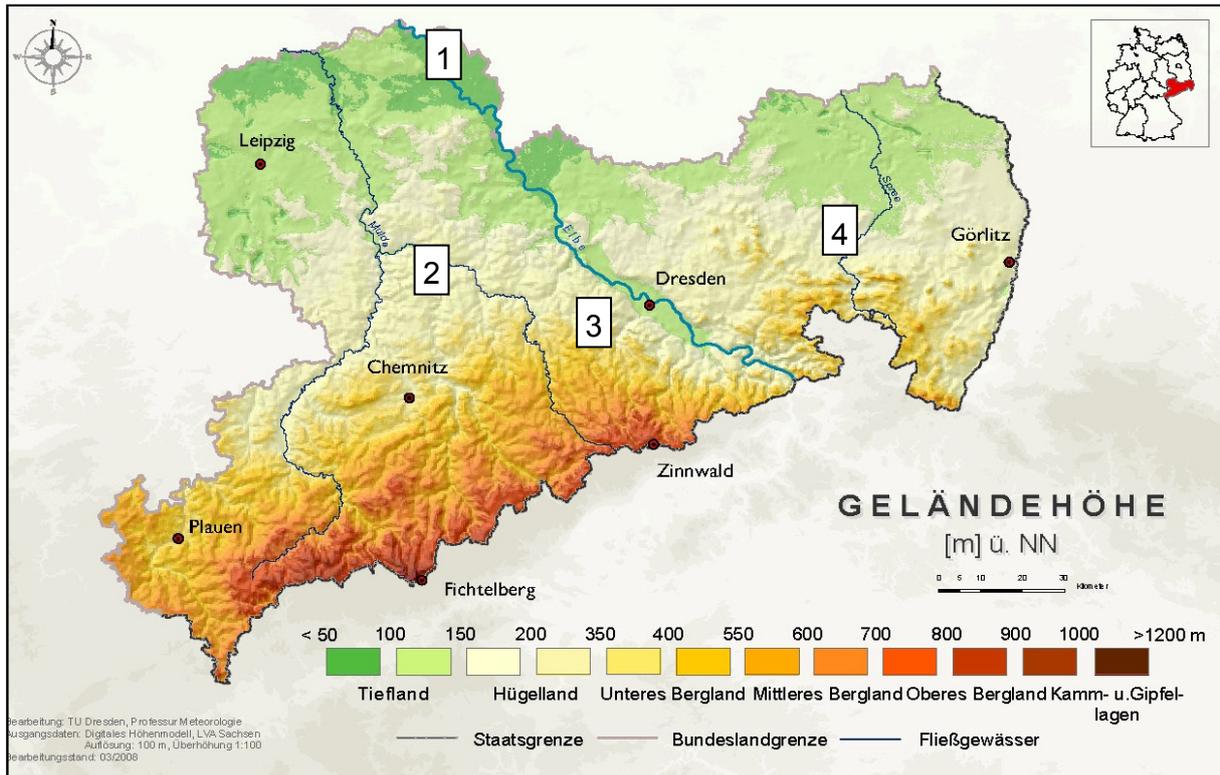
### 4.2 Erhebung empirischer Daten für die Darstellung ökologischer Zusammenhänge auf Standortebene

#### 4.2.1 Auswahl der Untersuchungsfläche

Der erste Teil der vorliegenden Dissertation wurde im Rahmen des Verbundprojektes AGROWOOD (2010) erarbeitet. Für die Durchführung experimenteller Feldstudien zum Wasserhaushalt sowie zu bodenökologischen Aspekten musste zunächst eine geeignete Fläche identifiziert werden. Dabei waren auch die organisatorischen und finanziellen Rahmenbedingungen in AGROWOOD (2010) zu berücksichtigen. Aus wissenschaftlicher Sicht sollte die Fläche folgende Kriterien erfüllen:

- typischer landwirtschaftlicher Standort in der Projektregion (Mittelsachsen),
- etablierte Pappelplantage hinreichender Größe mit voller Produktivität (Zuwachs),
- Verwendung praxisrelevanter Pappelklone,
- vorhandene Dokumentation zu Flächenbehandlung und Bestandesgeschichte,
- Lage in der Nähe einer Wetterstation mit langjährigen Messdaten.

Mit einer Pappelplantage nahe des kleinen Ortes Methau, Gemeinde Zettlitz (Abb. 4.2.1-1) im mittelsächsischen Lösshügelland wurde ein Standort gefunden, der diesen Kriterien in idealer Weise entsprach. Bei dieser Fläche handelt es sich um einen typischen, bis zur Plantagenanlage ackerbaulich genutzten Standort mit einer Ackerwertzahl von 67. Die Plantage wurde 1999 im Rahmen des Modellvorhabens „StoraEnso/Verbundvorhaben - Pappelanbau für die Papierherstellung“ vom sächsischen Landesforstpräsidium als Versuchsfläche auf einer Fläche von insgesamt 13,4 ha angelegt (vgl. WOLF & BÖHNISCH 2004).



**Abb. 4.2.1-1: Untersuchungsstandorte in Sachsen:** 1 Köllitzsch (Tiefland), 2 Methau, Versuchsfläche & Modellierung (Hügelland), 3 Tharandt (unteres Erzgebirge), 4 Pommritz (Lausitzer Hügelland); Die Standorte 1, 3 und 4 wurden ausschließlich im Rahmen von Modellstudien untersucht (vgl. Kapitel 5.2.2). (Kartengrundlage: TU Dresden, Professur Meteorologie)

Im Blockdesign á 1000 m<sup>2</sup> wurden in verschiedenen Wiederholungen und Varianten (Pflanzverband, Flächenbehandlung) zehn verschiedene Pappelhybride und zwei Aspensorten angebaut (siehe Abb. 4.2.1-2). Mit dem Abschlussbericht von WOLF & BÖHNISCH (2004) liegt eine ausführliche Flächen- und Bestandesdokumentation vor. Sie enthält neben ertragskundlichen Aspekten auch Hinweise zur bodenökologischen Entwicklung und zur Höhe von Kationen- und Stickstoffkonzentrationen im Sickerwasser. Schließlich befindet sich in Methau - etwa 2000 m Luftlinie von der Versuchsfläche entfernt und ähnlich exponiert wie der Versuchsbestand - eine Wetterstation des agrarmeteorologischen Messnetzes des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.



**Abb. 4.2.1-2:** Luftbild der Pappelplantage in Methau II (rot umrandet), P = untersuchte Parzelle mit dem Klon *Populus maximowiczii x nigra*, A = konventionell bewirtschaftete Ackerfläche für bodenökologische Vergleichsuntersuchungen (Luftbild von 2006 des Staatsbetriebs für Geoinformationen und Vermessung, Erlaubnisnr. 13244/10)

#### 4.2.2 Messkonzept Wasserhaushalt

Der Messaufbau für die Untersuchung des Wasserhaushalts diente der Quantifizierung der Wasserflüsse sowie der steuernden Umweltvariablen im Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuum. Neben der flächenbezogenen Auswertung der Messdaten sollten die gewonnenen Zeitreihen und weitere erfasste Variablen der Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung eines numerischen Wasserhaushaltsmodells dienen. Für beide Ansätze waren Messungen von Prozess- und Zustandsgrößen in den drei Subsystemen Boden, Pflanze und Atmosphäre, teilweise über einen längeren Zeitraum (Monitoring), notwendig (vgl. Abb. 4.2.2-1).



**Abb. 4.2.2-1: Versuchsaufbauten zur Erfassung von Komponenten des Standortwasserhaushalts**, links oben: Interzeptionsrinne zur Erfassung des Bestandesniederschlags (ohne Stammabfluss), links unten: Einbau von TDR-Sonden im Bodenprofil zur Erfassung der Bodenfeuchtedynamik, rechts: Saftflussmodul zur Abschätzung der Transpiration am Einzelbaum

Für die zeitlich hochauflösende Aufzeichnung des Bodenwassergehaltes in verschiedenen Tiefen wurde ein Bodenprofil im Messplot mit TDR-Sonden ausgestattet. Auch bei exakter Anwendung des Messverfahren und regelmäßiger Wartung der Messgeräte können unter Feldbedingungen Fehler und Störgrößen nie ganz ausgeschlossen werden. Aus diesem Grund wurden nach dem Prinzip der analytischen Redundanz für einige Messgrößen zusätzlich unabhängige Messverfahren angewendet, um die erhobenen Daten zu validieren. Zusätzliche Messungen, insbesondere zum Bodenwasserhaushalt, dienten zur Absicherung der Repräsentativität der am Bodenprofil gewonnenen Informationen für den gesamten Messplot.

In Tab. 4.2.2-1 sind alle durchgeführten Untersuchungen dargestellt. Bei den eingesetzten Sensoren handelt es sich überwiegend um kommerziell erhältliche Geräte. Es wurde bei der Auswahl auf robuste Messverfahren im Verbund mit leistungsfähiger Software für die Analyse der Rohdaten (z.B. Saftflussmessung) geachtet. Nur für die Erfassung des Bestandesniederschlags (throughfall) war ein Eigenbau (Interzeptionsrinne) notwendig, da keine geeignete Lösung im Handel verfügbar war.

**Tab. 4.2.2-1: Angewendete Messverfahren** zur Bestimmung von Zustands- und Prozessgrößen des Wasserhaushalts auf Standortebene (Methau)

Messgröße	1. Verfahren, Messort und -intervall	2. Verfahren, Messort und -intervall	3. Verfahren, Messort und -intervall
<u>Boden:</u>			
Wassergehalt	TDR-Trime (IMKO) am Leitprofil; in 5, 20 und 45 cm, stündlich, 2006-2008	TDR-Trime PR3 (IMKO); an 10 Messrohren in Stufen bis 100 cm Bodentiefe, wöchentlich, 2007	TDR-FP/m (EasyTest) an zwei Messplätzen, stündlich (Austrocknungsversuch 2008)
Bodensaugspannung	Einstichtensiometer, Leitprofil und Transekt in 5, 30, 45, 60 und 100 cm Tiefe; wöchentlich, 2007-2008	Gipsblocksonden (Delmhorst), unter 5 Bäumen in 20, 30, 45 cm Tiefe; wöchentlich, 2007	Dämmerungs-Blattwasserpotenzial mit Scholanderbombe (UMS), 3 Blätter aus dem oberen Kronenraum von 3 Bäumen, monatlich, 2007
Bodenphysik-Parameter (Mualem-Genuchten – <i>MvG</i> )	Entnahme von Stechzylindern, pF-Kurve und ku-Funktion im Labor, Anpassung der <i>MvG</i> -Parameter mit der Software RETC	Körnungsanalyse (KÖHN), Schätzung <i>MvG</i> -Parameter über Pedotransferfunktion (ZACHARIAS & WESSOLEK 2007; KA5 )	
<u>Pflanze:</u>			
Blattflächenindex <i>LAI</i>	PCA 2000 (Licor), wöchentlich, 2006-2008	Streufallmethode (ERIKSSON 2005), 2007-2008	
Durchwurzelungstiefe	Profilwandmethode am Leitprofil	Entwicklung des Wassergehalts- bzw. Saugspannung in 1m Tiefe	Wurzelfreilegung und -messungen an mehreren Stubben (2008)
Bestandes- transpiration	Saffflussmessung; trunk-heat-balance (EMS) + up-scaling, an 6 Bäumen, 10-minütlich, 2007-2008	aus Bodenwasserbilanz während der Vegetationszeit (TDR), 2007-2008	Berechnung der Referenzverdunstung über Gras (DVWK), täglich, 2006-2008
<u>Atmosphäre:</u>			
Niederschlag, Luftfeuchte und -temperatur, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit	Wetterstation LfJULG (Lambrecht-Sensoren), Freiland, stündlich, seit 1993	Eigene Wetterstation (Luftfeuchte, Niederschlag, Temperatur) im Bestand, 2007-2008	
Bestandesniederschlag (throughfall)	Interzeptionsrinne á 2,24 m <sup>2</sup> , Pegelmessung des akkumulierten Wasserstandes in Wassertonne, stündlich, 2007-2008		

### 4.2.3 Messkonzept Stoffhaushalt

Die Untersuchungen zu den bodenökologischen Veränderungen durch KUP basieren im Wesentlichen auf Bodenprobennahmen und deren Analyse im Labor. Als Vergleichsfläche diente der an die KUP in Methau unmittelbar angrenzende Ackerschlag (vgl. Abb. 4.2.1-2). Die Methodik dieser Untersuchungen wird in Kapitel 5.1.2 ausführlich dargestellt.

### 4.3 Prozessorientierte Modellierung des Wasserhaushalts

Im Gegensatz zu empirischen Modellen, deren Gültigkeit sich auf den Bereich mit vorliegenden Messdaten beschränkt, steht bei prozessorientierten Modellen die physikalische Beschreibung von Prozessen im Vordergrund. Wenn eine hinreichend genaue Parametrisierung und Kalibrierung eines solchen Modells gelingt, lassen sich beispielsweise Sickerwasserraten berechnen, die unter Feldbedingungen nicht oder nur unter erheblichem experimentellen Aufwand (Lysimetertechnik) gemessen werden können. Ein Prozessmodell kann auch für die Verallgemeinerung von Messergebnissen und deren Übertragung auf andere Böden, klimatische Bedingungen und Zeiträume verwendet werden.

Für die umfassende Darstellung von hydrologischen Prozessen im System Boden-Pflanze-Atmosphäre stellt das Modellpaket CoupModel ein geeignetes Werkzeug dar (JANSSON & KARLBERG 2004). Deshalb wurde dieses Modell für die Simulation des Wasserhaushalts von KUP ausgewählt.

Vor der Anwendung des Modells wurde die Modellstruktur einer umfangreichen Prüfung unterzogen und die Modellunsicherheiten wurden abgeschätzt. Dafür standen die im Modellpaket implementierten Verfahren der Monte-Carlo-Simulation und der Bayessche Kalibrierung zur Verfügung.

Die Ergebnisse der empirischen und prozessorientierten Datenanalyse wurden mit Hilfe des Modellpaketes CoupModel verallgemeinert und auf nicht untersuchte Standorte übertragen (vgl. auch PETZOLD et al. 2009). Dafür wurden drei weitere repräsentative Standorte in Sachsen ausgewählt (Abb. 4.2.1-1). Für die Parametrisierung der nicht untersuchten Standorte und die Modellsimulationen über einen längeren Zeitraum wurden weitere Modellanpassungen und vereinfachende Annahmen getroffen, die in Kapitel 5.2.2 dokumentiert sind.

### 4.4 Entwicklung raumplanerischer Grundlagen für die Verknüpfung von Biomasseproduktion auf KUP mit Belangen des Natur- und Bodenschutzes

Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Auftrag des LfULG „Standortpotenziale, Standards und Gebietskulissen für eine natur- und bodenschutzgerechte Nutzung von Biomasse zur Energiegewinnung in Sachsen unter besonderer Berücksichtigung von Kurzumtriebsplantagen“ (Koordination durch den Autor) wurde von den Bearbeitern ein Verfahren entwickelt, das die bisherigen Kenntnisse zu standörtlichen Ertragspotenzialen von KUP (Bearbeitung durch den Autor) mit Aspekten des Bodenschutzes sowie des Natur- und Landschaftsschutzes verknüpft. Ziel war die räumlich differenzierte Darstellung von Synergien und möglichen Zielkonflikten (trade-offs) zwischen Biomasseproduktion und potenziellen Ökosystemdienstleistungen von KUP auf landwirtschaftlichen Flächen. Das Ergebnis lieferte eine fachliche Grundlage für die weitere Entwicklung des umweltverträglichen Anbaus von Energiepflanzen in Sachsen. Als räumliche Bezugsebene diente die naturräum-

liche Gliederung Sachsens, die beispielsweise aus bodenkundlicher Perspektive hinreichend genau durch die Bodenübersichtskarte 1:200 000 abgedeckt wird.

Zunächst wurde ein partizipativer Ansatz auf Expertenebene gewählt, um einen Interessenausgleich zu erreichen und Prioritäten für die Zielvorstellungen auf konkreten Raumeinheiten festzulegen. Dies wurde durch die Bildung von Expertenrunden und Durchführung von Workshops unter Beteiligung folgender Interessengruppen erreicht:

- Landschaftsökologie (LfULG, Referate Landschaftsökologie und Flächennaturschutz),
- Naturschutz (LfULG, Referat Landschaftspflege, Artenschutz),
- Bodenschutz (beratendes Ingenieurbüro Feldwisch),
- Förderung von Agrarumweltmaßnahmen (LfULG, Referat Ausgleichszahlungen, Cross Compliance),
- Klimaschutz (LfULG, Referat Klimaschutz, Klimawandel),
- Landwirtschaft (LfULG, Referat Pflanzliche Produktion und Biomasse),
- Wissenschaft (TU Dresden, Fachbereiche Naturschutz und Standortkunde).

Für die räumliche Analyse, Modellierung von standörtlichen Ertragspotenzialen, Darstellung von Synergieklassen (Priorisierung aus Sicht verschiedener Interessengruppen) und die Verschneidung der verschiedenen Themen wurde ein Geografisches Informationssystem (GIS) verwendet. Die Visualisierung und Dokumentation einzelner Arbeitsschritte sowie der Ergebnisse erfolgte ebenfalls mit GIS. Die Methodik ist in Kapitel 5.3.1 ausführlich dargestellt.

Folgt man der Klassifikation und den Definitionen GIS-bezogener Technologien für die Landnutzungsplanung von MALCZEWSKI (2004), lässt sich der in dieser Fallstudie verwendete Ansatz als Spatial Expert System (SES) bezeichnen, da Expertenwissen und GIS-Funktionen integriert wurden.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Empirische Befunde für die Darstellung ökologischer Zusammenhänge auf Standortebene

#### 5.1.1 Transpiration einer Hybridpappel-Plantage in Sachsen in Abhängigkeit von Klima und Bodenbedingungen - Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions

**PETZOLD, R., K. SCHWÄRZEL, K.H. FEGER (2011):** Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions. – European Journal of Forest Research 130: 695–706

##### 5.1.1.1 Abstract

The aim of this study was to investigate transpiration and its main driving factors on the example of a hybrid poplar plantation with the clone *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, cv. Max 1 on a site in the hilly loess region of Saxony (Germany). Transpiration was measured using sap flow techniques during the 2007 and 2008 growing season. At the same time, throughfall, soil moisture dynamics, and soil physical properties were also measured. Total transpiration rates amounted to 486 mm and 463 mm, respectively, during the two years. Maximum daily transpiration rates reached 6.7 mm/day while an average of 2.2 mm/day for the entire growing season was recorded. The main controlling factors for stand transpiration included the evaporative demand, water availability, and soil temperature. The information was implemented into a simple empirical model for the prediction of transpiration. It can be concluded, that large scale establishment of poplar plantations will result in a distinct reduction of groundwater recharge. On the other hand, surface runoff and soil erosion may decrease. Due to limited water availability in the late growing season, the growth potential of the tested clone cannot fully be exploited at many sites in Germany.

##### Abbreviations

<i>ETP</i>	potential evapotranspiration over grass
<i>LAI</i>	leaf area index
<i>REW</i>	root extractable water [fraction]
<i>T</i>	stand transpiration
<i>T<sub>n</sub></i>	stand transpiration normalised by LAI
<i>T<sub>s</sub></i>	soil temperature

### 5.1.1.2 Introduction

Interest in the utilisation of fast growing tree species as a renewable energy source and raw material is increasing worldwide. In Germany, short rotation plantations are being established on agricultural land. Hybrid poplars (*Populus spec.*) and willows (*Salix spec.*) are favoured in northern temperate climates due to their rapid growth rates, ease of propagation, broad genetic base, short breeding cycles, and ability to resprout after multiple harvests (VOLK et al. 2004). The demand of short rotation forests with an optimal supply of nutrients, water, and light is high. Nutrient supply on former arable land is sufficient, at least during the initial rotations or if not, can easily be adjusted by means of fertilisation. The light situation can be controlled by optimising stand structure and density. However, at many sites, water can present a problem. It is generally accepted that poplar stands use significantly more water than field crops or other deciduous trees (STEPHENS ET AL. 2001). On sites where either precipitation rates are too low or irrigation is not feasible, soil water availability becomes the main growth limiting factor (e.g. JUG et al. 1999, LINDERSON et al. 2007). Due to the high levels of water uptake by poplar, the conversion of arable land to short rotation plantations, of this species, may result in a reduced groundwater recharge and surface water yield (HALL 1996, 1998, ALLEN et al. 1999). In order to exploit the high yield potential of short rotation forests, but simultaneously minimise negative effects of the high water demand, it is necessary to carefully select adequate sites for plantations. Moreover, poplar species and their hybrids show a wide range of physiological mechanisms to control transpiration and canopy conductance in response to changing environmental variables (BLAKE et al. 1996, MONCLUS et al. 2006, SOUCH & STEPHENS 1998). Therefore, the specific water relationship of the various clones has to be taken into account when assessing hydrological effects of poplar plantations.

Only sparse information exists about the water demand and transpiration of poplar species and their hybrids, for site conditions in Germany. BUNGART & HÜTTL (2004) studied the relationship between water of poplar plantation with *P. trichocarpa x P. deltoides*, cv. Beaupré and *P. trichocarpa x P. maximowiczii*, cv. Androscoggin on rehabilitated sites in the mining region in South Brandenburg, Germany. They found significant differences in transpiration between the two clones. However, more than 50 different poplar clones exist in Germany which have shown superior growth characteristics and have legal authorisation for use in plantation practise. To date, there is no information available about the relationship between soil water dynamics, root water uptake, transpiration, and yield under field conditions with the often planted clone of *Populus nigra x P. maximowiczii*. Nevertheless, the knowledge of site and plant-specific interactions supports planning of short rotation forests and is therefore necessary for the economic success and ecological sustainability of plantations.

#### Objectives

The main objectives of this study were i) to determine stand transpiration of the clone *Populus nigra x P. maximowiczii*, cv. Max 1 by sap flow measurements, ii) to identify the main environmental variables controlling stand transpiration, and iii) to derive an empirical model for predicting actual canopy transpiration in response to evaporative demand, soil moisture, and soil temperature.

### 5.1.1.3 Materials and methods

#### Study site

The study site is located near Methau, a village in the hilly loess region of Saxony, NE Germany (51°05'N, 12°49'E) at 210 m asl. The region is characterised by a subcontinental climate. According to the records of the Methau agrometeorological station (1994 – 2008) the mean annual air temperature is 8.7 °C and the mean annual precipitation is 770 mm. Tab. 5.1.1-1 presents monthly values of air temperature and precipitation for the study duration of 2007 and 2008 in comparison to the average of 1994 through 2008. The two years are characterised by similar mean air temperatures but significantly higher monthly precipitation rates than the long-term averages.

**Tab. 5.1.1-1: Monthly sum of corrected precipitation and monthly precipitation deficit (*P-ETP*) during the growing season, average values for the period during 1994-2008**

period	Precipitation [mm/month]							Precipitation deficit [mm/month]						
	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Apr-Sep	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Apr-Sep
1994-2008	44	73	67	91	87	65	428	-17	-19	-35	-18	-9	14	-84
2007	2	123	84	119	119	109	556	-83	16	-30	2	29	58	-9
2008	119	23	85	78	106	68	479	69	-76	-32	-34	0	15	-57

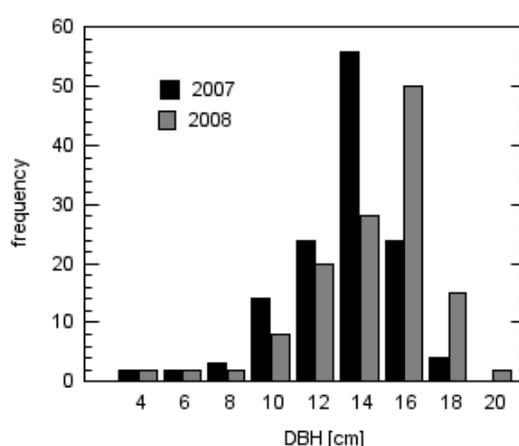
The poplar plantation was established in 1999 on former arable land. The goal of this plantation was to demonstrate the production potential of raw material for the paper industry within an exploitation cycle of 10 years. Different clones and management schemes were tested. It covers an area of 13.4 ha on a gentle NW facing slope. The soil cover consists of a mosaic of Haplic Luvisols which transitions to Stagnic Luvisols, derived from loess, above a deeply weathered argillite. Twelve different poplar clones (cuttings) had been planted in several blocks. The plot of our study consisted of a poplar block (*Populus nigra* x *P. maximowiczii*, cv. Max 1) in growth years nine and ten respectively, covering an area of 828 m<sup>2</sup>. The original spacing in the block was 2 m x 3 m (1667 cuttings/ha<sup>-1</sup>). Due to plant mortality after planting, the actual tree density is 1,570 trees/ha. To the west of the trees, in the centre of the plantation, was a block of the *Populus trichocarpa* x *P. deltoides*, cv. Beaupré clone and to the east a block of the *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, cv. Max 3 clone. In December 2006, the average tree height was 11.0 m and the mean diameter at breast height was 13.2 cm.

#### Sap flow measurements

The transpiration *T* of the poplar stand was estimated based on sap flow measurements using the trunk heat balance method (THB) (ČERMÁK et al. 1973, KUČERA et al. 1977, ČERMÁK et al. 2004). Sap flow sensors from EMS (Environmental Measurement Systems Inc., Brno, Czech Republic) were installed on six trees (Tab. 5.1.1-2) according to the tree diameter distribution (Abb. 5.1.1-1).

**Tab. 5.1.1-2: Biometric data of sample trees for sap flow measurements**, each individual tree was only measured during one growing season, height estimation by optical measurement (Vertex III, Haglöf, Sweden)

Sample tree	2007		2008	
	DBH [cm]	Height [m]	DBH [cm]	Height [m]
1	12.3	9.7	13.1	14.2
2	12.9	8.1	14.0	14.6
3	13.6	11.4	15.2	14.9
4	14.2	11.2	15.8	13.2
5	15.5	11.2	18.1	15.0
6	16.6	11.3	18.4	13.5



**Abb. 5.1.1-1: Distribution of tree diameters at breast height (DBH)** for the measured poplar stand (area = 828 m<sup>2</sup>) used for calculation of stand transpiration

Between three heated sensors (effective tangential width of 5.5 cm) and a reference sensor the system kept a constant temperature difference of 1 K. Stainless heating plates and electrodes covering a xylem depth of 35 mm were used. The assumption, that electrodes cover the main part of the conducting xylem depth was confirmed by visual differentiation between the wet, dark heartwood and the dryer, lighter sapwood (c.f. ČERMÁK & NADEZHINA 1998). Samples of cores of different trees at different expositions taken with an increment borer were therefore evaluated. The output voltage for heating the stainless plates of the three upper sensors was logged every 10 min (EMS minicube). The values represent the integral over the heated volume of the trunk segment. They were directly converted to the sap flow rate by a physical based heat balance equation (ČERMÁK et al 1973, 2004, KUČERA et al. 1977, TATARINOV et al. 2005). Mini32 software (EMS) automatically calculated the sap flow rate (kg/h) for each measured tree according to biometric parameters. Baseline correction was manually performed using Mini32 (EMS), assuming zero flow at 3:00 pm. For more information see the manual of the used sap flow system of EMS (2006). Daily mean values of sap flow rate were calculated according to recommendations by PHILLIPS & OREN (1998) by averaging values from 6:00 pm to 5:00 am on the following day. Upscaling of single tree transpiration to stand transpiration is based on sap flow distribution in DBH classes (ČERMÁK et al. 2004).

Simple linear regression curves were constructed between the diameter of the investigated trees and the averaged sap flow rate (in 2007,  $r^2=0.84$  and in 2008,  $r^2=0.58$ ). However, the  $r^2$  values were not improved by using an upscaling procedure for each individual day and obtained daily values for stand transpiration did not differ significantly from values calculated by a seasonal scaling approach. Some gaps exist in sap flow data due to sensor failures during a part of the 2008 growing season. Between tree three and four ( $r^2=0.95$ ) and tree two and six ( $r^2=0.97$ ), respectively, functions of linear regression were performed in undisturbed measuring periods and used for gap filling.

Leaf area index (*LAI*) was measured using the optical instrument LAI 2000-PCA (LI-COR Inc., Lincoln, USA) in an interval of one to three weeks during the whole growing season. Below the canopy, 24 permanent points were measured with the 90° cap and a second sensor was used to measure in an open field near the plantation. Due to the size of the plot, only rings one to three were analysed. In accordance with recommendations by ERIKSSON et al. (2005), no further correction for clumping index and winter *LAI* were made. The optical measurement was reassessed by estimating the leaf area index based on the specific leaf area at different tree heights (July 2007) and leaf collection during leaf fall 2007.

#### Soil hydrological and soil physical measurements

Soil moisture was measured with TDR sensors (IMKO GmbH, Ettlingen, Germany). After determining the main rooting zone, based on soil profile assessment (Tab. 5.1.1-3), three sensors were horizontally installed at 5 cm, two at 20 cm, and one at 45 cm depths. Soil temperature was measured by Pt100-sensors in 5, 20, and 45 cm depths. A Logger (DL2e-Logger, Delta-T) monitored in one hour intervals. To evaluate the heterogeneity of the plot and observe soil moisture development deeper in the soil profile, we used a TRIME PR3 tube probe (IMKO) designed for water content profiling, with a mobile FM3 measuring device (IMKO). Nine IMKO-Tecanat plastic access tubes were randomly installed and weekly profiled during the 2007 growing season down to 100 cm soil depth. In 2007, soil suctions were measured weekly using 26 permanently installed pressure head tensiometers in 5, 30, 45, 60, and 100 cm depths.

The measured soil water contents, at 5 and 20 cm, were assumed to apply to soil depth intervals at 0–10 cm and 10–30 cm respectively. Based on the results from the tensiometers, TDR, and PR3 probes, the soil water dynamics below 30 cm only showed small variations. This allowed scaling of the water content measurements, of the TDR probe at 45 cm, to a range of 30-100 cm. The root extractable water (*REW*) was calculated from TDR measurements as proposed by GRANIER (2000)

$$REW = \frac{\Theta_{FC} - \Theta}{\Theta_{FC} - \Theta_{min}} \quad (1)$$

with  $\Theta$ ,  $\Theta_{min}$ , and  $\Theta_{FC}$  (Vol. %) as actual, minimum, and volumetric water content at field capacity estimated from field measurements. Field capacity was defined as the soil water content, after three dry days, following a period of saturated soil, in early spring 2008. *REW* was

calculated to a depth of 100 cm using averaged daily TDR readings in the scaling intervals as mentioned.

Soils were described according to WRB soil classification. The coarse and fine root distribution was mapped according to the method used by BÖHM (1979). Excavation of two stumps, in 2008, gave additional information about rooting behaviour below the trunk. Disturbed and undisturbed soil samples (250 cm<sup>3</sup>) were taken from every horizon (five replicates) to measure water retention, unsaturated hydraulic conductivity, bulk density, soil texture, and carbon content. The complete description of the investigated soil profile is given in Tab. 5.1.1-3. The upper soil horizon is characterised by a higher available water capacity than the lower horizons. Higher bulk densities and low hydraulic conductivities determine stagnic conditions in the lower horizons.

**Tab. 5.1.1-3: Soil physical and hydrological properties at the study site.** The soil is a Stagnic Luvisol with  $C_{org}$  = organic carbon,  $dB$  = Bulk density,  $AC$  = air capacity = volume between pF 0, and pF 1.8,  $AWC$  = plant available water = water stored between pF 1.8 and pF 4.2,  $pF$  = log [pressure head], n.m. = not measured

Horizon	Thickness [cm]	Sand	Silt	Clay	$C_{org}$	$dB$	$AC$	$AWC$	Hydraulic conductivity at			fine roots per horizon <sup>a</sup>
									pressure head [cm]			
							per dm	per horizon	- 31	- 63	- 316	
Ap	32	6	82	12	1.58	1.41	13	90	8.9	1.6	0.3	73
E	18	3	85	12	0.41	1.54	6	47	6.0	3.6	0.8	7
Btg 1	17	9	73	18	0.20	1.57	7	36	0.9	0.7	0.3	8
Btg 2	25	29	55	17	0.12	1.77	5	53	n.m.	n.m.	n.m.	2
Bt	-	28	51	21	0.11	1.72	4	n.m.	0.8	0.6	0.2	-

a) determined in a soil trench. Coarse roots deeper than 1.2 m below the trunk were assessed by complete stump excavation of two sample trees.

### Climatological measurements

An automatic weather station was placed under the canopy to record relative humidity, temperature (SKH 2011, Skye Instruments, Powys, UK), and small throughfall events (Hellmann with tipping bucket, Thies, Göttingen, Germany). Throughfall was collected using plastic gutters (collecting area 2.24 m<sup>2</sup>) and transferred into a barrel. The water level was recorded by a pressure sensor (PR -36W, Keller, Winterthur, Switzerland), and all sensor data were logged at hourly intervals (DL2e-Logger, Delta-T-Devices, Burwell, UK).

Stemflow could be observed during heavier rainfall, but no measurements were conducted. In order to obtain an estimate of total interception, stemflow was assumed to be 5 % of net rainfall (LEVIA AND FROST 2003).

Data for the open land climatological conditions was taken from the nearby agrometeorological station Methau operated within the network of the Saxon State Agriculture Office. The station (Lambrecht Meteorological Instruments, Göttingen, Germany) recorded air tempera-

ture and relative humidity (No. 8093), global radiation (pyranometer No. 16103), precipitation (Hellmann with tipping bucket No. 15188), wind speed, and wind direction. Original precipitation values were corrected in order to account for systematic underestimation following official standards (RICHTER 1995).

#### Data analysis and modelling approach

The evaporative demand of the atmosphere was expressed as potential evapotranspiration over grass *ETP* according to ALLEN et al. (1998).

Stand transpiration  $T$  was normalised by  $LAI$  ( $T_n$ ) due to known influence of  $LAI$  dynamics on  $T$ .  $ETP$  was then contrasted with daily transpiration  $T_n$ , and a general relationship in an adapted form of EWERS et al. (2008) was established.

$$T_n = a * [1 - e^{-b*ETP}] \quad (2)$$

The transpiration can then be calculated as follows:

$$T = T_n * LAI \quad (3)$$

We identified environmental variables controlling  $T_n$  (i.e. explaining its daily and seasonal variation). The variables were then used to parameterise response functions in the general empirical model (equation 3). The upper envelope of data points in the relationship between  $T_n$  to  $ETP$  was constructed. This upper boundary represents transpiration under optimal conditions of the investigated poplar stand. The boundary line was calculated by the quantile regression approach. Quantile regression models can describe a response variable, in our case, stand transpiration  $T$ , which is often modified by several independent and/or interacting multiple factors (cf. CADE & NOON 2003, KOENKER 2005, POYATOS 2005). We analysed the transpiration of the poplar stand during periods with  $LAI > 3$ . Under such conditions soil evaporation can be assumed to be negligible in the energy balance (KELLIHER et al. 1995). We fitted parameters  $a$  and  $b$  to the upper 95 % quantile for calculation of optimum transpiration  $T_{n0.95}$ . Upon further analysis, we introduced modifier functions to decrease soil moisture  $f(REW)$  and soil temperature  $f(T_s)$ . Depending on environmental conditions, these functions yielded values between 1 (no limitation of transpiration) and 0 (totally inhibited transpiration). The soil moisture response function was used in the following form (i.e. POYATOS 2005):

$$f(REW) = 1 - s_1 * e^{-s_2 * REW} \quad (4)$$

where  $s_1$  and  $s_2$  are fitting parameters.

The soil temperature response function for water uptake by roots was adapted from MELLANDER et al. (2006)

$$f(T_s) = \begin{cases} 1 - e^{-t_1 * (T_s - t_{lim})^{t_2}} & T_s > t_{lim} \text{ } ^\circ\text{C} \\ 0 & T_s \leq t_{lim} \text{ } ^\circ\text{C} \end{cases} \quad (5)$$

where  $t_1$  and  $t_2$  are fitting parameters and  $T_s$  is the soil temperature at 20 cm depth ( $^\circ\text{C}$ ). The parameter  $t_{lim}$  represents the threshold temperature below where no root water uptake (and thus, transpiration) occurs. We assumed a tight coupling of root activity and gas exchange at leaf level in the early growing season, when soil water is not limiting but soil temperature significantly controls processes in fine roots (PREGITZER et al. 2000), therefore, we fixed  $t_{lim}$  at  $10 \text{ } ^\circ\text{C}$ . This is according to LYR (1996) who observed in pot experiments of *Populus nigra* that there was no root activity at soil temperatures  $< 10 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

The complete transpiration model was then obtained:

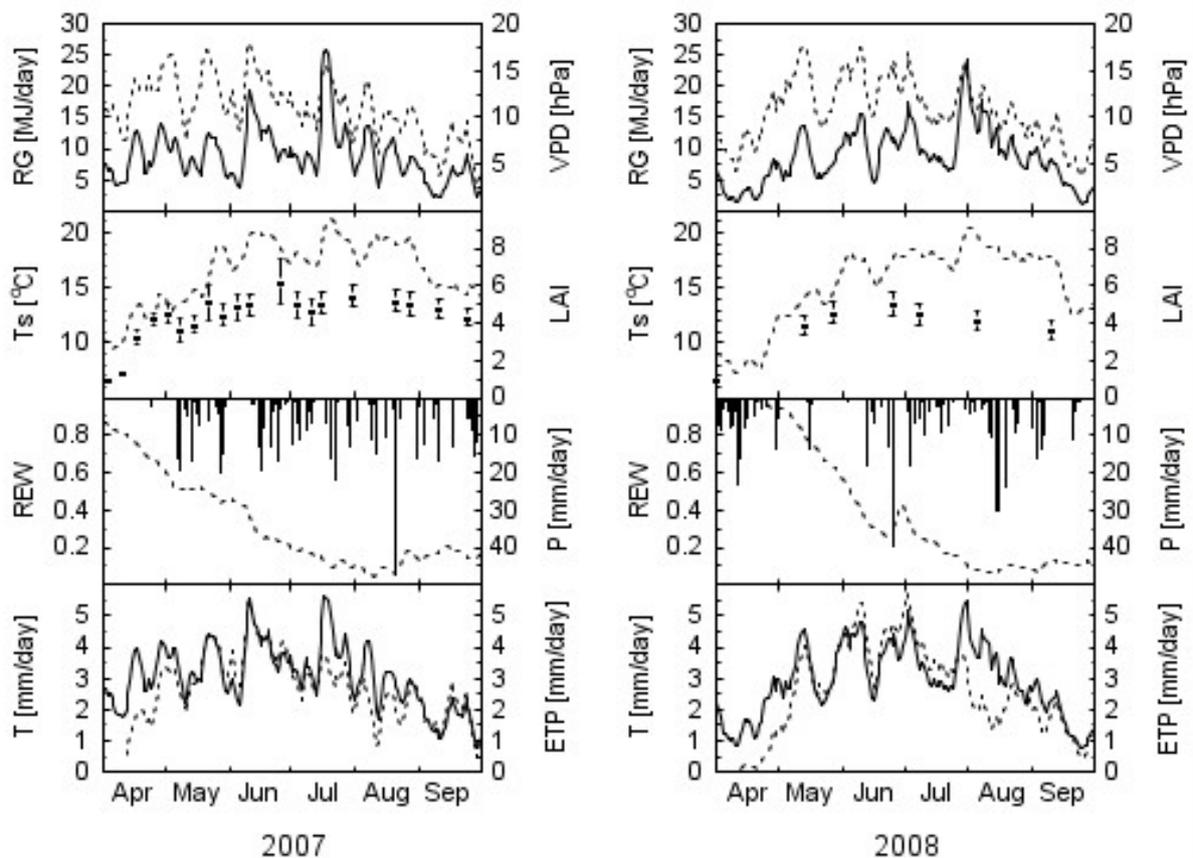
$$T = Tn_{0,95} * f(REW) * f(T_s) * LAI \quad (6)$$

All statistical analysis, nonlinear and quantile regressions were done in R, version 2.7.1. (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008). The appropriate response functions were selected by maximising the fit of the regression line between measured and modelled stand transpiration and visual evaluation of residuals. Akaike's Information Criterion (AIC), which represents a value of log likelihood penalised by the number of used fitting parameters, was minimised. If no other information was given, statistical tests and fitted parameters were significant with a t-test significance level of  $p < 0.001$ .

#### 5.1.1.4 Results

##### Environmental conditions

The temporal dynamics of environmental variables during the 2007 and 2008 growing seasons are presented in Abb. 5.1.1-2.



**Abb. 5.1.1-2: Time series of stand transpiration ( $T$ ), crop reference evaporation ( $ETP$ ), root extractable water ( $REW$ ), precipitation ( $P$ ), leaf area index ( $LAI$ ), soil temperature at 20 cm depth ( $T_s$ ), global radiation ( $RG$ ) and vapour pressure deficit ( $VPD$ ) in 2007 and 2008.** Dashed lines refer to the left y-axis, running mean (5 days) for  $T$ ,  $ETP$ ,  $T_s$ , and  $VPD$ ; single values of leaf area index with error bars (1 standard deviation,  $n=24$ ).

The 2007 growing season was characterised by a dry and warm start, followed by a period with continuously distributed precipitation. Due to the dry winter, there was no full soil water storage at the beginning of April 2007. There was only 85 % of root extractable water available. In contrast to 2007, the beginning of the growing season in 2008 was colder and wetter. Due to relatively dry conditions in the following months, the decrease in root extractable water was steeper than in 2007. In both years, the transpiration  $T$  of the fully developed poplar stand was similar to the course of the potential crop evapotranspiration  $ETP$ . However, at the beginning of the growing season in both years, with increasing soil temperatures and canopy development, the first reduced transpiration reaches the level of  $ETP$  in the first half of May. During July and August,  $T$  clearly fell behind  $ETP$  which corresponds with the lowest levels of  $REW$ .

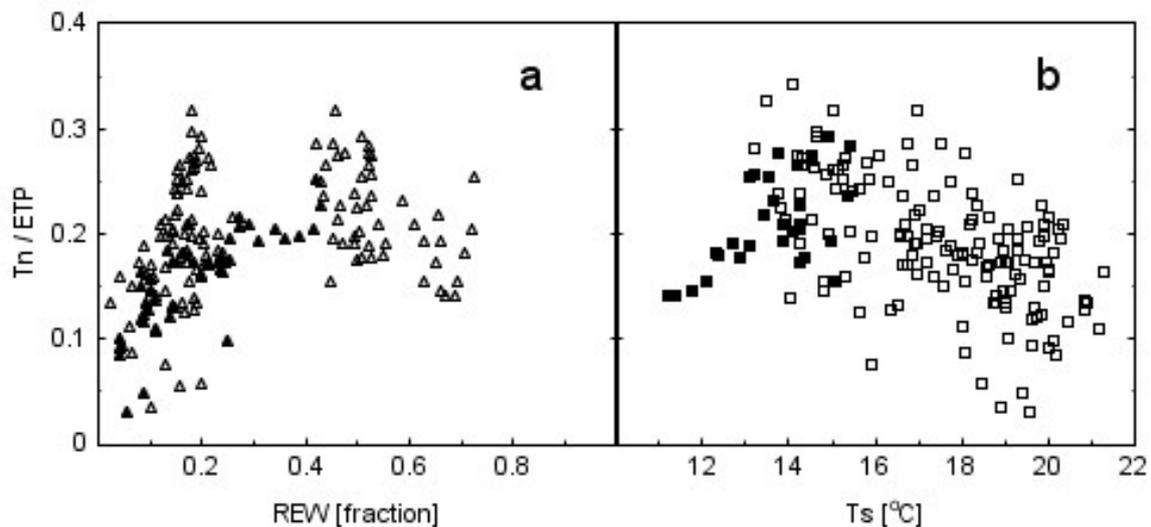
Canopy development in both years started at the beginning of April and autumn leaf fall was finished in the middle of October. The  $LAI$  calculation from specific leaf area and leaf collection in 2007 yielded an average of five and was in good agreement with the  $LAI$  obtained by the PCA-2000 measurement during the same period. Measured  $LAI$  values, particularly from July 2007, are one unit higher than in the same period in 2008. However, in 2007 after three

storms, *LAI* decreased by approximately one unit due to loss of branches and leaves. Also the decrease observed at the end of June 2008 was induced by a storm.

Maximum daily transpiration rates in 2007 reached 5.7 mm/day (6.7 mm/day in 2008) while average transpiration of all measured days reached 2.3 mm/day (2.2 mm/day) and in total 486 mm (463 mm). The transpiration of 2007 and 2008, calculated by the soil water balance method yielded 495 mm and 467 mm, respectively. Values of total interception during growing seasons reached 163 mm (2007) and 113 mm (2008) which corresponds to 28 % and 24 % of open field precipitation, respectively.

#### Transpiration response to soil moisture and soil temperature

Different soil moisture conditions modified the magnitude of transpiration response to evaporative demand. Decreasing root extractable water, *REW*, led to a reduced ratio of  $T_n / ETP$  (Abb. 5.1.1-3a). Although, this relationship only became noticeable when the data was pooled into a set at higher or lower soil temperatures, respectively. The threshold in the example was 19 °C. In contrast, at high levels of  $REW \gg 0.5$  we observed a reduced ratio of  $T_n / ETP$  (Abb. 5.1.1-3a). This was due to relatively low soil temperatures,  $T_s$ , in April and the beginning of May. In Abb. 5.1.1-3b, the ratio of  $T_n / ETP$  is contrasted to the soil temperature,  $T_s$ . A significant correlation was only observed at low soil temperatures and high soil moisture conditions (threshold for data pooling  $REW > 0.5$ ).



**Abb. 5.1.1-3: Ratio of normalised Transpiration  $T_n$  to crop reference Evapotranspiration  $ETP$  in relation a) to root extractable water  $REW$ ; filled triangles represent the data pool at  $T_s > 19$  °C, open triangles at  $T_s \leq 19$  °C, b) to soil temperature,  $T_s$ ; filled boxes represent the data pool at  $REW > 0.5$ , open boxes at  $REW \leq 0.5$ ; data of 2007.**

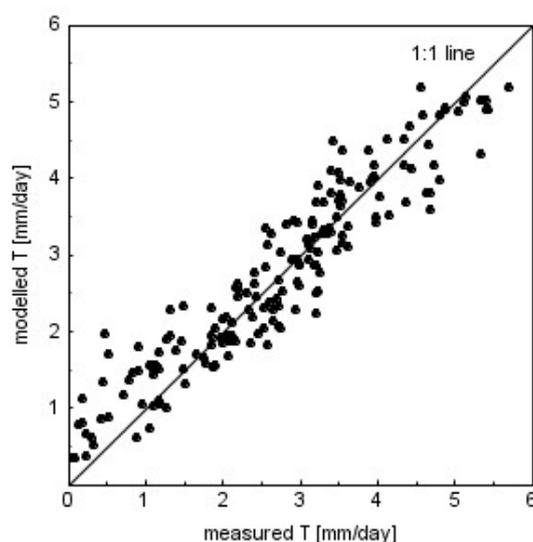
### Modelling transpiration

The fitted general model (equations 2 and 3) was able to predict actual transpiration, depending on evaporation demand. Larger differences between predicted and measured transpiration were observed at low and high evaporation demand. Based on modelled optimum transpiration,  $T_{n_{0.95}}$ , we implemented the response functions for  $REW$  (equation 4) and  $T_s$  (equation 5). The regression statistics for all modelling steps is given in Tab. 5.1.1-4.

**Tab. 5.1.1-4: Regression statistics for the transpiration model**,  $T_n$  represents the modelled  $ETP$  response according to equation (3), standard error in brackets, most parameters are significant at t-test level  $p < 0.001$  (\*\* $p < 0.01$ )

Model for $T$ prediction	$a$	$b$	$s_1$	$s_2$	$t_1$	$t_2$	intercept	slope	adj. R <sup>2</sup>	AIC
$T_n * LAI$	1.440 (0.215)	0.173 (0.037)	-	-	-	-	0.68 (0.10)	0.75 (0.03)	74	369
$T_{n_{0.95}} * f(REW) * LAI$	1.449 (0.211)	0.274 (0.058)	0.605 (0.040)	4.239 (0.437)	-	-	0.62 (0.07)	0.80 (0.02)	86	274
$T_{n_{0.95}} * f(REW) * f(T_s) * LAI$	1.449 (0.211)	0.274 (0.058)	0.668 (0.043)	5.151 (0.489)	0.459** (0.138)	1.292 (0.283)	0.48** (0.07)	0.84 (0.02)	89	235

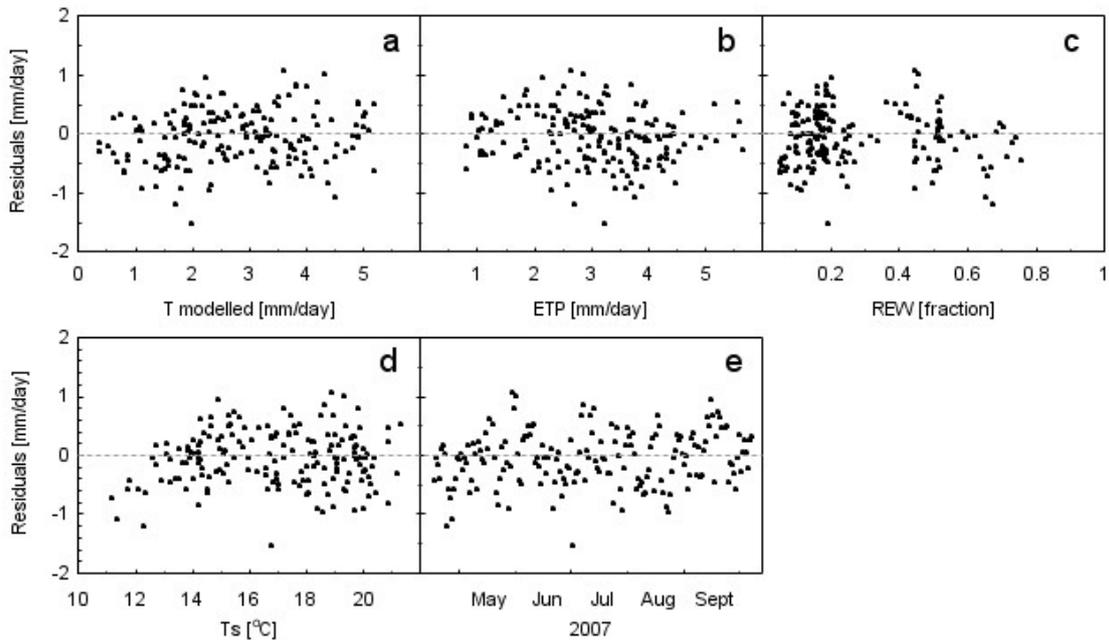
The introduced response functions for soil moisture and soil temperature improved both model fit and model quality (Tab. 5.1.1-4). The consideration of only  $REW$  response increased the adjusted R<sup>2</sup> from 0.74 to 0.86 with only slight improvement of the intercept and slope of the regression between modelled and measured daily values. The complete model (equation 6) reduced the intercept, which means a decreased overestimation in the lower  $ETP$  range. The model was able to explain 89 % of variation in 2007, simultaneously yielding the lowest value of Akaike's Information Criterion (AIC). Nevertheless, daily transpiration estimates were slightly overestimated in the lower range of  $ETP$  (Abb. 5.1.1-4).



**Abb. 5.1.1-4: Modelled vs. measured transpiration in 2007**, complete transpiration model with response functions for soil moisture and soil temperature.

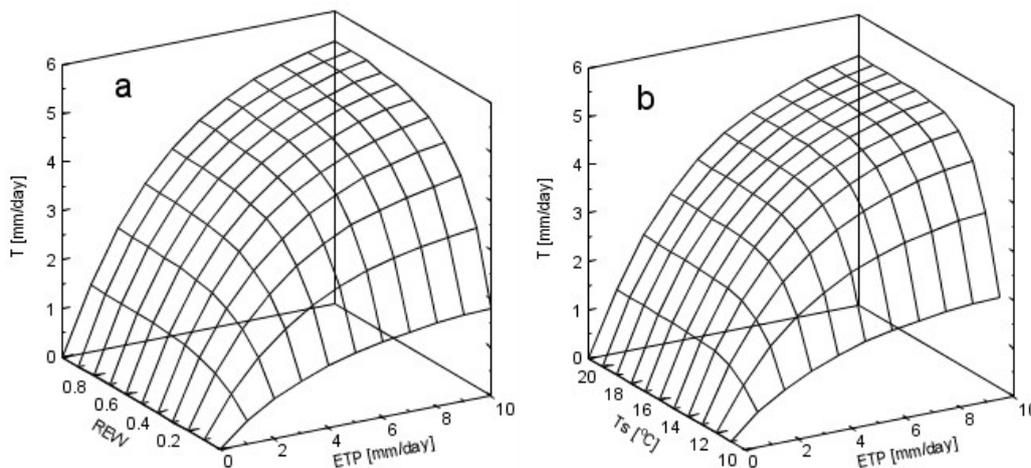
Visual inspection of residuals (measured-modelled) confirmed that the variation of daily transpiration can be explained by our empirical modelling approach (Abb. 5.1.1-5a-e). The error of modelled daily transpiration ranged between +1 mm/day and -1 mm/day (Abb. 5.1.1-5a). Residuals against explaining variables  $ETP$ ,  $REW$ , and  $T_s$  showed a somewhat balanced

scatter (Abb. 5.1.1-5b-d). The implementation of modifier function for root extractable water and soil temperature resulted in an unbiased representation of residuals over the whole growing season (Abb. 5.1.1-5e).



**Abb. 5.1.1-5: Residuals (measured – modelled canopy transpiration)** as a function of a) modelled  $T$ ; b)  $ETP$ ; c) root extractable water  $REW$ ; d) soil temperature  $T_s$ ; e) time.

A generalised representation of the empirical model is illustrated in Abb. 5.1.1-6. While the reduction of transpiration begins at  $REW < 0.4$  (Abb. 5.1.1-6a), at a reduced transpiration due to low temperatures, it is noticeable only in the range of 10 to 15 °C (Abb. 5.1.1-6b).



**Abb. 5.1.1-6: Empirical transpiration model** a) Transpiration as a function of  $ETP$  and  $REW$  at  $T_s=20^\circ\text{C}$  b) as a function of  $ETP$  and  $T_s$  at  $REW=0.5$ ;  $LAI=4$

The application of the calibrated model with the environmental data of 2008 led to an exceptional prediction of transpiration (adj.  $R^2=0.83$ ). However, the total transpiration for days with  $LAI > 3$  was systematically underestimated and amounted to 387 mm, which is 13 % less than the measured total transpiration of 443 mm (Tab. 5.1.1-5). Although, 2008 was charac-

terised by lower precipitation there were less days with precipitation and lower interception than in 2007.

**Tab. 5.1.1-5: Measured  $T$  (SF = upscaled from sap flow), modelled  $T$ , and measured weather conditions ( $P$  = precipitation;  $I$  = interception) of the poplar stand in Methau**

year	Meas. $T$ (SF) [mm]	Mod. $T$ [mm]	Days with $LAI > 3$ [no.]	$P$ total [mm]	$P$ mean [mm/day]	Days with precipitation [no.]	[% ]	$I$ total [mm]	$I$ mean [mm/day]
2007	473	481	175	557	3.2	58	33	155	8.9
2008	443	387	153	353	2.3	36	24	92	6.0

### 5.1.1.5 Discussion

#### Transpiration rates estimated from measured sap flow

The physical background of the applied THB method for sap flow measurements is robust against radial variation of sap flow density and does not require any calibration (ČERMÁK 2004). However, our applied upscaling procedure from measured tree trunk segment to tree level, by multiplying the circumference, assumed a uniform azimuthal flow pattern. Nevertheless azimuthal flow variation is a crucial point in sap flow measurements and discussed elsewhere (e.g. COHEN 2008). Differences of sun exposure, heterogeneity in soil structure or position of sensors in relation to large branches may lead to different azimuthal flow patterns. COHEN et al. (2008) concluded that the variation of the azimuthal sap flow pattern within a single tree may have the same magnitude to that between trees. ČERMÁK et al. (2004) showed, that the upscaling error in homogenous stands sharply decreases with increasing number of sample trees and reaches approximately 15 % for  $n=4$  and 10 % for  $n=12$ , respectively. MEIRESONNE et al. (1999), who measured sap flow with multi-point sensors in a 13 year old poplar plantation (*P. trichocarpa* x *P. deltoides*, cv. Beaupré), concluded, that a relatively low number of trees could be sufficient for upscaling from tree to stand level ( $R^2=0.98$  for regression between sap flow rate and basal area of eight sample trees). However, in our linear upscaling approach, 82 % of single tree sap flow could be explained by stem diameter. The lower  $r^2$  of this linear upscaling equation in 2008 (0.55) may be the result of sensor failure and the chosen gap filling method or a higher variation of azimuthal sap flow patterns within the selected samples as discussed above. Therefore, six sample trees in that particular poplar stand were the minimum in order to match a measurement error < 20 %.

The maximum daily transpiration rates at 5.7 mm/day (2007) and 6.7 mm/day (2008) and the average transpiration rates of 2.3 mm/day resp. 2.3 mm/day are in the range of reported values for stand transpiration of the genus *Populus* (MEIRESONNE et al. 1999). The accumulated transpiration values at our site in Saxony, at 486 mm (2007) and 463 mm (2008), for the entire growing season are rather high in comparison to the range of 153 mm to 310 mm at a mining reclamation site in South Brandenburg (NE Germany; BUNGART AND HÜTTL 2004). These authors investigated the water balance of the poplar clones *P. trichocarpa* x *P. deltoides*, cv. Beaupré and *P. maximowiczii* x *P. trichocarpa*, cv. Androscoggin during a period of seven years. MEIRESONNE et al. (1999) extrapolated daily values of a poplar stand in Belgium with an annual transpiration of 329 mm. In contrast, HALL et al. (1996) measured daily

transpiration rates of a poplar stand (*Populus trichocarpa* x *P. deltoides*) in the United Kingdom by means of hydrologic modelling with an annual transpiration of 527 mm (precipitation 676 mm/year), which is slightly higher than our observations.

The shape and the magnitude of the leaf area development at Methau (Abb. 5.1.1-2,  $LAI_{max}=6$  in 2007 and 5 in 2008) is similar to the  $LAI$  dynamics reported in other studies on poplar plantations (HALL 1998, BUNGART & HÜTTL 2004). There is no information available about variation in  $LAI$  because of branch and crown breakage. However, the vulnerability to wind damage, especially for *Tacamahaca* poplars (Balsam Poplars), is known in management practice. Furthermore, branch abscission as well as branch and crown breakage after high wind are propagation strategies in particular for *Tacamahaca* poplars (BRAATNE et al. 1996). However, the observed reduction of  $LAI$  by approximately 20 % due to such phenomena and the seasonal dynamic course of  $LAI$  influences transpiration rates and have to be considered when analysing transpiration and responses to environmental variables.

#### Comparison of transpiration rates on poplar with other tree species and field crops in Saxony

Afforestation of former arable land may affect the hydrologic cycle at the site and landscape level. In order to assess the potential environmental impacts, a comparison of stand evapotranspiration of poplar to other species is necessary. Therefore, summed transpiration and interception of the studied poplar stand at Methau were compared to stands of other tree species and agricultural crops in Saxony. As shown in Tab. 5.1.1-6, evapotranspiration during the growing season of the poplar stand exceeds that of water demanding agricultural crops, such as winter wheat and sugar beets, by 25 to 40 %. This can be explained by a longer growing season with higher daily evapotranspiration rates. In particular, higher interception rates from leaves and shoots of the dense canopy of poplar plantation in comparison to annual crops may contribute to the higher evapotranspiration rates of poplar plantations. In contrast to adult forest stands, evapotranspiration of the young poplar stand is up to 90 % higher. Although, the age of the forest stands and unfavourable site conditions in the low mountain range may be responsible for these large differences in evapotranspiration rates. Furthermore, relatively high interception rates of evergreen conifers (e.g. Norway spruce) outside the growing season have to be taken into account for a complete assessment of evapotranspiration rates. HALL et al. (1996) confirmed that the annual water use of short rotation plantations of poplar coppice (3-year-old shoots on 7-year-old stools) in the United Kingdom is higher than any agricultural crops and deciduous forest stands. According to these authors only pine stands use more water.

**Tab. 5.1.1-6: Comparison of measured evapotranspiration of stands of poplar, Norway spruce, European beech, and various agricultural crops on sites in Saxony (Germany)**

Species	Age [ys.]	Site, altitude (m asl) Soil	Length of GS, year	<i>P</i> [mm/GS]	<i>ET</i> <sub>total</sub> [mm/GS]	Av. <i>ET</i> rate [mm/day]
<i>Populus nigra</i> x <i>P. maximowiczii</i> (cv. Max 1) <sup>a</sup>	8	Methau, 210 m Stagnic Luvisol	188 days 2007	558	622	3.3
<i>Picea abies</i> (Norway spruce) <sup>b</sup>	115	Tharandt, 380 m Skeletal Cambisol	206 days 2007	558	328	1.6
<i>Fagus sylvatica</i> (European beech) <sup>b</sup>	97	Tharandt, 380 m Dystric Cambisol	190 days 2007	619	386	2.0
<i>Triticum aestivum</i> (Winter wheat) <sup>c</sup>	1	Brandis, 136 m Haplic Luvisol	136 days 2007	349	466	3.4
<i>Triticum aestivum</i> (Winter wheat) <sup>d</sup>	1	Brandis, 136 m Haplic Luvisol	158 days 1991	280	460	2.9
<i>Solanum tuberosum</i> (Potato) <sup>d</sup>	1	Brandis, 136 m Haplic Luvisol	128 days 1985	255	339	2.6
<i>Beta vulgaris</i> (Sugar beet) <sup>d</sup>	1	Brandis, 136 m Haplic Luvisol	164 days 1990	356	493	3.0

GS growing season, *P* precipitation, *ET*<sub>total</sub> Evapotranspiration, av *ET* rate = average *ET* rate during GS

a) present study with cv. Max 1; *ET*<sub>total</sub>=Transpiration + Interception

b) Department of Meteorology, TU Dresden (personal communication); *ET*<sub>total</sub> from Eddy-flux measurements

c) Haferkorn (personal communication); *ET*<sub>total</sub> from lysimeter measurements

d) Haferkorn (2000); lysimeter measurements

### Transpiration response to environmental conditions and modelling

Instead of the known atmospheric drivers for transpiration, like radiation, vapour pressure deficit, and temperature, we chose *ETP* to express the evaporative demand of the atmosphere. It allowed us to successfully model daily transpiration dynamics of the stand level with a nonlinear relationship between transpiration and *ETP*. This correlation reflects the often described stomata behaviour characterised by an increasing closure in a logarithmic form with increasing vapour pressure deficits (HINCKLEY et al. 1994, ALLEN et al. 1997, ZHANG et al., 1999, KIM et al. 2008). In the generalised approach presented here, 74 % of variation could be explained by *ETP* which corresponds to the range of reported values for other tree species (e.g. POYATOS et al. 2005, EWERS 2008). The observed strong reduction of transpiration ratios when *REW* drops below 0.4 (Abb. 5.1.1-3a) was reported for many tree species in Europe (BERNIER et al. 2002, GRANIER 2000, SCHWÄRZEL et al. 2009). BRAATNE et al. (1992), who investigated the behaviour of the cv. Beaupré in pot experiments, reported a threshold value of 0.6 for the response to *REW*. In contrast, ALLEN et al. (1999) did not find a clear change of transpiration ratios in response to decreasing *REW* for the black poplar clone *P. deltoides* x *P. nigra*, cv. Dorschkamp. Although, in the same study, a threshold value 0.32 was found for the Beaupré clone. A general extraction of exact thresholds is dependant on the definition of *REW*. The minimum water content  $\Theta_{\min}$  in equation (1) was defined according to the observed minimum during the studied years which were both characterised by extraordinary precipitation without long dry periods. Furthermore, we referred *REW* to a constant soil depth of 100 cm assuming that no proliferation of fine roots occur from sinker roots

deeper in the soil. However, root water uptake from horizons below 100 cm may occur when water occurs in cracks or fractures of the argillite rock soil complex.

Low soil temperature was found to explain reduced transpiration (Abb. 5.1.1-3b) in early spring when soil water is not a limiting factor and anaerobic conditions can be excluded. Only a few studies consider low soil temperature as a controlling variable for transpiration. For *Pinus sylvestris*, a reduced transpiration at soil temperatures  $< 8\text{ }^{\circ}\text{C}$  was demonstrated by MELLANDER et al. (2004). This was explained by reduced stomata conductance due to Abiscic acid signals and reduced root permeability at lower soil temperatures. However, evapotranspiration and net photosynthesis are correlated and therefore, increased root growth productivity may also be an indicator for transpiration (COTÉ et al. 1998, PREGITZER et al. 2000). LYR (1996) investigated root productivity of eight European tree species, under fertilised and optimal water conditions and constant air temperature in relation to different soil temperature regimes. For *Quercus robur* and *Larix decidua*, he found increased activity at soil temperatures  $> 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Root growth of *Populus nigra* developed at soil temperatures  $> 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . This threshold value was also found by ZALESNY (2005) for cuttings of 21 poplar clones. Nevertheless, soil temperature effects on transpiration are not constant due to plant interaction with aboveground climatic conditions and soil moisture dynamics.

Quantile regression allowed us to define a boundary relationship between  $T_n$  and  $ETP$  in the data set in an objective way. Therefore, we could avoid uncertainties in the definition of non-limiting conditions for transpiration which are necessary to fit multiplicative models in a step-wise process with pooled data (cf. EWERS et al. 1999, GRANIER et al. 2000). According to the generalised model (Abb. 5.1.1-6a), transpiration occurs even when  $REW=0$ , which should be impossible from a theoretical point of view. The reason for this phenomenon is associated with the uncertain definition of  $REW$  as discussed above.

The test of the model to the independent data set of 2008 resulted in a slight but systematic underestimation of transpiration (Tab. 5.1.1-5). This may be acceptable because data uncertainty of the upscaled stand transpiration in 2008 is higher. Nevertheless, neglecting interception in our modelling approach may also bias the results. A part of evaporative demand ( $ETP$ ) on wet days is requested by evaporation of intercepted water from wet leaves more than by transpiration. The calibration of equation (2), by quantile regression under wet conditions, will then lead to parameters which systematically underestimate optimal transpiration under dry conditions. The informative value of modelling results will decrease as site conditions show greater differences than those incorporated in the parameterisation procedure. Nevertheless, the empirical model is suited to generalise a relationship between transpiration and controlling environmental factors which have to be accounted for when implementing a more process-oriented modelling approach.

#### 5.1.1.6 Conclusions

Our results demonstrate that water consumption of the studied poplar plantation during growing season exceed that of any other agricultural crop and mature broad leaved forest stands and even old conifer stands reported for comparable site conditions in Saxony (Germany). These findings have to be carefully considered, when short rotation plantations are established on a large scale on arable land. In particular, this will be essential for site conditions

and management schemes which allow the development of canopies with high *LAI* values. The higher evapotranspiration will lead to a reduced infiltration and hence decrease of groundwater recharge. However, as a positive effect, surface runoff may be clearly reduced, thus leading to reduced soil erosion. The high retention potential of drier plantation soils also contributes to improved water retention and, thus, flood prevention. Such conflicting hydrological effects have to be taken into account when short rotation plantations are assessed on a landscape scale. Quantitative data are indispensable to negotiate trade-offs between conflicting sectors providing ecosystem services.

Evaporative demand, water availability, and soil temperature were found to be the main controlling factors for stand transpiration. We conclude that at our site in Methau, the plant specific maximum transpiration was not reached because of the low soil temperature when soil water is not limiting, especially in spring. In contrast, transpiration is reduced in periods with favourable soil temperature but sustained soil drought. These interactions inhibit higher gas exchange rates, hence photosynthesis and assimilation, especially in the early and late stages of growing seasons. This appears to be a major reason why the growth potential of this highly productive poplar clone cannot fully be exploited under the given site conditions. However, it is quite clear that the multiple interactions are highly dependant on site and clone characteristics. This has to be adequately considered, when transferring the findings to other sites in Saxony, in particular to wetter, colder regions in mountainous areas or to warmer, drier regions in the lowlands. Our empirical modelling approach is only a step in the way of differentiated assessment of potentials and risks of poplar cultivation, based on process oriented modelling.

#### Acknowledgements

We like to express our thanks to J. Kučera (Brno) for his introduction to sap flow techniques and fruitful discussions, U. Haferkorn (Lysimeter station Brandis) and the Department of Meteorology, TU Dresden for providing additional lysimeter and eddy-flux data. The study was financially supported by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF, project AGROWOOD - 0330710 A).

#### 5.1.1.7 References

- ALLEN, RG, PEREIRA, LS, RAES, D, SMITH, M (1998) Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper no. 56, Rome, Italy.
- ALLEN, SJ, HALL, LR, ROSIER, PTW (1999) Transpiration by two poplar varieties grown as coppice for biomass production. *Tree Physiol* 19: 493-501
- BERNIER, PY, BREDÁ, N, GRANIER, A, RAULIER, F, MATHIEU, F (2002) Validation of a canopy gas exchange model and derivation of a soil water modifier for transpiration for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) using sap flow density measurements. *For Ecol Manage* 163: 185-196
- BLAKE, TJ, SPERRY, JS, TSCHAPLINSKI, TJ, WANG, SS (1996) Water relations. In: STETTLER, RF, BRADSHAW, HD, HEILMAN, PE, HINCKLEY, TM (eds): *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, pp 401-422

- BÖHM, W (1979) Methods for studying root systems. Ecological studies Vol. 33. Springer-Verlag, Berlin
- BRAATNE, JH, TM HINCKLEY, STETTLER, RF. (1992) Influence of soil water on the physiological and morphological components of plant water balance in *Populus trichocarpa*, *Populus deltoides* and their F1 hybrids. Tree Physiol 11: 325--339.
- BRAATNE, JH, ROOD, SB, HEILMAN, PE (1996) Life history, ecology, and conservation of riparian cottonwoods in North America. In: STETTLER, R, BRADSHAW JR, H, HEILMAN, P, HINCKLEY, T (eds) Biology of *Populus* and its implications for management and conservation. NRC Research Press Ottawa, pp 57-85
- BUNGART, R, HÜTTL, R (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. Eur J Forest Res 123/2: 105-115
- CADE, BS, NOON, BR (2003) A gentle introduction to quantile regression for ecologists. Front Ecol Environ 1: 412-420
- COHEN Y, COHEN S, CANTUARIAS-AVILES T, SCHILLER G (2008) Variations in the radial gradient of sap velocity in trunks of forest and fruit trees. Plant Soil 305: 49-59
- COTÉ B, HENDERSHOT WH, FYLES JW, ROY AG, BRADLEY, R, BIRON, PM, COURCHESNE F (1998) The phenology of fine root growth in a maple-dominated ecosystem: relationships with some soil properties. Plant Soil 201: 59-69.
- ČERMÁK, J, DEML, M, PENKA, M (1973) A new method of sap flow rate determination in trees. Biol Plant 15: 171-178
- ČERMÁK J, NADEZHDINA N (1998) Sapwood as the scaling parameter – defining according to xylem water content or radial pattern of sap flow? Ann Sci For 55:509-521
- ČERMÁK, J, KUČERA, J, NADEZHDINA, N (2004) Sap flow measurement with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. Trees 18: 529-546
- EMS (2006) Sap flow system using Lt 51.1 modules – instruction manual. Brno
- ERIKSSON, H, EKLUNDH, L, HALL, K, LINDROTH, A (2005) Estimating LAI in deciduous forest stands. Agric For Meteorol 129: 27-37
- EWERS, BE, MACKAY, DS, TANG, J, BOLSTAD, PV, SAMANTA, SS (2008) Intercomparison of Sugar Maple (*Acer saccharum* Marsh.) stand transpiration responses to environmental conditions from the Western Great Lakes Region of the United States. Agric For Meteorol 148, 231-246
- GRANIER, A, LOUSTAU, D, BREDÁ, N (2000) A generic model of forest canopy conductance dependent on climate, soil water availability and leaf area index. Ann For Sci 57: 755-765
- HAFERKORN, U (2000) Größen des Wasserhaushaltes verschiedener Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im klimatischen Grenzraum des Mitteldeutschen Trockengebietes, Ergebnisse der Lysimeterstation Brandis. Dissertation, University of Göttingen
- HALL, RL, ALLEN, SJ, ROSIER, PTW, SMITH, DM, HODNETT, G, ROBERTS, JM, HOPKINS, R DAVIES, HN (1996) Hydrological effects of short rotation energy coppice. Final Report to ETSU. Institute of Hydrology. Wallingford

- HALL, RL, ALLEN, SJ, ROSIER, PTW, HOPKINS, R (1998) Transpiration from coppiced poplar and willow measured using sap-flow methods. *Agric For Meteorol* 90: 275-290
- HINCKLEY, TM, BROOKS, JR, ČERMÁK, J, CEULEMANS, R, KUČERA, J, MEINZER, FC, ROBERTS, DA (1994) Water flux in a hybrid poplar stand. *Tree Physiol.* 14: 1005-1018
- JARVIS, PG (1976) The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philos Trans R Soc Lond Ser B* 273, 593–610
- JUG, A, HOFFMANN-SCHIELLE, C, MAKESCHIN, F, REHFUESS, KE (1999) 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 harvest of shoot axes. *For Ecol Manage* 121: 67-83
- KELLIHER, FM, LEUNING, R, RAUPACH, MR, SCHULZE, ED (1995) Maximum conductances for evaporation from global vegetation types. *Agric For Meteorol* 73: 1-16
- KIM, HS, OREN, R, HINCKLEY, TM. (2008) Actual and potential transpiration and carbon assimilation in an irrigated poplar plantation. *Tree Physiol.* 28: 559-577
- KOENKER, R (2005) Quantile Regressions. *Econometric Society Monographs* 38. Cambridge University Press
- KUČERA, J, ČERMAK, J, PENKA, M (1977) Improved thermal method of continual recording the transpiration flow rate dynamics. *Biol Plant* 19: 413-420
- LEVIA, DF, FROST, EE (2003) A review and evaluation of stem flow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *J Hydrol* 274: 1-29
- 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: 460–468
- LYR, H (1996) Effect of the root temperature on growth parameters of various European tree species. *Ann Sci For* 53: 317-323
- MEIRESONNE, L, NADEZHDINA, N, ČERMAK, J, VAN SLYCKEN, J, CEULEMANS, R (1999) Measured sap flow and simulated transpiration from a poplar stand in Flanders (Belgium). *Agric For Meteorol* 96: 165-179
- MELLANDER, PE; BISHOP, K, LUNDMARK, T (2004) The influence of soil temperature on transpiration: a plot scale manipulation in a young Scots pine stand. *For Ecol Manage* 195: 15–28
- MELLANDER, PE; STÄHLI, M; GUSTAFSSON, D; BISHOP, K (2006) Modelling the effect of low soil temperatures on transpiration by Scots pine. *Hydrol Processes* 20: 1929-1944
- MONCLUS, R, DREYER, E, VILLAR, M, DELMOTTE, FM, DELAY, D, PETIT, JM, BARBAROUX, C, LE THIEC, BC, BRIGNOLAS, F (2006) Impact of drought on productivity and water use efficiency in 29 genotypes of *Populus deltoides x nigra*. *N Phytologist* 169: 765-777
- OREN, R, SPERRY, JS, KATUL, GG, PATAKI, DE, EWERS, BE, PHILLIPS, N, SCHÄFER, KVR (1999) Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. *Plant Cell Environ* 22: 1515-1526

- 
- PHILLIPS, N, OREN, R (1998) A comparison of daily representations of canopy conductance based on two conditional time averaging methods and the dependence of daily conductance on environmental factors. *Ann Sci For* 55: 217-235
- POYATOS, R, LLORENS, P, GALLART, F (2005) Transpiration of montane *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. forest stands measured with sap flow sensors in NE Spain. *Hydrol Earth Syst Sci*, 9, 493–505
- PREGITZER, KS, KING, JS, BURTON, AJ, BROWN, S (2000) Responses of tree fine roots to temperature. *N Phytologist* 147: 105-115
- RICHTER, D (1995) Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 194, Offenbach
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2008) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- SCHWÄRZEL, K, MENZER, A., CLAUSNITZER, F, SPANK, U, HÄNTZSCHEL, J (2009) Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest. *Agric For Meteorol* 149: 1994-2006
- SOUCH, CA, STEPHENS, W (1998) Growth, productivity and water use in three hybrid poplar clones. *Tree Physiol* 18: 829-835
- STEPHENS W, HESS T, KNOX J (2001) Review of the effects of energy crops on hydrology. Report to MAFF. Institute of Water and the Environment, Cranfield University, Silsoe
- TATARINOV, FA, KUČERA, J, CIENCIALA, E (2005) The analysis of physical background of tree sap flow measurement based on thermal methods. *Measurement Sci Technol* 16: 1157–1169
- VOLK, TA, VERWIJST, T, THARAKAN, PJ, ABRAHAMSON, LP, WHITE, EH (2004) Growing fuel: a sustainability assessment of willow biomass crops. *Front Ecol Environ* 2/8: 411–418
- ZALESNY, RS, HALL, RB, BAUER, EO, RIEMENSCHIEDER, DE (2005) Soil temperature and Precipitation Affect the Rooting Ability of Dormant Hardwood Cuttings of *Populus*. *Silvae Genetica* 54/2: 47-58
- ZHANG, H, MORISON, JIL, SIMMONDS, LP (1999) Transpiration and water relation of poplar trees growing close to the water table. *Tree Physiol* 19/9: 563-573

### 5.1.2 Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in Sachsen

**PETZOLD, R., B. SCHUBERT, K.H. FEGER (2010):** Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in Sachsen (Deutschland). – Die Bodenkultur 61: 23-35

#### 5.1.2.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurden die Vorräte der oberirdischen und unterirdischen Biomasse sowie die darin gespeicherten Elemente einer 10-jährigen Pappelplantage (*Populus nigra* x *P. maximowiczii*) 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.

#### 5.1.2.2 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 & 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 Nährstoffe 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 Plantagennutzung 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 vormals ackerbaulich genutzten Flächen unter mitteleuropäischen Standortsbedingungen 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 & MATTHEWS 2002). Die wenigen Befunde von Langzeituntersuchungen auf Versuchsfeldern in Deutschland (STETTER & MAKESCHIN 1999, JUG 1997, KAHLE 2007 und 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 10jährigen 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?

### 5.1.2.3 Material und Methoden

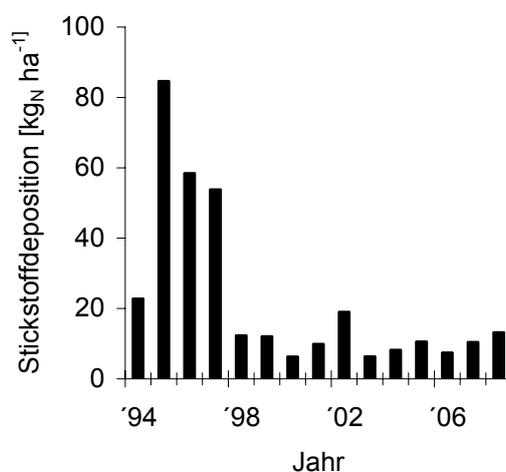
#### Untersuchungsgebiet und Versuchsanlage

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 & 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 nigra* x *P. maximowiczii*) 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 Tab. 5.1.2-1).

**Tab. 5.1.2-1: Bewirtschaftungsmaßnahmen der ackerbaulich genutzten Vergleichsfläche 1999-2008**

Jahr	Fruchtfolge	Düngung [kg ha <sup>-1</sup> ]			Kalkung [kg ha <sup>-1</sup> ]
		N	P	K	Kalkmergel
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	-	-	-

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 Abb. 5.1.2-1)

**Abb. 5.1.2-1: Jährliche Stickstoffeinträge mit dem Regenwasser am Standort Methau (ALBERT, persönliche Mitteilung)**

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.

#### 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  $90^\circ$  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 und es erfolgte baumweise die Aufteilung in jeweils drei verschiedenen Größenklassen (Zweige  $\varnothing < 3\text{cm}$ , Äste  $\varnothing 3 - 7\text{ cm}$ , Derbholz  $\varnothing > 7\text{cm}$ ). 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 Kompartimenten wurden die Trockenmassen hergeleitet. Der vielfach festgestellte straffe Zusammenhang zwischen Stammdurchmesser und Gesamttrockenmasse der Einzelbäume (vgl. VERWIJST & TELENIUS 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  $\varnothing > 2\text{ mm}$  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  $2500\text{ cm}^2$ ) 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, Eijkkamp) 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.

#### Laboranalysen

Die Analyse der Boden und Pflanzenproben erfolgte im Labor des Institutes für Bodenkunde und Standortslehre der TU Dresden in Tharandt. Die Gehalte an pflanzenverfügbaren P, K und Mg in den Bodenproben wurden im Labor der Staatlichen Betriebsgesellschaft für Um-

welt 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 Tab. 5.1.2-2 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 sich auf die Untersuchung der 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.

**Tab. 5.1.2-2: Untersuchte Parameter an Boden- bzw. Pflanzenproben, verwendete Extraktionslösungen und Analysegeräte**

Parameter	Extraktionslösung/ Aufschlussverfahren	Analysegerät
Trockenrohddichte; TRD	-	Trockenschrank (105 °C), Waage
Elementgehalte, Pflanzenproben	Thermischer Druckaufschluss mit HNO <sub>3</sub>	CCD-ICP-Spektrometer Ciros (Spectro Analytical Instruments)
Mineralisierbarer Stickstoff; N <sub>min</sub> (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ; NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	0,1 M KCL	Elementaranalysator Multi NC (Analytik Jena)
pH-Wert	0,01 M CaCl <sub>2</sub>	pH-Meter Delta 320 (Mettler-Toledo)
Gesamtkohlenstoff; C <sub>t</sub> Gesamtstickstoff; N <sub>t</sub>	Verbrennung bei 900 °C	Elementaranalysator Vario EL (Elementar Analysensysteme)
Carbonatgehalt, C <sub>anorg</sub>	HCl, volumetrische CO <sub>2</sub> -Bestimmung	Calcimeter (Eijkelkamp)
Pflanzenverfügbare Phosphor und Kalium; P und K	Calcium-Acetat-Lactat (CAL) nach VDLUFA	Continuous-Flow-Analysator (SEAL-Analytical)
Pflanzenverfügbares Magnesium; Mg	0,01 M CaCl <sub>2</sub>	Continuous-Flow-Analysator (SEAL-Analytical)
Effektive Kationenaustauschkapazität; KAK <sub>eff</sub> , Basensättigung; BS	0,5 M NH <sub>4</sub> Cl	CCD-ICP-Spektrometer Ciros (Spectro Analytical Instruments)

### Berechnungen und statistische Auswertung

Die Ergebnisse der Inventur und die ermittelte Biomassefunktion wurden für die Berechnung der oberirdischen Holz-Biomasse (t ha<sup>-1</sup>) verwendet. Die Hochrechnung auf Elementvorräte in der Biomasse (kg ha<sup>-1</sup>) 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<sub>t</sub> und C<sub>anorg</sub> gebildet.

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

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

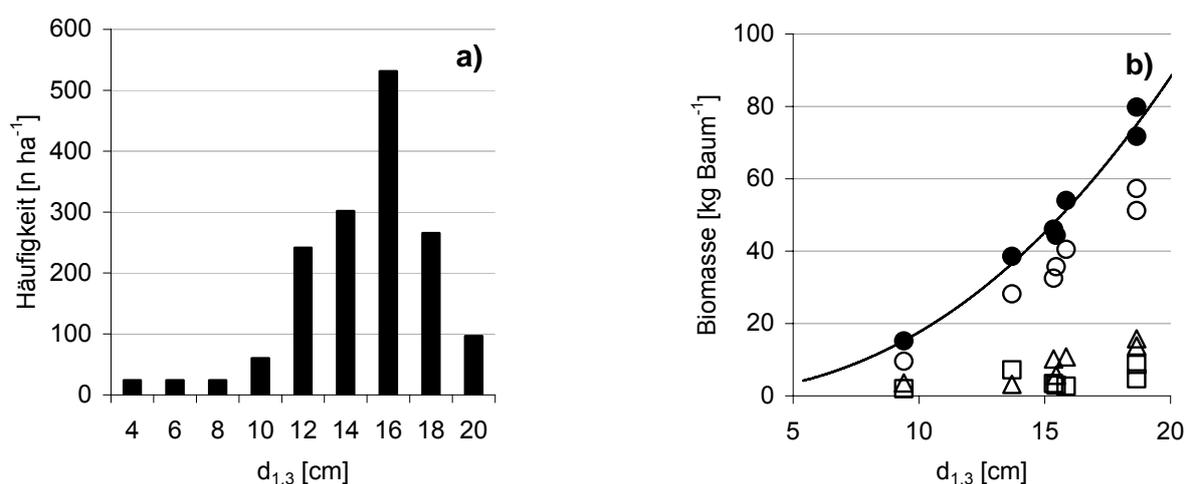
$$N_t (\text{P, K, Mg}) [\text{kg ha}^{-1}] = N(\text{P, K, Mg})_t [\text{g } 100^{-1}\text{g}^{-1}] \times \text{TRD} [\text{g cm}^{-3}] \times \text{Tiefe} [\text{cm}] \times 1000$$

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.

#### 5.1.2.4 Ergebnisse und Diskussion

##### Produktivität und Biomasseverteilung

Die oberirdische Biomasseakkumulation (im blattlosen Zustand) nach 10 Jahren belief sich auf  $74 \text{ t ha}^{-1}$  (Trocknung bei  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Bei einer Trocknung bei  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  reduziert sich dieser Wert um 2,7 % auf  $72 \text{ t ha}^{-1}$ . In Abb. 5.1.2-2 sind die Durchmesserverteilung des Bestandes und die Verteilung der Biomasse auf die einzelnen Kompartimente der untersuchten Bäume dargestellt.



**Abb. 5.1.2-2: 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  $\varnothing < 3 \text{ cm}$  ( $\Delta$ ), Äste  $\varnothing 3 - 7 \text{ cm}$  ( $\square$ ) und Derbholz  $\varnothing > 7 \text{ cm}$  ( $\circ$ ), Oberirdische Gesamtmasse ( $\bullet$ ), angepasste Biomassefunktion:  $y = 0.0892x^{2.2975}$  ( $r^2 = 0.99$ ,  $p < 0,01$ )

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

Aus den Wurzeluntersuchungen wurde auf eine unterirdische Gesamtbiomasse einschließlich Wurzelstock von  $32,6 \text{ t ha}^{-1}$  hochgerechnet. Somit kann orientierend ein Sproß-Wurzelverhältnis 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 ( $\varnothing < 7 \text{ cm}$ ) 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 10jähriger 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  $1667 \text{ St. ha}^{-1}$  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  $7000 \text{ Stück ha}^{-1}$  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 gleichen Fläche kommen PETZOLD et al. (2010) zum Schluss, dass auf diesem Standort weit höhere Biomasseleistungen möglich sind, diese jedoch von der Wasserverfügbarkeit begrenzt werden.

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

Die Gehalte an C, N und weiterer Nährelemente in den verschiedenen Biomassekompartimenten sind in Tab. 5.1.2-3 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.

**Tab. 5.1.2-3: Elementgehalte [Median in mg g<sub>TS</sub><sup>-1</sup>] in den Biomassekompartimenten der Pappel,** Elementgehalte der oberirdischen Biomasseanteile unterscheiden sich bis auf C signifikant ( $p < 0,001$ ;  $n_{\text{Bäume}} = 7$ ), Werte für unterirdische Biomasse orientierend ( $n_{\text{Bäume}} = 2$ )

	Blätter	Zweige ( $\varnothing < 30$ mm)	Äste ( $\varnothing 30-70$ mm)	Derbholz ( $\varnothing > 70$ mm)	Starkwurzel <sup>a</sup> ( $\varnothing > 70$ mm)	Grobwurzel ( $\varnothing 30-70$ mm)	Mittelwurzel ( $\varnothing 10-30$ mm)	Feinwurzel ( $\varnothing 2-10$ 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

In Tab. 5.1.2-4 sind die hochgerechneten Elementvorräte (kg ha<sup>-1</sup>) 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 Wurzelbiomasse ( $\varnothing > 2$  mm einschließlich Wurzelstock) gespeicherte Kohlenstoff beträgt 16 t ha<sup>-1</sup>.

Die Güte des Standorts hinsichtlich der Nährstoffversorgung wird durch die Blattspiegelwerte in Tab. 5.1.2-3 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.

**Tab. 5.1.2-4: Hochgerechnete Elementvorräte [kg ha<sup>-1</sup>] in den Biomassekompartimenten der Pappel,** Klassengrenzen siehe Tab. 5.1.2-3

	Blätter (akkum. Streu)	Zweige	Äste	Derbholz	Oberirdische Dendromasse	Stark- wurzel <sup>a</sup>	Grob- wurzel	Mittel- wurzel	Fein- wurzel	Unterirdische 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

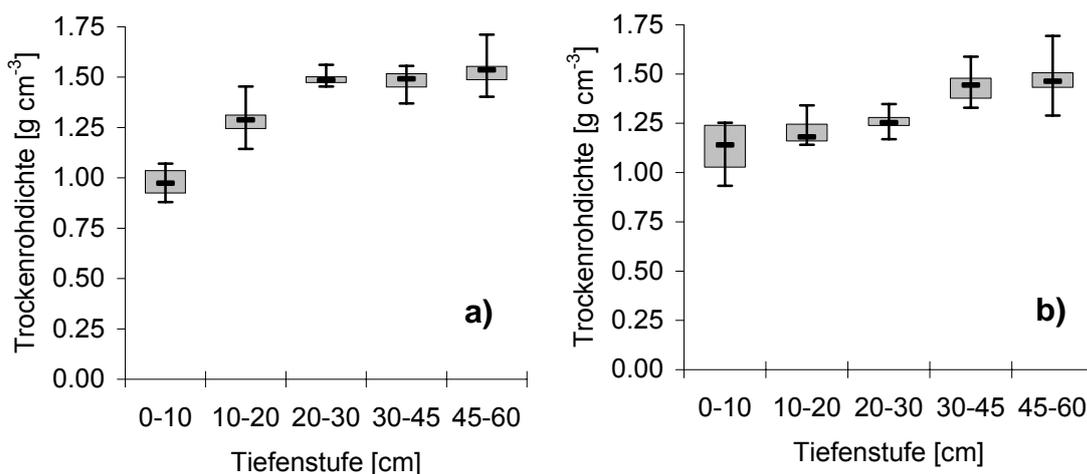
Aus den beobachteten Elementvorräten in der oberirdischen Biomasse in Tab. 5.1.2-4 lassen sich potenzielle Ernteentzüge in  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  ableiten, die im Vergleich zu Werten in der Literatur und den dort gegebenen Düngeempfehlungen diskutiert werden. Danach betragen die potenziellen N-Entzüge bei einer Entnahme der gesamten oberirdischen Biomasse  $19 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Würde man durch entsprechend angepasste Ernteverfahren die Entnahme auf das Derbholz ( $\varnothing > 7 \text{ cm}$ ) beschränken, reduziert sich auch der N-Entzug deutlich auf  $6,7 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ . Allerdings würde die Erntebiomasse dann auch 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 10jähriger Standzeit von Pappeln vergleichbarer Wuchsleistung auf Standorten in Österreich mit Nährstoffentzügen von 16 (N), 38 (Ca), 12 (K), 4 (Mg) und 2 (P)  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  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)  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  deutlich diese Dimensionen, während die Entzüge für Ca und Mg mit 27 bzw. 3  $\text{kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  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 Versuchstandort während der Versuchsdauer ca.  $10 - 15 \text{ kg ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (nasse Deposition) betragen (siehe Abb. 5.1.2-1). 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 Standortsbedingungen 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-Gesamtdeposition 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.

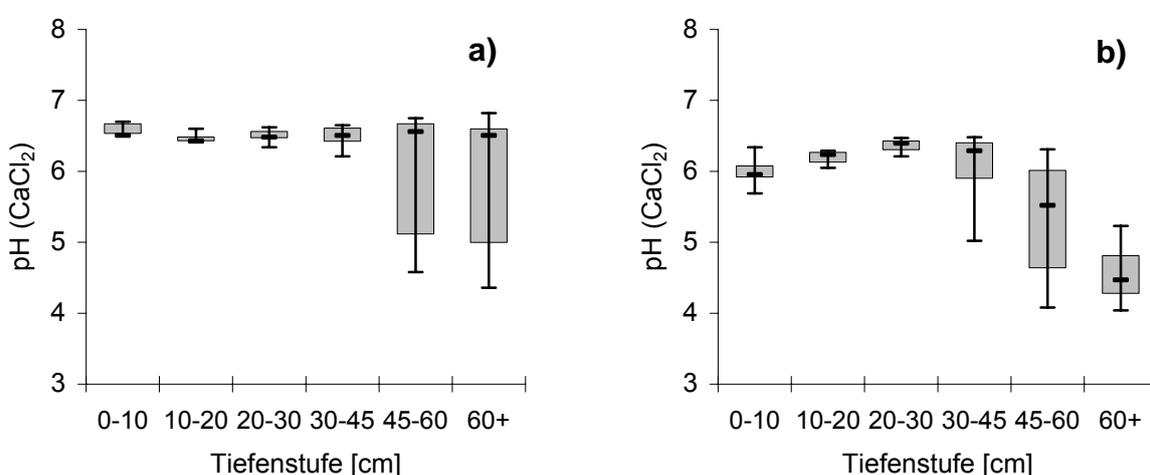
#### Trockenrohdichte, Bodenreaktion und austauschbare Kationen

Unter Ackernutzung wurde in den oberen beide 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 Abb. 5.1.2-3).



**Abb. 5.1.2-3: Boxplots der Trockenrohddichte in verschiedenen Tiefenstufen** a) unter Ackernutzung und b) nach 10jähriger Standzeit einer Pappelplantage (rechts), Whisker repräsentieren Minimum und Maximum der Stichprobe ( $n=6$ )

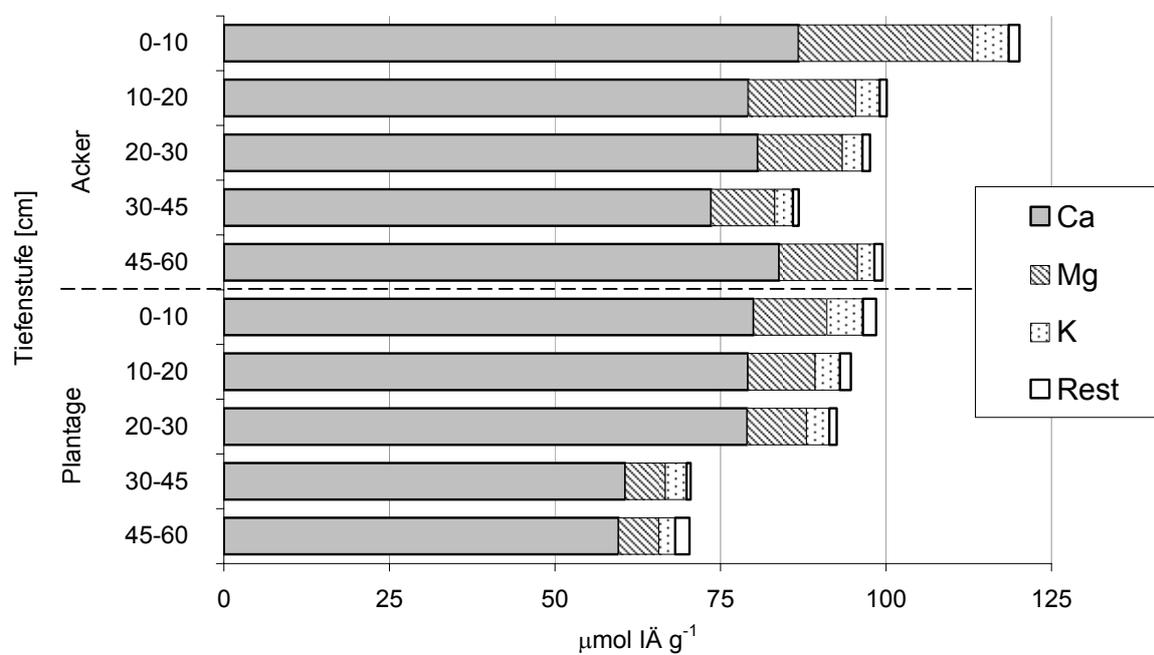
Die Bodenreaktionen lagen sowohl auf der Ackerfläche als auch unter Plantagennutzung in allen Horizonten im Bereich von sehr schwach bis schwach sauer, wobei im Unterboden eine größere Streuung auftrat (Abb. 5.1.2-4). Die pH-Werte unter Plantagennutzung waren signifikant geringer (Tiefenstufen bis 30 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 ( $p < 0,01$ ).



**Abb. 5.1.2-4: Boxplots des pH-Wertes (0.1 M CaCl<sub>2</sub>) in verschiedenen Tiefenstufen** unter a) Ackernutzung und b) nach 10jähriger Standzeit einer Pappelplantage

Die Gehalte austauschbarer Kationen ( $KAK_{\text{eff}}$ ) sind in Abb. 5.1.2-5 dargestellt. Die  $KAK_{\text{eff}}$  im Oberboden betrug auf den beiden Vergleichsflächen jeweils  $> 90 \mu\text{mol I} \ddot{\text{A}} \text{g}^{-1}$ . 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 stär-

keren 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 ( $p < 0,01$ ).



**Abb. 5.1.2-5: Austauschbare Kationen ( $\mu\text{mol Ionenäquivalent g}^{-1}$ ) in Tiefenstufen bis 60 cm auf der Untersuchungsfläche unter Acker (oben) und nach 10jähriger Plantagennutzung (unten)**

Diese Befunde spiegeln sich auch in den Vorräten pflanzenverfügbarer Nährstoffe (Tab. 5.1.2-5) 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 ( $p < 0.01$ ).

**Tab. 5.1.2-5: Vorräte pflanzenverfügbarer Nährstoffe P, K und Mg ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) im Oberboden sowie im Unterboden unter Acker sowie Plantagennutzung**

	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 ( $p < 0.01$ )

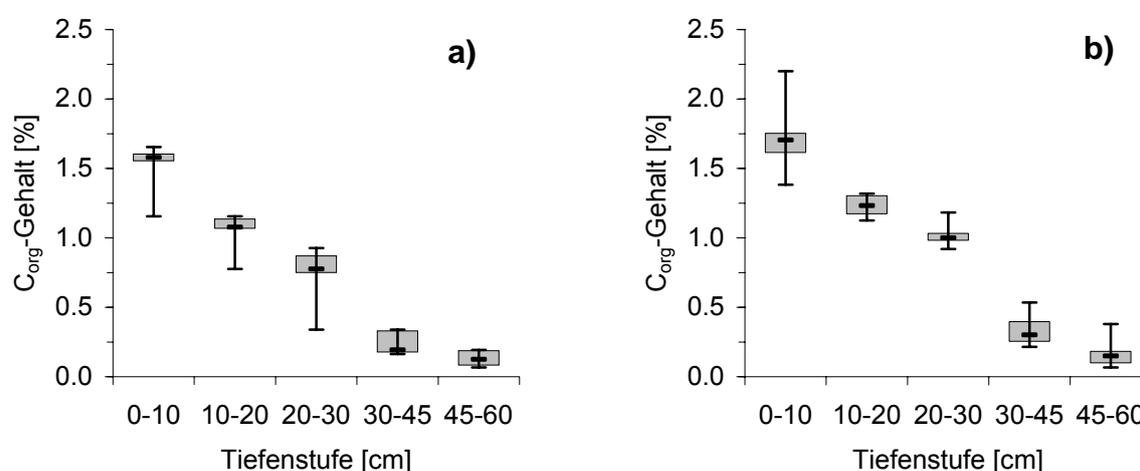
Insgesamt lassen unsere Befunde schwache bodenökologische Veränderungen auf der Pappelplantage erkennen. Diese sind durch ausbleibende ackerbauliche Bewirtschaftung als auch durch den Einfluss der Pappelbestockung selbst erklärbar. Im Gegensatz zu KAHLE et al. (2007) konnten wir jedoch keine signifikante 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 unse-

rer 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  $H^+$ -Freisetzung bei der Nährstoffaufnahme an der Wurzel bei gleichzeitig ausbleibender Kalkung und Bodenhomogenisierung zu erklären. Dieser Prozess ging mit einem Rückgang in der  $KAK_{eff}$  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  $KAK_{eff}$ , 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.

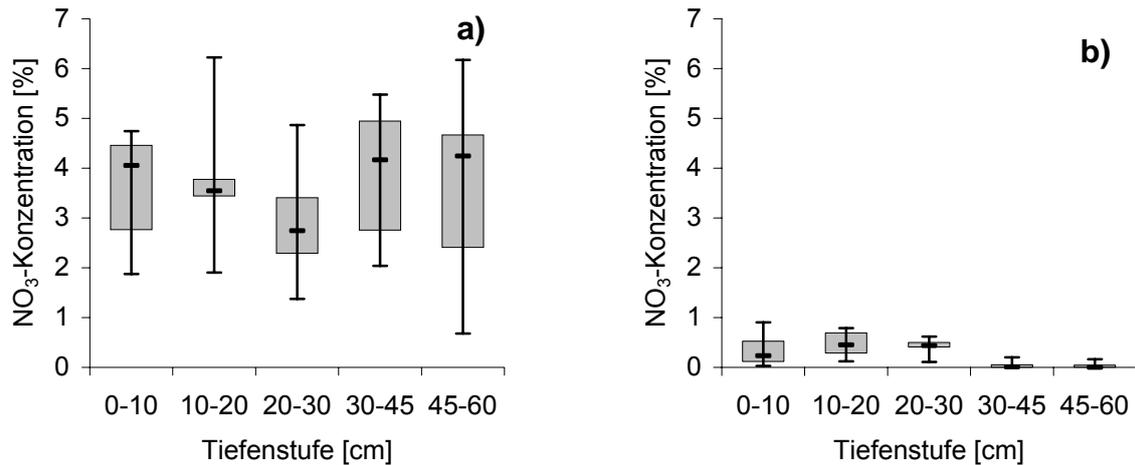
#### Stickstoff und Kohlenstoff im Boden

Die  $C_{org}$ -Gehalte zeigten auf beiden Untersuchungsflächen einen deutlichen Tiefengradienten ( $p < 0.01$ , siehe Abb. 5.1.2-6). Die höchsten Gehalte wurden mit 1,7 % unter Plantagenutzung bzw. 1,6 % unter Acker in der Tiefenstufe bis 10 cm beobachtet. Signifikante Befunde zwischen Plantage und Acker wurden jedoch in keiner Tiefenstufe festgestellt.



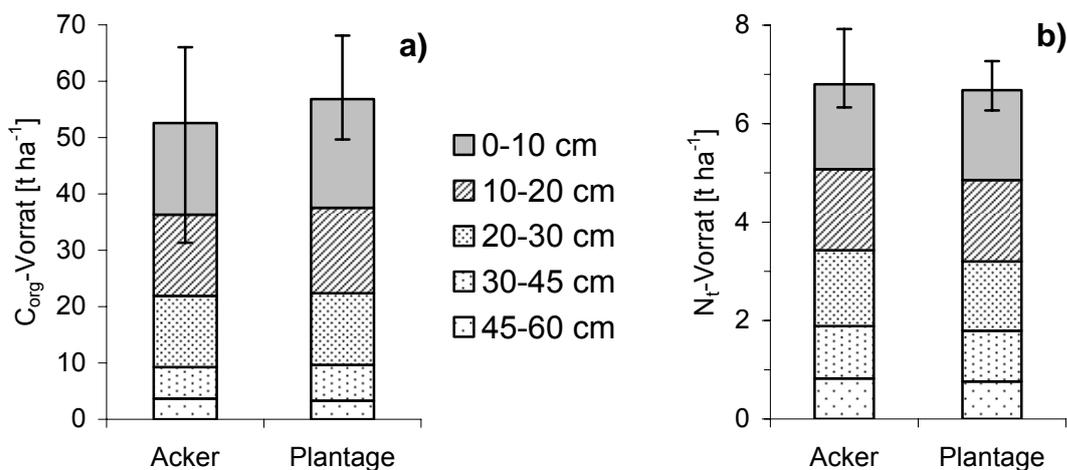
**Abb. 5.1.2-6: Boxplots der  $C_{org}$ -Gehalte in verschiedenen Tiefenstufen a) unter Ackernutzung und b) nach 10jähriger Standzeit einer Pappelplantage**

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 ( $p < 0.01$ , Abb. 5.1.2-7). Die Unterschiede in den  $NO_3^-$ -Konzentrationen spiegeln sich in geringeren  $N_{min}$ -Gehalten sowie den  $N_{min}$ -Vorräten im Boden unter Plantagennutzung wider.



**Abb. 5.1.2-7: Vergleich der Boden-Nitratkonzentrationen** zwischen a) Acker und b) nach 10jähriger Standzeit einer Pappelplantage

Auf den Vergleichsflächen wurde jeweils ein  $C_{\text{org}}$ -Vorrat bis 60 cm Bodentiefe von rund  $50 \text{ t ha}^{-1}$  berechnet (Abb. 5.1.2-8a). Der  $N_{\text{r}}$ -Vorrat betrug auf beiden Flächen rund  $7 \text{ t ha}^{-1}$  (Abb. 5.1.2-8b).



**Abb. 5.1.2-8: Acker und Plantage im Vergleich der Gesamtvorräte** an a) organischem Kohlenstoff  $C_{\text{org}}$  und b) Gesamtstickstoff  $N_{\text{r}}$ ; Fehlerbalken repräsentieren Minimum und Maximum der Gesamtvorräte bis 60 cm Bodentiefe, keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Varianten

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 fehlende N-Düngung und die langjährige Bodenruhe, die zu einer geringeren N-Mineralisierung führt, zurückzuführen. Die deutlich geringeren  $\text{NO}_3$ -Gehalte auch im Unterboden der Pappelplantage lassen auf ein sehr geringes Potenzial der Nitratverlagerung in das Grundwasser schließen. Zu ähnlichen Befunden kommt MAKE-SCHIN (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  $N_{\text{min}}$ - bzw. Nitratgehalte unter Pappel-KUP und

Acker auch für Untersuchungsflächen in Canstein (Rheinisches Mittelgebirge) und Wildeshausen (Nordwestdeutschen Tiefland).

In den Untersuchungen von JUG et al. (1999b) wurden auf den drei verschiedenen Standorten nach mehrjährigen Pappelanbau im Oberboden (0 - 30 cm) kaum Veränderungen des  $C_{\text{org}}$ -Vorrates über die Zeit beobachtet. Lediglich in der Tiefenstufe 0 - 10 cm wurde ein signifikanter Anstieg des  $C_{\text{org}}$ -Vorrates nachgewiesen. Der Kohlenstoffvorrat im Oberboden stieg nur auf der Untersuchungsfläche Abbachhof von ca.  $35 \text{ t ha}^{-1}$  auf  $45 \text{ t ha}^{-1}$  hauptsächlich durch Aufbau des Humusvorrates in der Streuschicht und den oberen 5 cm des Bodens. Auf den anderen beiden Flächen blieb der  $C_{\text{org}}$ -Vorrat bei ca.  $45 \text{ t ha}^{-1}$  (Canstein) bzw.  $55 \text{ t ha}^{-1}$  (Hildeshausen) nahezu unverändert. Auch KAHLE et al. (2010) berichten von gleich bleibenden  $C_{\text{org}}$ -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  $C_{\text{org}}$ -Vorrat von  $37,7 \text{ t ha}^{-1}$ . In der Variante mit 6jährigem Umtrieb ergab sich mit  $40,4 \text{ t ha}^{-1}$  ein höherer Vorrat, bei 3jährigem Umtrieb mit  $31,5 \text{ t ha}^{-1}$  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 Bodenkompartimente 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 Pappelplantage jedoch keine höheren  $C_{\text{org}}$ -Vorräte als unter Ackernutzung feststellbar. Eine Erklärung liegt darin begründet, dass der Humusvorrat von  $> 50 \text{ t ha}^{-1}$  (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  $C_{\text{org}}$  führt (vgl. VAN DE WALLE 2007). Danach setzte möglicherweise wieder eine Phase des  $C_{\text{org}}$ -Anstiegs bis zu den ausgeglichenen Verhältnissen zum Zeitpunkt unserer Untersuchung ein mit einem  $C_{\text{org}}$ -Vorrat von rund  $50 \text{ t ha}^{-1}$ . Neben diesem zeitlich dynamischen Aspekt müssen darüber hinaus beim Vergleich verschiedener Studien auch die unterschiedlichen Standortsbedingungen 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  $16 \text{ t ha}^{-1}$  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 bis  $150 \text{ t ha}^{-1}$  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 Um-

satz 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  $\gg 10$  a ein langsamer Anstieg des  $C_{org}$ -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.

#### 5.1.2.5 Schlussfolgerungen

Die Wuchseistung des Pappelhybrids *Populus nigra* x *P. maximowiczii* (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 Phosphor Kalium und Magnesium 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 Infiltrations- 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  $C_{org}$ -Vorrat gegenüber Acker-nutzung 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.

#### 5.1.2.6 Literatur

- BEMMANN, A., KNUST, C. (Hrsg.) (2010): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. - Weißensee-Verlag, Berlin
- BERTHELOT, A., RANGER, J., GELGAYE, D. (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., VAN REES, K.C.J, KNIGHT, J.D. (2006): A Review of Fine Root Dynamics in Populus Plantations. *Agroforestry Systems* 67: 73-84
- BOLTE, A., HERTEL, D., AMMER, C., SCHMID, I., NÖRR, R., KUHR, M., REDDE, N. (2003): Freilandmethoden zur Untersuchung von Baumwurzeln. *Forstarchiv* 74: 240-262
- CAMIRÉ, C., COTÉ, B., BRULOTTE, S. (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., MUYS, G., GARCIA QUIJANO, J., CEULEMANS, R. (2004): Carbon sequestration following afforestation of agricultural soils: comparing oak/beech forest to short-rotation poplar coppice combining a process and a carbon accounting model. *Global Change Biology* 10: 1482–1491
- DON, A., SCHOLTEN, T., SCHULZE E.D. (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., WRESOWAR, M., SPIEGEL, H., REITER, R., KATZENSTEINER, K. (2009): Energiewälder im Kurzumtrieb – Möglichkeiten und Grenzen. *BFW-Praxisinformation* 16:15-17
- GROGAN, P., MATTHEWS, R. (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., LINDNER, M., VESTERDAL, L., BAUWENS, B., BARITZ, R., HAGEDORN, F., JOHNSON, D.W., MINKKINEN, K., BYRNE, K.A. (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., HOFMANN-SCHIELLE, C., MAKESCHIN, F., REHFUESS, K.E. (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., MAKESCHIN, F., REHFUESS, K.E., HOFMANN-SCHIELLE, C. (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., HILDEBRAND, E., BAUM, C., BOELCKE, B. (2007): Long-term effects of short rotation forestry with willow and poplar on soil properties. *Arch Agron Soil Sci* 53: 673 – 682
- KAHLE, P., BAUM, C., BOELCKE, B., KOHL, J., ULRICH, R. (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): Ertragstafeln für Schwarzpappelsorten. Forschungsbericht d. Inst. f. Rohholzerzeugung, Abt. Waldbau/Ertragskunde. Eberswalde.
- KRAMER, H. & A. AKCA (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main.
- LAMERSDORF, N., PETZOLD, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., KÖSTNER, B., MODEROW, U., BERNHOFER, C., KNUST, C. (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., WITZKE, H.P., KLIMONT, Z., LESSCHEN, J.P., VELTHOF, G.L. (2009): Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 133: 280-288
- PETZOLD, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (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., FEGER, K.H., ZÖTTL, H.W. (1989): Erfassung der Elementvorräte in der Wurzelbiomasse eines 100jährigen Fichtenbestandes (*Picea abies* Karst.) im Schwarzwald. - *Angew. Botanik* 63, 145-163.
- RÖHLE, H.; HARTMANN, K.-U.; STEINKE, C.; SCHRÖDER, J. (2006): Aufstellung von Biomassefunktionen für Kurzumtriebsbestände. *AFJZ* 177, 178 – 187
- RÖHLE, H., BÖCKER, L., FEGER, K.H., PETZOLD, R., WOLF, H., ALI, W. (2008): Anlage und Ertragsaussichten von Kurzumtriebsplantagen in Ostdeutschland. *Schweiz Z Forstwes* 159: 133-139
- SCHOLZ, V., KRÜGER, K., HÖHN, A. (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, 244 p.
- WOLF, H., BÖHNISCH, B. (2004): Modellvorhaben StoraEnso / Verbundvorhaben: Pappelanbau für die Papierherstellung. Abschlussbericht Landesforstpräsidium Sachsen, Graupa. 73 S.

## 5.2 Prozessorientierte Modellierung des Wasserhaushalts

### 5.2.1 Parametrisierung, Prüfung der Modellstruktur und Unsicherheitsanalyse

#### 5.2.1.1 Einleitung

Das Verständnis für die komplexen Interaktionen hydrologischer und thermischer Prozesse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre ist von grundlegender Bedeutung für die Lösung von hydrologischen Fragestellungen. Deshalb wurden eine Vielzahl von numerischen Simulationstechniken für die Bodenhydrologie entwickelt, um diese Prozesse physikalisch zu beschreiben und die Größen des Wasserhaushalts quantitativ zu bestimmen. Unabhängig davon, wie komplex diese Modelle aufgebaut sind, müssen dafür Parameterwerte identifiziert werden, welche die zugrunde liegenden Gleichungssysteme hinreichend genau einstellen. Nach MCCABE et al. (2005) sind parameterreiche Modelle nicht von vornherein unsicher, jedoch nimmt die Unsicherheit zu, wenn die Modellstruktur von physikalischen Grundlagen abweicht. Das ist der Fall, wenn Parameter aus Beobachtungen oder Literaturwerten geschätzt werden können und die Prozessbeschreibung somit einen eher konzeptionellen Charakter bekommt. Das konventionelle Vorgehen ist deshalb, Modellvorhersagen mit gemessenen Zeitreihen zu vergleichen und die Parameter so anzupassen, dass eine möglichst gute Übereinstimmung von Modellergebnis und Messwert zu erreicht wird (vgl. LUKES 2006). Je komplexer bzw. parameterreicher die Modellstruktur ist, desto mehr ist die Parametrisierung und Kalibrierung jedoch mit Unsicherheiten verbunden, was wiederum eine höhere Unsicherheit von Modellvorhersagen nach sich zieht (FRANKS et al. 1997). Unsicherheiten entstehen auch durch die Kalibrierdatensätze, da diese mit nicht quantifizierbaren Messfehlern behaftet sein können. Außerdem ist es möglich, dass die Kalibrierdatensätze nicht alle Varianten des Systemverhaltens, beispielsweise Extremereignisse wie längere Trockenperioden abdecken. Für eine solide Modellkalibrierung ist es daher notwendig, dass für die zu kalibrierenden Ergebnisgrößen auch Messwerte vorliegen, die mit dem zu beschreibenden Prozess in Beziehung stehen. Beispielsweise ist es kaum möglich, mit einem Modell den Oberflächenabfluss zu schätzen, wenn für die Kalibrierung nur Tagesmittelwerte des Bodenwassergehaltes zur Verfügung stehen. Dafür wären Informationen zu möglicherweise stattfindenden präferentiellen Fließvorgängen in Makroporen notwendig.

Der Modellanwender selbst mit seinen spezifischen Modellerfahrungen, fachlichen Hintergrundinformationen und Zielvorstellungen hat ebenfalls erheblichen Einfluss auf die Modellkalibrierung (BOTTERWEG 1995). Ein Bodenkundler wird möglicherweise stärker auf die Parametrisierung der bodenphysikalischen Modellannahmen achten, während ein Pflanzenphysiologe evtl. auf die Interaktion der Prozesse zwischen Pflanze und Boden oder Pflanze und Atmosphäre mehr Wert legt. In komplexen, sehr viele Parameter umfassenden (evtl. sogar "überparametrisierten") Modellen kann es vorkommen, dass gleich gute Simulationsergebnisse in ein und demselben System durch unterschiedliche Modellstrukturen und Parametrisierungen erzielt werden können. Dieses Phänomen wird auch als Equifinality (vgl. FRANKS et al 2007) bezeichnet.

Der Idealzustand, all diese genannten Ursachen von Unsicherheiten bei der Modellanwendung auszuschließen, ist kaum zu erreichen. Für die Interpretation und Kommunikation von Modellergebnissen ist es jedoch unerlässlich, die Unsicherheiten bzw. Einschränkungen von

Modellanwendungen zu kennen (PAPPENBERGER & BEVIN 2006). Deshalb wurden und werden Techniken entwickelt, mit denen diese Modellunsicherheiten dargestellt werden (vgl. BEVEN & BINLEY 1992, BEVEN 2006, JANSSON 2012).

Das Ziel der folgenden Studie war es, am Beispiel der vorliegenden Daten zum Versuchsstandort Methau

- ein prozessorientiertes Wasserhaushaltsmodell zu parametrisieren,
- die aufgebaute Modellstruktur zu überprüfen und schließlich
- die auftretenden Modellunsicherheiten zu quantifizieren.

### 5.2.1.2 Methoden

#### Modellpaket, Struktur und Grundparametrisierung

Für die prozessorientierte (synonym auch physikalisch basierte oder deterministische) Modellierung des Standortwasserhaushalts wurde das Modellpaket CoupModel (JANSSON & KARLBERG 2004) Version 3.2 verwendet. CoupModel, entstanden aus der Verknüpfung der Modelle SOIL und SOILN (JANSSON & HALLDIN 1979, ECKERSTEN et al. 1998), erlaubt es dem Nutzer, das System Boden-Pflanze-Atmosphäre mit seinen Interaktionen zwischen abiotischer und biotischer Umwelt zu beschreiben. Durch den modularen Aufbau des Modellpaketes lassen sich Submodule implementieren, welche die bodenphysikalischen und biologischen Prozesse, die Hydrologie und Mikrometeorologie sowie das Pflanzenwachstum durch relativ einfache bis sehr komplexe gekoppelte Gleichungssysteme beschreiben. Die Auswahl geeigneter Optionen für das Design der Modellstruktur hängt dabei von der Datenverfügbarkeit und den zu untersuchenden Prozessen ab.

Die Grundlage des Modells ist ein 1D-Bodenprofil, das aus mehreren Bodenschichten aufgebaut ist. Die Wasser- und Energieflüsse im Boden werden in Abhängigkeit von den bodenphysikalischen Eigenschaften durch numerische Lösung der RICHARDS-Gleichung (RICHARDS 1931) iterativ bestimmt. Die Modellierung des Wärmetransports basiert auf FOURIER's Gesetz. Die Berechnung der Transpiration erfolgt mittels der PENMAN-Gleichung in der Form von MONTEITH (1965). Treibervariablen sind Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Eine komplette Modellbeschreibung findet sich im Modellhandbuch (JANSSON & KARLBERG 2004).

Die Modellstruktur wurde für die vorliegende Untersuchung so angepasst, dass die dynamischen Prozesse Transpiration, Interzeption und Evaporation sowie die Bodenwasserflüsse im untersuchten Pappelbestand adäquat beschrieben werden. In Tab. 5.2.1-1 sind die wichtigsten Modelleinstellungen aufgeführt, die von der Standardstruktur des Modellpaketes abweichen.

**Tab. 5.2.1-1: Ausgewählte Modelleinstellungen für die Beschreibung des untersuchten Pappelbestandes**

Modul	Option	Einstellung	Bedeutung
Interception	Interception of precipitation	on	Interzeptionsspeicher ist eine Funktion des LAI
Model structure	Evaporation	Radiation input style	Physikalisch basierter Ansatz
	Plant Type	Explicit big leaves	Separation zwischen Boden-Evaporation und Transpiration; diverse Optionen für die Beschreibung der Pflanze
	Snow Pack	On	Schneedeckenmodellierung
	Water Equation	On	Wasserfluss zwischen Bodenschichten
Plant	Plant Development	Start=f(TempSum)	Phänologisches Modell Temperatursummenansatz
Soil Hydraulic	Hydraulic Functions	van Genuchten	Parameter der pF-Kurve
	Scaling retention	Yes	Skalierung der pF-Kurve erlaubt
Potential Transpiration	Roughness	f(canopy)	Rauhigkeitslänge wird nach SHAW & PEREIRA (1982) berechnet. Iterative, numerische Lösung der Energiebilanz an der Bodenoberfläche; Verwendung eines empirischen Parameters für die Schätzung von VPD und Temperatur an der Bodenoberfläche
Soil evaporation	Evaporation method	Iterative energy balance	siehe oben
	Surface temperature	f(Energy-balance solution)	siehe oben
Soil frost	Frost interaction	No	Wasserfluss ist unabhängig von Bodentemperatur
Validation	Validation Mode	On	technischer Parameter

Für die Parametrisierung wurden die Voreinstellungen des Modells (default values), Standortinformationen der Versuchsfläche sowie Literaturwerte verwendet. Einzelparameter und Parameter-Sets (parameter tables) die von Default-Werten abweichen sind in Tab. 5.2.1-2 aufgeführt.

Tab. 5.2.1-2: Fixe Parametereinstellungen in CoupModel

Modul	Parameter	Werte	Funktion	Referenz
Plant	<i>TempSumStart</i>	89 Cdays	Pflanzenentwicklung	siehe Kap. 5.1
	<i>Latitude</i>	50.4	Berechnung der Bewölkung aus Globalstrahlung	siehe Kap. 5.1
Soil heat flows	<i>SoilInitTempConst</i>	5 °C	Einheitlicher Startwert für Bodentemperatur	Annahme
Water uptake	<i>AirMinContent</i>	1 Vol.%	Response Wurzelwasseraufnahme Bodenluft	Annahme
	<i>AirRedCoef</i>	1 [-]		Annahme
Water uptake	<i>TempCoefA</i>	1.3	Response Wurzelwasseraufnahme Bodentemperatur	siehe Kap. 5.1
	<i>TempCoefB</i>	0.5		siehe Kap. 5.1
	<i>TempCoefC</i>	9 [°C]		siehe Kap. 5.1
Plant	<i>Canopy height</i>	12,5 [m]		siehe Kap. 5.1
	<i>LAI, Lopt</i>	5	Transpiration	siehe Kap. 5.1
	<i>Root depth</i>	- 1,2 [m]	Wasseraufnahme	siehe Kap. 5.1
Soil Hydraulic	<i>Coefficients of van Genuchten and Mualem</i>	-	Soil water retention and conductivity	RETC-Anpassung von Labordaten (siehe Kap. 5.1)
Soil Profile	<i>Compartment Sizes</i>	14 Schichten von 0.025 m bis 1 m Mächtigkeit; Gesamttiefe 3.9 m	Diskretisierung des Bodenprofils	entsprechend Einbautiefe der Sensoren und Herkunft von Bodenproben.

### Bayessche Kalibrierung und Unsicherheitsanalyse

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der Ansatz der Bayesschen Kalibrierung verwendet, um Parameterunsicherheiten zu quantifizieren sowie Korrelationen zwischen Parametern darzustellen.

Eine detaillierte Beschreibung für die Anwendung der Bayesschen Kalibrierung in Prozessmodellen findet sich in VAN OIJEN et al. (2005). Das Verfahren wird in CoupModel als Subroutine angeboten (vgl. SVENSSON et al. 2008). Für die Vorstudien der Wasserhaushaltssimulationen mit CoupModel wurden Parameter ausgewählt, die aus den zahlreichen mit CoupModel durchgeführten Wasserhaushaltsstudien für ihre Sensitivität im den Wasser- und

Energietransfer bekannt sind (vgl. ALVENÄSS & JANSSON 1997, KARLBERG ET AL. 2006, SVENSSON 2008, JANSSON 2012). Zusätzliche Sensitivitätsanalysen wurden im Rahmen von Testläufen durchgeführt und mündeten schließlich in der Auswahl von 9 Parametern. Diese können einen weiten Bereich von physikalisch sinnvollen absoluten Werten einnehmen. Deshalb wurde eine a-priori-Wahrscheinlichkeitsdichte-Funktion (auch probability-density-function oder a-priori-pdf) angenommen. Die a-priori-pdf hat die Form einer Gleichverteilung. Die absoluten Parameterwerte und deren Spannweiten wurden aus der Literatur entnommen und im Vorfeld durch Testsimulationen weiter eingegrenzt

Tab. 5.2.1-3).

Tab. 5.2.1-3: Ausgewählte Parameter für die Bayessche Kalibrierung

Module	Parameter	min..max	Funktion	Referenz
Meteorological data	<i>PrecA</i> <i>OCorr</i>	0.95...1.05	Korrekturfaktor Niederschlag	SPANK (2010)
Soil Hydraulic (für alle 5 beprobten Horizonte)	<i>k<sub>mat</sub></i>	$k_{mat} \dots 4 * k_{mat}$ [mm Tag <sup>-1</sup> ]	gesättigte Leitfähigkeit der Bodenmatrix (MVG-Parameter)	Anpassung aus Laborwerten + Faktor
	<i>S<sub>s</sub></i> <i>scale</i>	0...0.25 [-]	Skalierungsparameter für <i>ThetaS</i> (MVG-Parameter)	LUNDMARK et al. (2009)
Soil evaporation	<i>Equil</i> <i>AdjustPsi</i>	0.5...2.0 [-]	Faktor steht für die Potenzialdifferenz an der Grenzschicht Boden-Atmosphäre	ALVENÄS & JANSSON (1997)
Root Water uptake	<i>Crit</i> <i>ThresholdDry</i>	400...2000 [Pa]	Response Wasseraufnahme Austrocknung	BLAKE et al. (1996)
	<i>Demand</i> <i>RelCoeff</i>	0...2 [Tag <sup>-1</sup> ]	Response Wasseraufnahme Austrocknung	Annahme
	<i>g<sub>max</sub></i>	0.01...0.05 [m s <sup>-1</sup> ]	Maximale Stomataleitfähigkeit	Annahme
Potential Transpiration (Lohammar-Funktion)	<i>g<sub>RIS</sub></i>	$10^6 \dots 10^7$ [Jm <sup>-2</sup> Tag <sup>-1</sup> ]	Globalstrahlung bei 50% Lichtsättigung	Annahme
	<i>g<sub>VPD</sub></i>	10...300 [Pa]	VPD (Dampfdruckdefizit) bei 50 % von <i>g<sub>max</sub></i>	Annahme

Die Kalibrierprozedur basiert zunächst auf dem Metropolis-Hastings-Algorithmus, einer Version des Markov-Chain-Monte-Carlo-Verfahrens (MCMC) für die zufällige Auswahl eines Parametersets aus den a-priori festgelegten Wahrscheinlichkeitsfunktionen. Die erste Auswahl für den ersten Modelllauf wird von einem festgelegten Startpunkt, im vorliegenden Fall dem Mittelwert der Wahrscheinlichkeitsfunktion, vorgenommen. Danach wird die logarithmierte

Likelihood  $\log L$  der simulierten Werte nach folgender Formel (VAN OIJEN et al. 2005) berechnet:

$$\log L = \sum_{i=1}^n \left( -0.5 \left( \frac{O_i - S_i}{M_i} \right)^2 - 0.5 \log(2\pi) - \log(M_i) \right)$$

mit  $n$  ... Anzahl der Datenpunkte (Messwerte)  
 $O$  ... beobachteter Wert (Messwert)  
 $S$  ... simulierter Wert  
 $M$  ... Standardabweichung des Modellfehlers

Nach VAN OIJEN et al. (2005) ist es möglich, auch zusätzlich einen Fehler der beobachteten Werte mit dem Modellfehler in Beziehung zu setzen. Diese Annahme erlaubt es, Fehler-schätzungen für die gemessenen Werte in die Kalibrierprozedur einzubeziehen. Die Berechnung der Standardabweichung basiert üblicherweise auf der Annahme, dass die Residuen normalverteilt sind. Diese Annahme kann jedoch problematisch, sein weil sie im Rahmen des automatisierten Kalibriermodus zunächst sorgfältig geprüft werden müsste. Außerdem ist es unter Feldbedingungen leicht möglich, dass Messwerte verzerrt sind. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn nur wenige oder keine Wiederholungen von Bodenfeuchtemessungen vorliegen oder wenn upscaling-Verfahren, beispielsweise der Bestandstranspiration aus Saftflussmessungen von nur wenigen Einzelbäumen zu Über- oder Unterschätzungen der gesuchten Variable führen. Die Grenzen der für die vorliegende Studie verwendeten Messdaten wurden in PETZOLD et al. (2011) diskutiert. Deshalb wurde für die Modellierung angenommen, dass die Residuen eher einer Verteilung nach SIVIAS (2006) entsprechen. Diese Verteilung ist eher endlastig (Heavy-Tail-Verteilung) und wird in der Weiterentwicklung der Bayesschen Kalibrierung auch im Modellpaket CoupModel angeboten und als Standard empfohlen (weitere Ausführungen dazu in VAN OIJEN et al. 2011). Für die beobachteten Werte aus den Feldmessungen (PETZOLD et al. 2011) wurde ein möglicher Messfehler von 20 % angenommen. Die verwendeten Variablen und deren angenommene absolute Abweichungen sind in Tab. 5.2.1-4 aufgeführt.

**Tab. 5.2.1-4: Validierungsvariablen für die Bayessche Kalibrierung und angenommene absolute Fehler (Messfehler)**

Messwert	Einheit	Anzahl $n$	Absoluter Fehler
Bestandstranspiration	mm d <sup>-1</sup>	580	1
Bodenwassergehalt in 5 cm	Vol. %	578	5
Bodenwassergehalt in 20 cm	Vol. %	578	5
Bodenwassergehalt in 45 cm	Vol. %	578	5
Bodentemperatur in 5 cm	°C	561	1
Bodentemperatur in 20 cm	°C	561	1
Bodentemperatur in 50 cm	°C	506	1

Im weiteren Verlauf der Modellanpassung wird mit dem Metropolis-Hastings-Algorithmus ein zweiter Punkt im vorgegebenen Parameterbereich generiert, das zugehörige Parameterset ausgewählt und der nächste Modelllauf durchgeführt. Mit den Simulationsergebnissen wird wieder  $\log L$  berechnet. Der Punkt im Parameterbereich bzw. das zugehörige Parameterset wird für die posteriori-pdf akzeptiert, wenn das Verhältnis aus aktueller  $\log L$  und jener des vorangegangenen akzeptierten Modelllaufs größer als das Akzeptanzkriterium  $a$  ist. Das Akzeptanzkriterium selbst ist normalverteilt mit einer Varianz von 5 %. Es wird für jede Iteration mit einer Zufallszahl zwischen 0 und 1 neu berechnet. Dieser Schritt führt dazu, dass auch Parametersets mit einer geringeren  $\log L$  als die vorhergehende akzeptiert werden können. Dadurch wird der Kalibrierprozedur vorgegeben, eher eine a-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung mit möglichen Parametern auszufüllen, als die Anpassung der Modellergebnisse an die Messwerte zu maximieren. Außerdem wird erreicht, dass mit der Prozedur ein globales Optimum identifiziert werden kann.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden für die Auswahl akzeptierter Parameterwerte 10.000 Modellläufe wie oben beschrieben durchgeführt. Der Simulationszeitraum umfasst drei Jahre, wobei 2006 für die Einschwingphase der Prozessgrößen und die Jahre 2007-2008 als Kalibrierzeitraum verwendet wurden. Kalibriergrößen waren Zeitreihen mit Tageswerten von Transpiration, Bodenwassergehalten sowie Bodentemperaturen (vgl. Tab. 5.2.1-4). Für die Ergebnisanalyse wurde das Statistikpaket R (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2008) verwendet.

### 5.2.1.3 Ergebnisse

Von den 10.000 Simulationsläufen erfüllten 6361 (63 %) die Akzeptanzkriterien. Im Vergleich zur a-priori-pdf reduzierte sich bei allen ausgewählten Parametern deutlich der Parameterraum und es bildete sich ein Optimum heraus (Abb. 5.2.1-1). Für den Parameter  $g_{RIS}$  deutete sich ein zweites Optimum mit jedoch deutlich geringerer Auftretens-Wahrscheinlichkeit an. Die Parameter *EquilAdjustPsi* und *PrecA0Corr* bildeten ihr Optimum nahe des Maximums bzw. Minimums der zugehörigen a-priori-pdf aus.

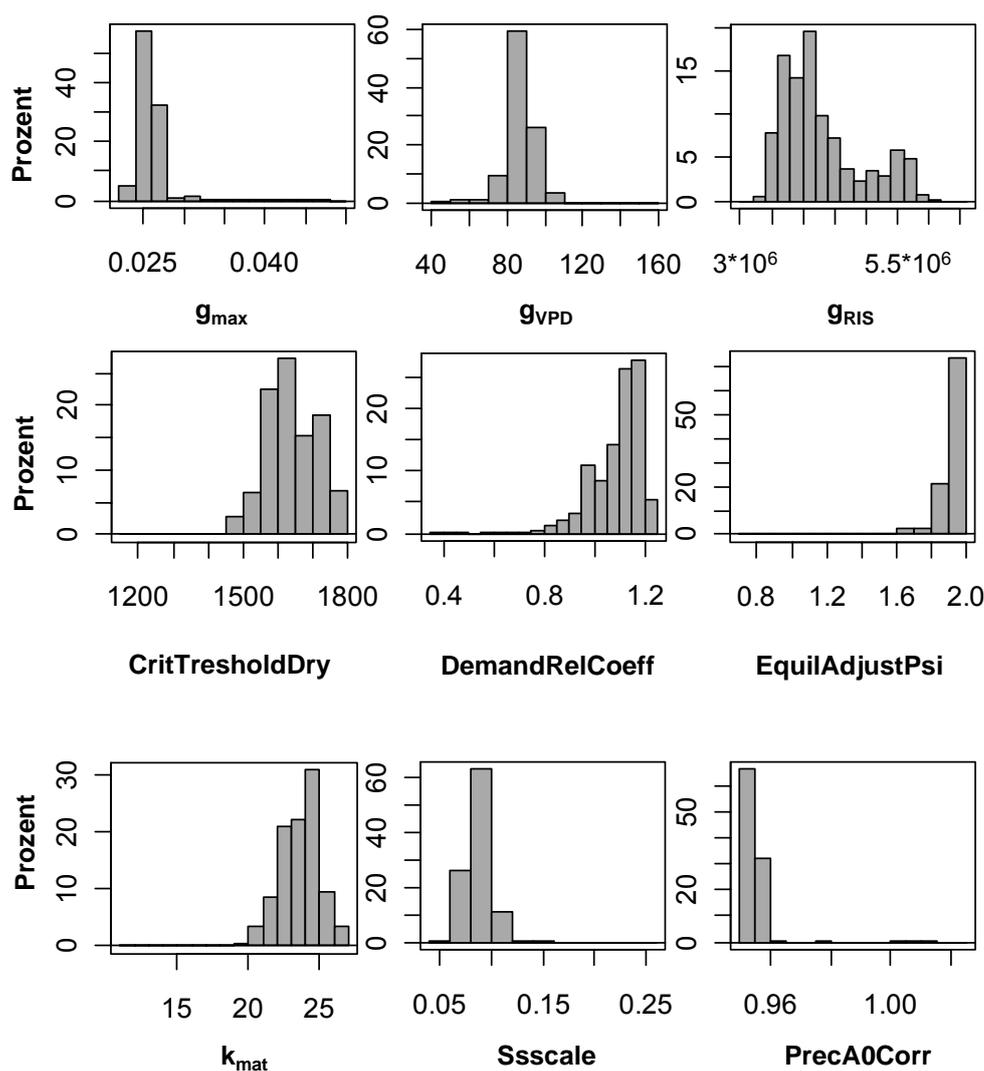


Abb. 5.2.1-1: Häufigkeitsverteilung der Parameter aus akzeptierten Modellläufen ( $n=6361$ ),  $k_{mat}$  ist beispielhaft nur für Bodenschicht 1 (0-30 cm) dargestellt.

In Tab. 5.2.1-5 sind die Mittelwerte der Parameterverteilungen vor und nach der Bayesschen Kalibrierung dargestellt. Die Unterschiede verdeutlichen ebenfalls die Ausbildung einer posteriori-pdf, die von der a-priori-pdf (Gleichverteilung) abweicht.

Tab. 5.2.1-5: Mittelwerte der Parameterverteilungen vor (prior mean) und nach (post mean und median) der Bayesschen Kalibrierung;  $MC=k_{mat}$ .

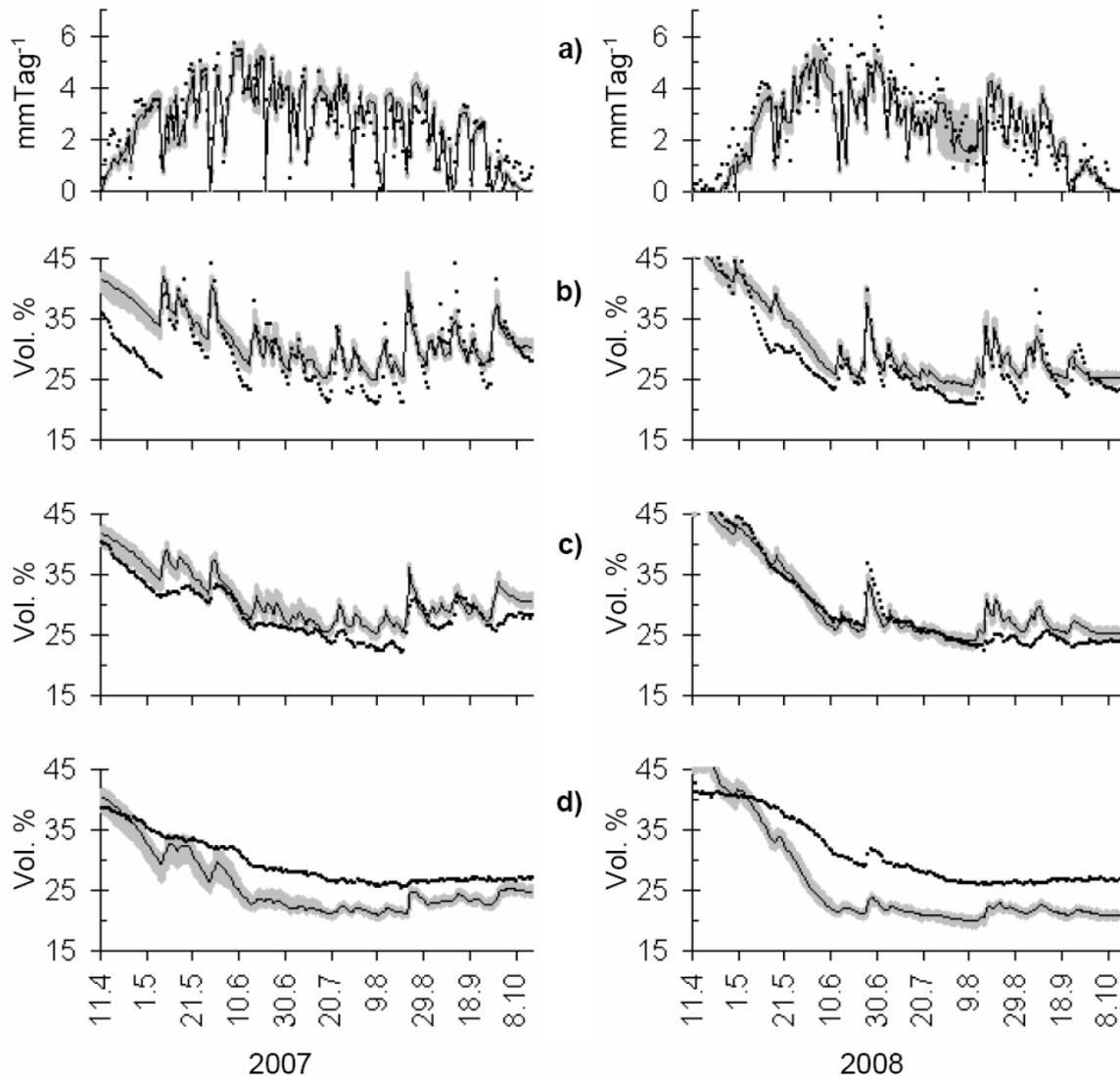
	$g_{max}$	$g_{Ris}$	$g_{VPD}$	<i>CritThres-</i> <i>holdDry</i>	<i>Demand</i> <i>RelCoeff</i>	<i>Equil</i> <i>AdjustPsi</i>		
prior mean	0,030	5,5E+06	155	1,2E+03	1,00	1,25		
post mean	0,026	4,3E+06	87	1,6E+03	1,09	1,93		
post median	0,026	4,1E+06	86	1,6E+03	1,12	1,98		
	<i>MC1</i>	<i>MC2</i>	<i>MC3</i>	<i>MC4</i>	<i>MC5</i>	<i>Ss</i> <i>scale</i>	<i>PrecA</i> <i>0Corr</i>	
prior mean	22,00	19,25	3,00	3,75	4,50	0,250	1,00	
post mean	23,55	23,94	2,98	4,66	3,20	0,086	0,95	
post median	23,77	23,84	3,00	4,64	3,22	0,085	0,95	

Tab. 5.2.1-6 listet die Korrelationsmatrix der variablen Eingangsparameter auf. Jeder Parameter ist mindestens mit einem anderen Parameter und einem Korrelationskoeffizienten über 0,4 positiv oder negativ korreliert. Auffallend ist, dass der Parameter *MC5* relativ stark mit den Parametern  $g_{max}$ ,  $g_{Ris}$ ,  $g_{VPD}$ , welche die Stomataleitfähigkeit (Transpiration) steuern, korreliert. Auch die Parameter *CritThresholdDry* und *DemandRelCoeff*, welche die Wurzelwasseraufnahme bei zunehmender Bodentrockenheit (also ebenfalls den Transpirationsprozess) beeinflussen, sind stark mit *MC5* korreliert. *MC5* selbst ist die gesättigte Matrixleitfähigkeit  $k_{mat}$  im vanGenuchten/Mualem-Modell in der tiefsten beschriebenen Bodenschicht (untere Modellgrenze).

**Tab. 5.2.1-6: Matrix der Korrelationskoeffizienten (Spearman);** orange negative (<-0,4 bzw. <-0,6) bzw. blau positive Korrelationen (>0,4 bzw. >0,6);  $MC=k_{mat}$ ; ( $p < 0,001$ ).

	$g_{Ris}$	$g_{VPD}$	<i>CritThresholdDry</i>	<i>DemandRelCoeff</i>	<i>EquilAdjPsi</i>	<i>MC1</i>	<i>MC2</i>	<i>MC3</i>	<i>MC4</i>	<i>MC5</i>	<i>PrecA0Corr</i>	<i>Ss scale</i>
$g_{max}$	-0,02	-0,64	0,34	-0,05	-0,44	0,17	0,23	0,21	0,33	-0,54	0,15	0,43
$g_{Ris}$	-	0,45	-0,47	-0,65	-0,19	-0,43	-0,14	0,12	-0,67	0,49	-0,49	0,05
$g_{VPD}$		-	-0,59	-0,41	0,14	-0,40	-0,36	0	-0,54	0,66	-0,43	-0,07
<i>CritThresholdDry</i>			-	0,60	-0,10	0,33	0,31	0,10	0,61	-0,71	0,20	0,24
<i>DemandRelCoeff</i>				-	0,29	0,48	0,19	-0,05	0,46	-0,42	0,40	-0,25
<i>EquilAdjPsi</i>					-	-0,10	-0,33	-0,52	-0,06	0,29	-0,01	-0,24
<i>MC1</i>						-	0,51	0,46	0,44	-0,49	0,53	-0,23
<i>MC2</i>							-	0,23	0,10	-0,51	0,39	0,01
<i>MC3</i>								-	0,22	-0,24	0,09	-0,04
<i>MC4</i>									-	-0,60	0,28	0,14
<i>MC5</i>										-	-0,41	-0,20
<i>PrecA0Corr</i>											-	-0,30

Die weitere Analyse der Simulationsergebnisse verfolgte den Zweck, die Modellergebnisse zu validieren. Die Transpiration, die Wassergehalte in 5 cm in beiden Jahren (Abb. 5.2.1-2a/b) sowie auch der Wassergehalt in 20 cm Tiefe (2008, Abb. 5.2.1-2c rechts) wurden mit dem Modell hinreichend genau abgebildet. Dagegen wurde der Wassergehalt in 45 cm Tiefe systematisch unterschätzt (Abb. 5.2.1-2d). Die Tageswerte für die Transpiration, das heißt die aufsummierten Mittelwerte aus allen akzeptierten Modellläufen belaufen sich 2007 (11.April bis 15.Oktober) auf 436 mm gegenüber dem gemessenen Wert von 463 mm. Im Jahr 2008 beträgt die modellierte Transpiration in der Vegetationszeit 481 mm, während 485 mm gemessen wurden.



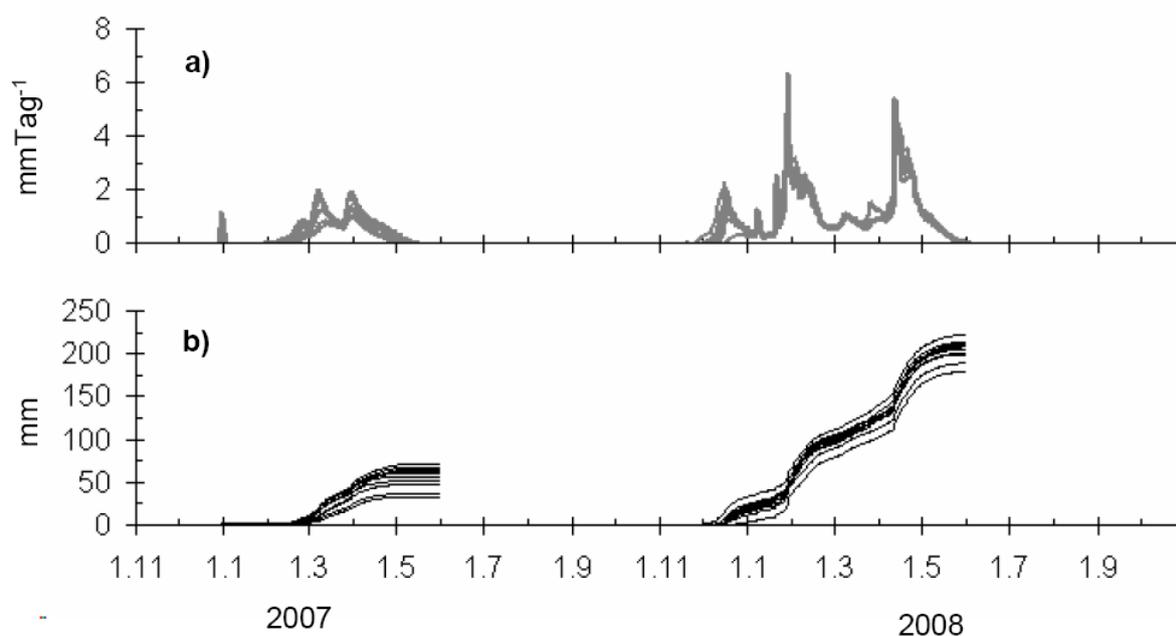
**Abb. 5.2.1-2: Validierungsvariablen zum Wasserhaushalt,** Mittelwert aus allen akzeptierten Modellläufen (—) mit Fehlerband aus Minimum und Maximum (■) und den gemessenen Werten (.....); a) Transpiration; b) Bodenwassergehalt in 5 cm c) 20 cm und d) 45 cm Tiefe.

Die Maße der Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Messdaten sind in Tab. 5.2.1-7 dargestellt. Diese Maße spiegeln den visuellen Eindruck aus Abb. 5.2.1-2 wider. Während die Bestimmtheitsmaße mit Werten  $> 0,7$  eine relativ gute Anpassung erwarten lassen, lässt sich aus den Parametern  $a$  der Regressionsgerade sowie dem mittleren Fehler  $ME$  die starke Unterschätzung der modellierten Wassergehalte in 45 cm Tiefe ablesen.

**Tab. 5.2.1-7: Maße für die Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Messdaten;** gezeigt sind die Mittelwerte der Güteparameter aller akzeptierten Modellläufe;  $a$ ,  $b$  = Parameter der Regressionsgerade ( $y_{\text{mess}} = a + b \cdot x_{\text{mod}}$ ),  $r^2$  = Bestimmtheitsmaß,  $ME$  = mittlerer Fehler Modell vs. Messung,  $RMSE$  = Root mean square error.

Variable	$a_m$	$b_m$	$r^2_m$	$ME_m$	$RMSE_m$
Bestandstranspiration	0,09	0,98	0,91	-0,1	0,5
Bodenwassergehalt in 5 cm	-3,44	1,09	0,77	0,5	4,0
Bodenwassergehalt in 20 cm	-5,59	1,14	0,90	1,0	2,9
Bodenwassergehalt in 45 cm	12,63	0,66	0,88	-3,0	4,5
Bodentemperatur in 5 cm	2,75	0,87	0,92	-1,3	2,3
Bodentemperatur in 20 cm	1,84	0,95	0,94	-1,3	2,0
Bodentemperatur in 50 cm	3,62	0,87	0,92	-2,2	2,6

Im nächsten Schritt wurde geschätzt, welche Spannweiten sich für die Vorhersage des Gesamtabflusses ergeben, wenn die Modellunsicherheiten einbezogen werden. Dafür wurden wiederum aus den akzeptierten Modellläufen jene ausgewählt, die für die Variablen Transpiration und Wassergehalt in den drei vorliegenden Bodentiefen jeweils den minimalen und den maximalen mittleren Modellfehler sowie mittleren Quadratwurzelfehler aufweisen. Dieses Set umfasste 10 einzelne Modellläufe. In Abb. 5.2.1-3 sind die Tageswerte und die kumulierten Werte für die hydrologischen Jahre 2007 und 2008 dargestellt. Der Mittelwert des aufsummierten Gesamtabflusses aus den 10 Modellläufen beträgt 52 mm (2007) bzw. 200 mm (2008). Die Spannweite zwischen Minimum und Maximum beträgt in beiden Jahren rund 20 mm.



**Abb. 5.2.1-3: Modellierter Gesamtabfluss (10 Modellläufe) in den hydrologischen Jahren 2007 und 2008, a) Tageswerte, b) kumuliert.**

Im Jahr 2007 mit geringerer Grundwasserneubildung ist der relative Fehler des Gesamtabflusses höher (35 %) als im Jahr 2008 mit höherem Gesamtabfluss (10%).

#### 5.2.1.4 Diskussion

Mit 63 % akzeptierten Modellläufen wurde eine vergleichsweise sehr hohe Akzeptanzrate innerhalb der Markov-Ketten erreicht. Die Ursache ist eine gute Abdeckung der Varianz wahrscheinlicher Parameterkombinationen durch die ausgewählten a-priori-pdfs. JIN et al. (2010) zeigten, dass bereits bei einer Akzeptanzrate von 40 - 50% im Rahmen von Niederschlag-Abfluss-Modellierungen eine angemessene und effiziente Markov-Kette angenommen werden kann. Der zweite kritische Punkt bei MCMC-Simulationen ist, dass die Markov-Kette zu einer stabilen posterior-pdf konvergiert. Diese zweite Voraussetzung für eine angemessene Einstellung des MCMC-Verfahrens wurde visuell anhand der Entwicklung der  $\log L$ -Werte überprüft. Diese wies für die einzelnen Parameter nach einer Einschwingphase mit ansteigender Modelllaufanzahl keine deutlichen Sprünge mehr auf, sodass von einer stabilen Ausfüllung der posterior-pdf mit Parametern ausgegangen werden kann. Das bedeutet, dass auch mögliche lokale Optima erfasst werden konnten und die Anzahl der 10.000 Modellläufe unter der vorgegebenen Modellstruktur und Parametrisierung für einen robusten Lauf des MCMC-Verfahrens ausreichte.

Der Versuch, die Ausbildungen der posterior-pdf (Abb. 5.2.1-1) physikalisch zu erklären, stellte sich als schwierig heraus. Zum einen sind die zu parametrisierenden Gleichungssysteme nichtlinear und vielfältig untereinander verknüpft. Zum anderen verhindert die häufige Korrelation der Parameter untereinander eine eindeutige Interpretation. Die posterior-pdf des Parameters *Sscale*, der vergleichsweise wenig Korrelationen mit anderen Parametern aufweist, deutet an, dass der aus den Labormessungen geschätzte Parameter *ThetaS* (Sättigungswassergehalt der pF-Kurve) tendenziell größer sein muss, um das Systemverhalten adequat abzubilden. Das Optimum der posterior-pdf des Parameters *EquilAdjustPsi* liegt am Maximum der a-priori-pdf. Das könnte zu der Schlussfolgerung leiten, dass der Parameterraum nicht ausreichend groß gewählt wurde. Auffallend war jedoch die starke Korrelation des Parameters *MC5* mit allen die Transpiration steuernden Parametern. Das bedeutet, dass die Modellunsicherheiten in den unteren Bodenschichten besonders groß sind, da die Eigenschaften der fünften Bodenschicht in 92 cm Tiefe bis zur unteren Modellgrenze in 3,9 m Tiefe extrapoliert werden.

Die relativ starke Unterschätzung beim simulierten Wassergehalte in 45 cm Tiefe spiegelt die Modellunsicherheiten insbesondere in dieser Tiefenstufe wider. Im Rahmen der Validierung ist zu berücksichtigen, dass die Bodenfeuchtwerte in 45 cm Tiefe nur auf den Messungen einer TDR-Sonde ohne Wiederholung basieren. Die hohen Werte der Residuen des Bodenfeuchteverlaufes in 45 cm Tiefe könnten deshalb als Ausreiser oder systematisch verzerrte Messwerte interpretiert werden. Es wurde im Rahmen der Bayesschen Kalibrierung offensichtlich keine einzige Parameterkombination gefunden, welche den Bodenfeuchteverlauf in 45 cm Tiefe überhaupt abbilden kann. Eine denkbare Erklärung dafür ist, dass für die anderen Validierungsvariablen hinreichend wahrscheinliche Parametersets gefunden werden, die zu günstigen  $\log L$ -Werten und damit systematisch zur Akzeptanz führen. SCHWÄRZEL et al. (2009) wiesen mit TDR-Messungen mit 9 bis 11 Bodenfeuchtesensoren pro Tiefenstufe in insgesamt 7 verschiedenen Tiefen bis 90 cm Tiefe die räumliche und zeitliche Variabilität der

Bodenfeuchte nach. Während bei wassergesättigten Verhältnissen an den zwei untersuchten Bodenprofilen kaum Unterschiede im Wasserhalt beobachtet wurden, nahm die Variabilität der Bodenfeuchte mit zunehmender Austrocknung vertikal und horizontal stark zu. Selbst bei einem relativ homogen aufgebauten Profil wurden auf einer horizontalen Distanz von 30 cm  $\pm$  3 Vol. % Unterschied im Wassergehalt beobachtet. In einem stärker heterogen aufgebauten Profil wurden horizontal bis zu 25 Vol.% Unterschied im Bodenwassergehalt auf der gleichen Distanz gemessen (SCHWÄRZEL et al. 2009). Bei dem verwendeten Versuchsaufbau am Standort Methau ist daher zu vermuten, dass der Einbauort in 45 cm im Profil nicht repräsentativ für das modellierte Gesamtsystem war. Eine höhere Sondenzahl mit wenigsten 2 bis 3 Wiederholungen könnte die Unsicherheiten der Bodenfeuchtemessungen verringern.

Die Unsicherheiten, die durch die Messungen auftraten, spiegelten sich in den Modellergebnissen wider. Die weitere Fragestellung war, welchen Einfluss diese Unsicherheiten auf die Vorhersage des Gesamtabflusses haben. Da der Gesamtabfluss als Indikator für die Grundwasserneubildungsrate unter Feldbedingungen nur mit sehr hohem experimentellen Aufwand zu erfassen ist, hat eine modellgestützte Abschätzung eine große praktische Bedeutung. Der geringere Gesamtabfluss im hydrologischen Jahr 2007 lässt sich auf das extrem trockene Jahr 2006 zurückführen. Die Wiederauffüllung des Bodenwasserspeichers war erst Ende Februar 2007 abgeschlossen, bevor überhaupt Wasser aus dem Bodenprofil als Abfluss abgegeben wurde (Abb. 5.2.1-3). Dagegen begann der Gesamtabfluss des hydrologischen Jahres 2008 bereits Anfang Januar 2008. In der vorliegenden Untersuchung wurde in beiden Jahren ein Unsicherheitsrahmen von 20 mm zwischen dem Minimum und dem Maximum von wahrscheinlichen Modellrealisierungen festgestellt. Im hydrologischen Jahr 2007 entsprach dies einem relativen Fehler von rund 35 % um den modellierten Mittelwert aller akzeptierten Simulationen und im Jahr 2008 rund 10 %.

Obwohl vergleichbare Studien nur selten den Unsicherheitsrahmen mitteilen, erscheinen die Befunde der vorliegenden Arbeit durchaus plausibel. Beispielsweise untersuchte SPANK (2010) die Modell-Unsicherheiten bei der Bestimmung des Gesamtabflusses. Er verwendete das Modellpaket BROOK90 (FEDERER 2002), das ähnlich aufgebaut ist wie CoupModel. Als Eingangsdaten wurden die langjährigen Messreihen hydrologischer Flussgrößen eines intensiv instrumentierten Fichtenbestandes im Tharandter Wald verwendet. Er ermittelte mittels Monte-Carlo-Simulationen Gesamtabflussmengen, die von 33 % unter bis 18 % über den mittels der Wasserhaushaltsgleichung berechneten Abflusswerten lagen. Die Abweichungen waren nach SPANK (2010) in den Jahren höher, in denen die meteorologischen Bedingungen von stark von langjährigen Mittelwerten abwichen.

#### 5.2.1.5 Schlussfolgerungen

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind Methoden wie die Generalized-Likelihood-Uncertainty-Estimation (GLUE) oder der Bayes-Ansatz geeignete Werkzeuge, die Modell- und Parameterunsicherheiten von prozessorientierten Modellen zu beschreiben (JIN et al. 2010, JANSSON 2012). Mit der Anwendung der Bayesschen Kalibrierung in CoupModel konnten die Unsicherheiten aufgezeigt werden, die trotz umfangreicher vorliegender Feldmessungen bei der Validierung und Kalibrierung auftraten. Bei der modellgestützten Abschätzung des Gesamtabflusses als Indikator für die Grundwasserneubildungsrate muss demnach ein Unsicherheitsrahmen von rund  $\pm$ 20 % berücksichtigt werden. Unter trockenen Standortsbedingungen

kann dieser Fehler noch höher ausfallen, während bei feuchten Bedingungen ein geringerer relativer Fehler angenommen werden kann. Diese Unsicherheiten sollten bei der Kommunikation von Modellergebnissen in die Praxis berücksichtigt werden. Die Erkenntnisse aus der vorgelegten Studie zur Parametrisierung, Prüfung der Modellstruktur und der Unsicherheitsanalyse lassen sich mit einer der Erfahrungen der Modellentwickler und –anwender aus Stockholm (JANSSON & KARLBERG 2004) zusammenfassen:

*“The adviser who believes too much in the figures from a mathematical model will be equally poor as the one who fully trusts the results from field investigations.”*

*(Übersetzung des Autors: Der Berater, der zu sehr an die Darstellungen eines mathematischen Modells glaubt, ist so arm dran wie jener, der voll den Ergebnissen von Feldforschungen traut.)*

#### 5.2.1.6 Literatur

- Beven, K.J. and Binley, A.M., (1992): The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction, *Hydrological Processes*, 6, p.279–298
- BEVEN, K. (2006): A manifesto for the equifinality thesis. *Journal of hydrology* 320, 18-36
- BOTTERWEG, P. (1995): The user’s influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecological Modelling* 81: 71-81
- CONRAD, Y., FOHRER, N. (2009): Application of the Bayesian calibration methodology for the parameter estimation in CoupModel. *Advances in Geosciences* 21, 13–24
- ECKERSTEN, H., JANSSON, P.-E., JOHNSON, H., (1998): SOILN Model, Ver. 9.2, User’s Manual. Division of Hydrotechnics, Communications 98:6, Department of Soil Sciences, Swedish Agricultural University, Uppsala, 113 S.
- FRANKS, S.W., BEVEN, K.J., QUINN, P.F., WRIGHT, I.R. (1997): On the sensitivity of soil-vegetation-atmosphere transfer (SVAT) schemes: equifinality and the problem of robust calibration. *Agricultural and Forest Meteorology* 86, 63-75
- JANSSON, P.E. and HALLDIN, S., (1979): Model for the annual water and energy flow in a layered soil. In: HALLDIN, S. (Ed.), *Comparison of Forest and Energy Exchange Models*. Society for Ecological Modelling, Copenhagen, 145–163
- JANSSON, P.E. & L. KARLBERG (2004). Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. - Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm. Official Documentation (online verfügbar: <http://www2.lwr.kth.se/Vara%20Datorprogram/CoupModel/NetHelp/default.htm>; Abruf am 03.02.2013)
- JANSSON, P.E. (2012): CoupModel, Model use, Calibration and Validation. *Transactions of the ASABE* 55: 1335-1346
- JIN, X., CHON-YU, X., ZHANG, Q., SINGH, V.P. (2010): Parameter and modeling uncertainty simulated by GLUE and a formal Bayesian method for a conceptual hydrological model. *Journal of Hydrology* 383, 147-155
- LUKES, M. (2006): Kalibrierung und Sensitivitätsanalyse eines Wasserhaushaltsmodells für Waldstandorte. Univ. Diss. Freiburg: Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 31

- MCCABE, M.F., FRANKS, S.W., KALMA, J.D. (2004): Calibration of a land surface model using multiple data sets. *Journal of Hydrology* 302: 209–222
- PAPPENBERGER, F., BEVEN, K.J. (2006): Ignorance is bliss: Or seven reasons not to use uncertainty analysis. *Water resources research* 42: doi:10.1029/2005WR004820
- SCHWÄRZEL, K., MENZER, A., CLAUSNITZER, F., SPANK, U., HÄNTZSCHEL, J. (2009) Soil water content measurements deliver reliable estimates of water fluxes: A comparative study in a beech and a spruce stand in the Tharandt forest. *Agric For Meteorol* 149: 1994-2006
- SIVIA, D.S., (2006): *Data Analysis: A Bayesian Tutorial*. Second edition. Oxford University Press, Oxford, 260
- SVENSSON, M., JANSSON, P.E., GUSTAFSSON, D., KLEJA, D.B., LANGVALL, O., LINDROTH, A. (2008) Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. *Ecological Modelling* 213, 331-344.
- VANOIJEN, M., ROUGHIER, J., SMITH, R. (2005): Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiol.* 25: 915-27.
- VANOIJEN, M., CAMERON, D.R., BUTTERBACH-BAHL, K., FARAHBAKHSHAZAD, N., JANSSON, P.-E., KIESE, R., RAHN, K.-H., WERNER, C., YELURIPATI, J.B. (2011): A Bayesian framework for model calibration, comparison and analysis: application to four models for the biogeochemistry of a Norway spruce forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151: 1609-1621

## 5.2.2 Modellgestützte Bewertung des Wasserhaushalts von KUP

LAMERSDORF, N., **PETZOLD, R.**, SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., B. KÖSTNER, U. MODEROW, C. BERNHOFER, C. KNUST (2010): Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen (Kap. 3.4). In: A. BEMMANN UND C. KNUST (Hrsg.): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-89998-159-9, S. 170-188

→ Das Kapitel 3.4.3 – Wasserhaushalt - wurde von **R. PETZOLD**, K. SCHWÄRZEL UND K.H. FEGER verfasst und wird hier wiedergegeben.

### 5.2.2.1 Bedeutung und modellgestützte Bewertung

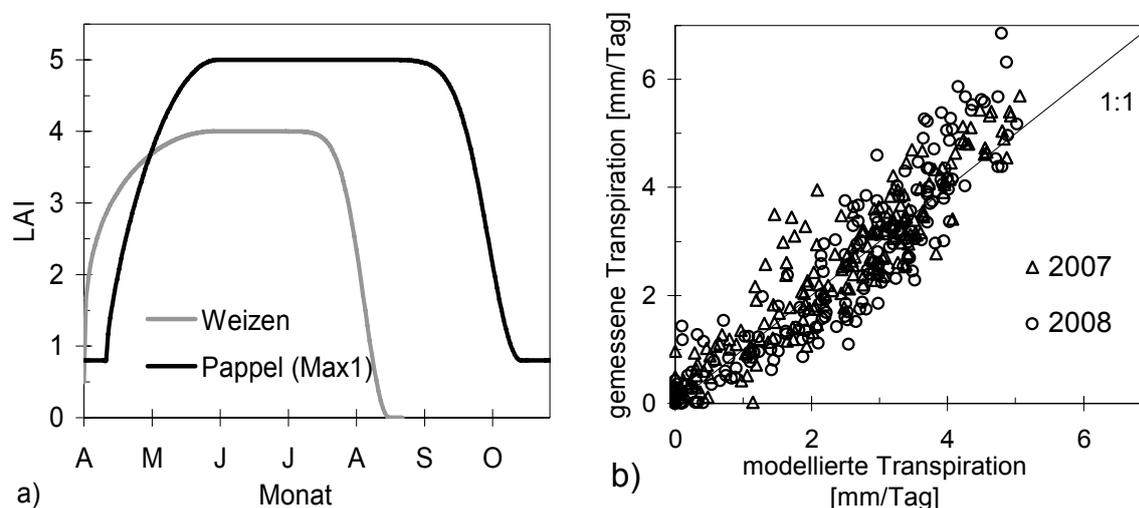
Der Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen ist sowohl im Hinblick auf die Biomasseproduktion, das heißt den Ertrag, als auch auf die Wirkungen im Landschaftswasserhaushalt von besonderer Bedeutung. Die Auswirkungen eines entsprechenden Landnutzungswechsels auf Grundwasserneubildung und Gebietsabfluss wurde in mehreren Untersuchungen (zum Beispiel in Schweden: PERSSON & LINDROTH 2007 und in Großbritannien: STEPHENS et al. 2001) herausgestellt. Danach verbrauchen Kurzumtriebsplantagen mit Pappel und Weide deutlich mehr Wasser als Ackerkulturen, was zu einem Rückgang der Grundwasserneubildung bzw. des Gebietsabflusses führen kann. Bisher existieren für Standortverhältnisse in Deutschland und häufig verwendete Baumarten bzw. Hybridzüchtungen jedoch nur wenige Untersuchungen zum Wasserhaushalt auf Standortebene. BUNGART & HÜTTL (2004) untersuchten zum Beispiel auf einer rekultivierten Bergbaufläche im Südosten Brandenburgs intensiv den Wasserhaushalt einer Kurzumtriebsplantage mit den Pappelklonen Beaupré und Androscoggin und fanden signifikante Unterschiede im Wasserverbrauch der verwendeten Klone. Eine Verallgemeinerung der Ergebnisse auf andere Standorte oder eine Übertragung auf ganze Einzugsgebiete ist jedoch mit großen Unsicherheiten behaftet. Vor allem für die Darstellung von klon-, standorts- und bewirtschaftungsabhängiger Entwicklung der Phänologie und des Wasserverbrauchs fehlen experimentelle Befunde aus Felduntersuchungen.

Im Rahmen des Projekts AGROWOOD erfolgten deshalb experimentelle Wasserhaushaltsmessungen in einer Kurzumtriebsplantage (Pappelklon Max 1 *P. nigra* x *P. maximowiczii*) am Standort Methau (Mittelsächsisches Lösshügelland) (PETZOLD et al. 2009). Diese Ergebnisse sind Grundlage für eine modellgestützte Bewertung unter Hinzunahme weiterer naturräumlich unterschiedlicher Standorte in Sachsen (Tab. 5.2.2-1). Als Simulationsumgebung wurde das Programmpaket CoupModel (JANSSON & KARLBERG 2004) verwendet, das durch den modularen Aufbau und die Kopplung von Energie- und Stoffflüssen eine flexible Darstellung verschiedenster Ökosysteme erlaubt. Die Modellkalibrierung erfolgte anhand der in den Jahren 2007 bis 2008 am Standort Methau gemessenen Zeitreihen für die tägliche Transpirationsrate und den Bodenfeuchteverläufen in 5, 20 und 45 cm Bodentiefe (Tab. 5.2.2-2). Für Vergleiche wurden ein Winterweizenbestand in Anlehnung an Heidmann et al. (2000) und Verdunstungsdaten der Lysimeterstation Brandis bei Leipzig parametrisiert und kalibriert.

**Tab. 5.2.2-1: Kurzcharakteristik der vier Untersuchungsstandorte in Sachsen;** Klimadaten (1996-2008): Jahresmittelwerte T=Temperatur, N=korr. Niederschlag, ETP=Grasreferenzverdunstung, KWB=Klimatische Wasserbilanz (N-ETP), nFK<sub>1,2m</sub>=nutzbare Feldkapazität, bezogen auf den durchwurzelten Boden (1,2 m).

Standort	T [°C]	N [mm a <sup>-1</sup> ]	ETP [mm a <sup>-1</sup> ]	KWB [mm a <sup>-1</sup> ]	nFK <sub>1,2m</sub> [mm]
Köllitzsch (8)	9,9	526	628	- 102	230
Methau (5)	9,2	758	654	+ 104	260
Tharandt (9)	9,0	957	815	+ 142	210
Pommritz (3)	9,8	685	534	+ 151	270

Die Blattflächenentwicklung (LAI = leaf area index) im Jahresverlauf wurde als Funktion der Temperatursumme dargestellt (Abb. 5.2.2-1a).



**Abb. 5.2.2-1: Zu Parametrisierung und Validierung** a) Modellierter LAI von Pappel und Winterweizen; b) gemessene vs. modellierte Transpiration des Pappelbestandes ( $n = 300$ )

Die Parametrisierung des Pappelbestandes wurde im Simulationszeitraum 1996-2008 konstant gehalten (keine Berücksichtigung unterschiedlicher Altersphasen). Der Modellbestand repräsentiert somit den, für die Standortsbedingungen in Methau voll entwickelten und optimal produzierenden Bestand im Alter von 8 bzw. 9 Jahren. Die Parametrisierung einer Vergleichsfrucht umfasst nur Winterweizen ohne Berücksichtigung von Fruchtfolgen.

Im Ergebnis der Modellvalidierung mit den Daten der Messperiode 2008 und Informationen zur Durchwurzelung (Senkwurzeln < 1,3 m) wurden Durchwurzelungstiefe und maximaler Blattflächenindex angepasst (Abb. 5.2.2-1). Das Modell wurde mit dem Ziel der besten Anpassung an die gemessenen Daten kalibriert (Tab. 5.2.2-2).

**Tab. 5.2.2-2: Maße für die Anpassungsgüte der Modellergebnisse an die Messdaten** (2007 und 2008);  $n$  = Anzahl der Variablen (umfasst auch Zeiten in der Vegetationsruhe);  $a$ ,  $b$  = Parameter der Regressionsgerade ( $y_{\text{mess}} = a + b \cdot x_{\text{mod}}$ ),  $r^2$  = Bestimmtheitsmaß, ME = mittlerer Fehler Modell vs. Messung, RMSE = Root mean square error.

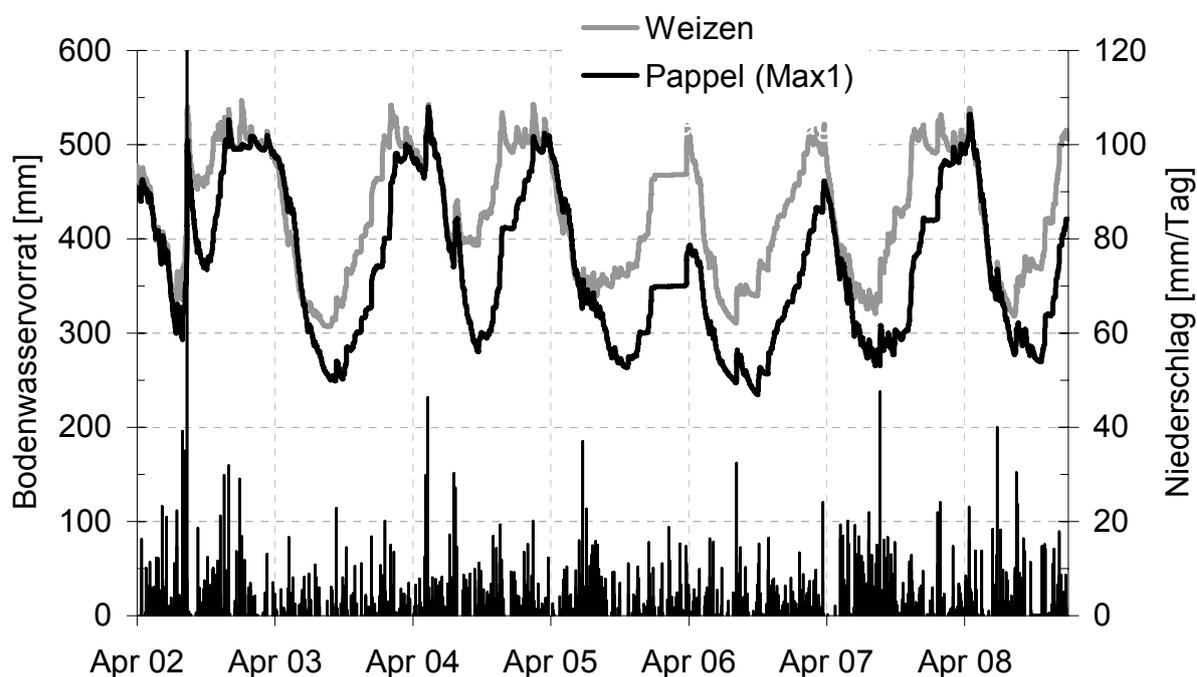
Variable	$n$	$a$	$b$	$r^2$	ME	RMSE
Transpiration	600	-0.01	1.01	0.90	-0.0 mm/Tag	0.5 mm d <sup>-1</sup>
Wassergehalt 5 cm	600	-4.0	1.12	0.78	-0.0 Vol. %	4.2 Vol. %
Wassergehalt 20 cm	600	-2.0	1.11	0.92	-1.6 Vol. %	3.1 Vol. %
Wassergehalt 45 cm	600	6.5	0.82	0.93	-0.4 Vol. %	2.2 Vol. %

Eine Analyse der Modellunsicherheiten erfolgte mit dem automatischen Kalibriermodus im CoupModel, der auf den Bayes'schen Prinzipien beruht (SVENSSON et al. 2008). Dabei wurde ein Messfehler von 20 % für die gemessenen täglichen Transpirationsraten, Wassergehalte sowie die Gesamt-Interzeption in der Vegetationszeit unterstellt. Für insgesamt 15 Parameter, die besondere Bedeutung für die Interaktion zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre besitzen, wurde für die 10.000 Simulationsläufe (Monte-Carlo-Markov-Ketten) des Kalibrierzeitraumes 2007 ein Streubereich von  $\pm 50$  % (Gleichverteilung) erlaubt. Im Ergebnis (Mittelwert aus 800 akzeptierten Modellläufen) wurde die gemessenen Transpiration (Jahressumme 2007) um  $\sim 8$  % unterschätzt. Das bedeutet, dass die Best-Fit-Parametrisierung für die Simulation des Wasserhaushaltes (1996-2008) wahrscheinlich eine leichte Überschätzung der Transpirationsrate verursacht, was jedoch im Rahmen der vorliegenden Untersuchung als vertretbar eingeschätzt wird.

#### 5.2.2.2 Bodenwasserdynamik, Wasserbilanz und Grundwasserneubildung

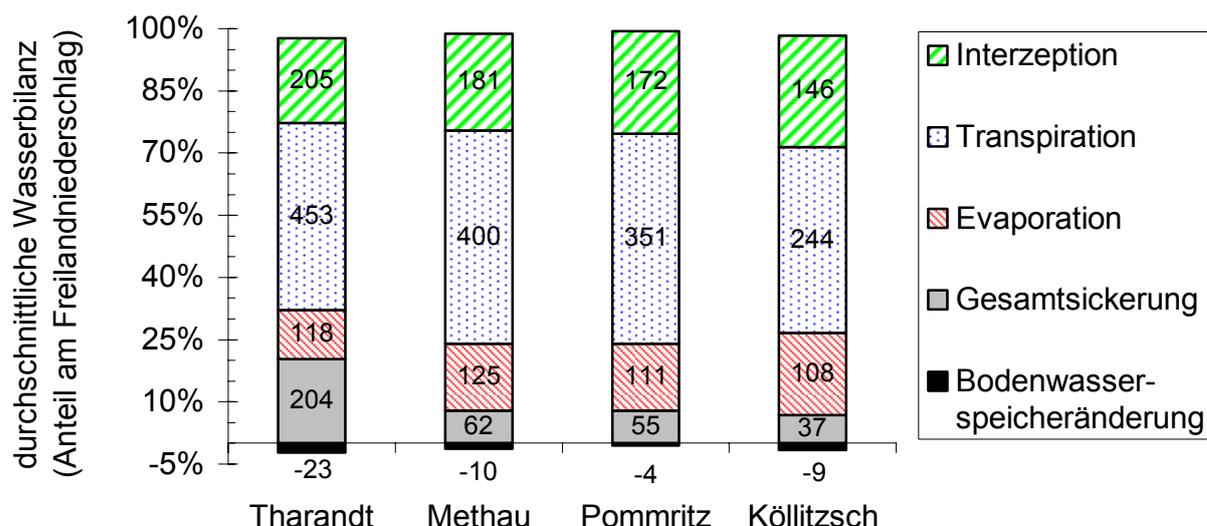
Nach früheren Ergebnissen für Methau (PETZOLD et al. 2009), beträgt der relative Anteil der Transpiration am Freilandniederschlag  $\sim 50$  % (Interzeption 25 %, Evaporation 15 %, Tiefensickerung 10 %). Die Simulationsergebnisse auf täglicher Basis erlauben jedoch auch eine Bewertung der Bodenwasserdynamik im Verlauf der Vegetationsperiode. Abb. 5.2.2-2 verdeutlicht die tiefere Ausschöpfung des Bodenwasservorrates und die verzögerte Wiederauffüllung ab Herbst unter Pappel im Vergleich zu Weizen. Die Ursachen sind die höhere Interzeption des Pappelbestandes wegen der höheren Blattfläche sowie die längere Belaubung bis Ende September, während bei Weizen die Ernte schon Mitte August abgeschlossen ist. Darüber hinaus werden durch die tiefere Durchwurzelung der Pappel auch tiefere Bodenwasserreserven besser erschlossen. Während die Herbst- und Winterniederschläge ausreichen, um den Bodenwasservorrat unter Weizen bis zum Vegetationsbeginn des Folgejahres wieder aufzufüllen, treten unter Pappel in manchen Jahren bereits zu Beginn des Laubaustriebs deutliche Bodenwasserdefizite auf. Die verzögerte, beziehungsweise verhinderte Auffüllung hat zur Folge, dass die Perioden, in denen der Bodenwassergehalt über Feldkapazität steigt, verkürzt sind oder auf manchen Standorten selten oder gar nicht vorkommen. Dadurch tritt unter Pappel im Vergleich zu Weizen eine geringere Sickerwasserrate auf. Der Wasserhaushalt ist auf den trocken-warmen Standorten des Nordsächsischen Tieflands im Vergleich der vier Standorte (Tab. 5.2.2-1) am stärksten angespannt. Diese Befunde decken sich mit den Ergebnissen von SCHINDLER et al. (2007), die für landwirtschaftliche Flächen in Mittel- und Nordostdeutschland ein hohes Trockenheitsrisiko ausweisen. Der Anbau von

Pappeln und Weiden mit hohen Ansprüchen an den Wasserhaushalt ist somit in diesen Regionen auf Standorten ohne Grundwasseranschluss nicht zu empfehlen (siehe Kapitel 3.3).



**Abb. 5.2.2-2: Zeitlicher Verlauf der Änderungen des Bodenwasservorrates unter Weizen und Pappel und Niederschlagsverteilung am Standort Methau, Referenztiefe des Bodenprofils 1,2 m, 1. April jeden Jahres mit Führungslinien (Beginn des Laubaustriebs).**

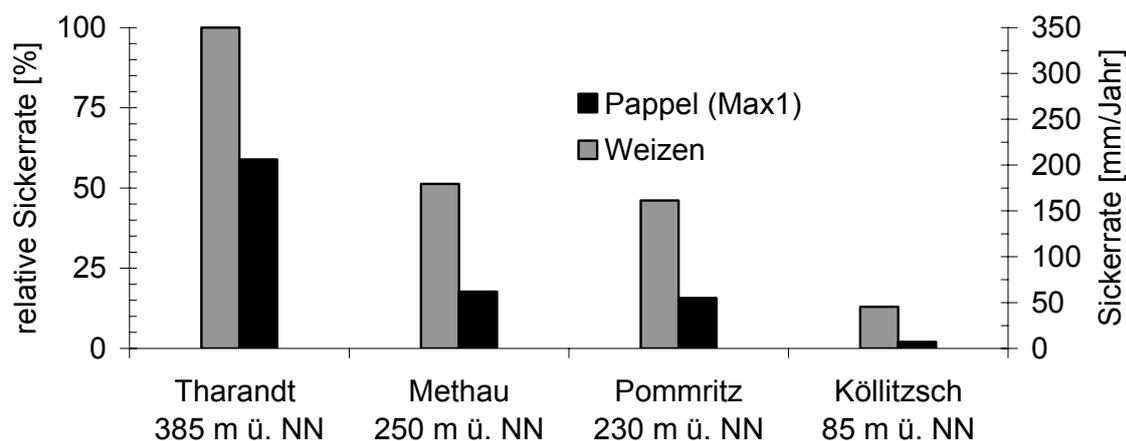
Die reliefbedingte, klimatische Gliederung von Sachsen mit einer zunehmenden Differenz zwischen Niederschlag und Potenzieller Verdunstung (Nord-Süd-Gefälle der Klimatischen Wasserbilanz) tritt auch beim Vergleich der Wasserbilanzen der Modellstandorte hervor (Abb. 5.2.2-3). Die höchste durchschnittliche Transpirations- und Interzeptionsrate tritt mit  $453 \text{ mm a}^{-1}$  beziehungsweise  $205 \text{ mm a}^{-1}$  am Standort Tharandt (Untere Berglagen) auf, während Transpiration und Interzeption in Köllitzsch (Tiefeland) jeweils nur  $244$  bzw.  $146 \text{ mm a}^{-1}$  betragen. Hinsichtlich der absoluten Evaporation ist zwischen den Standorten kein deutlicher Unterschied festzustellen. Dagegen sind die Gesamtsickerung und damit der Beitrag zur Grundwasserneubildung oder dem Gebietsabfluss am Standort Tharandt mit durchschnittlich  $204 \text{ mm a}^{-1}$  am höchsten. Das entspricht einem relativen Anteil von 21 % des Freilandniederschlags. Die Grundwasserneubildung geht auf den nördlichen Standorten deutlich zurück und beträgt nur noch rund 40 bis 60 mm beziehungsweise 7 bis 8 % des jeweiligen Freilandniederschlags.



**Abb. 5.2.2-3: Zusammensetzung der durchschnittlichen Jahreswasserbilanz (1996-2008) an den vier Modellstandorten in Sachsen** (Absolutwerte der einzelnen Komponenten [ $\text{mm a}^{-1}$ ] im Balken dargestellt). Für alle vier Flächen wurden nur die Klimavariablen des jeweiligen Standorts verwendet, die Bodenparametrisierung blieb konstant (Referenzboden Methau  $nFK_{1,2m}=260 \text{ mm}$ ).

Die hohen Sickeraten am Standort Tharandt sowohl unter Weizen als auch Pappel sind auf die vergleichsweise hohen Niederschläge im Staubereich des Erzgebirges zurückzuführen. Bei einer Änderung der Landnutzung von Acker (Weizen) zu Kurzumtriebsplantage (Pappel, Max) würde sich die Sickerwasserrate auf diesem Standort von  $350 \text{ mm a}^{-1}$  auf  $200 \text{ mm a}^{-1}$  reduzieren, was einem Rückgang um 40 % entspricht (Abb. 5.2.2-4). Im Sächsischen Hügelland verringert sich die Sickerwasserrate bei Landnutzungsänderung um  $\sim 110 \text{ mm}$  (65 %). Im Nordsächsischen Tiefland (Standort Köllitzsch) wäre die absolute Änderung der Sickerwasserrate zwar geringer ( $-40 \text{ mm}$  bzw. 84 %), doch unter Pappel ist dann kein deutlicher Beitrag zur Grundwasserneubildung oder dem Gebietsabfluss mehr zu erwarten.

Die Befunde auf Standortsebene zeigen insgesamt einen deutlichen Rückgang der Raten für die Grundwasserneubildung beziehungsweise den Gebietsabfluss, die ein Landnutzungswechsel von Weizen zur Kurzumtriebsplantage nach sich ziehen kann. Dies kann sich negativ auf die Wasserführung von naturschutzfachlich oft wertvollen kleinen Fließ- und Standgewässern oder Feuchtgebieten auswirken. Die Anlage von Kurzumtriebsplantagen direkt am Zufluss oder im unmittelbaren Umfeld solcher Kleinbiotope erscheint daher problematisch.



**Abb. 5.2.2-4: Durchschnittliche Gesamtsickerrate auf den vier sächsischen Modellstandorten unter Winterweizen und Pappel-KUP** (jeweils standortstypische Klima- und Bodenbedingungen, Erläuterungen in Tab. 5.2.2-1).

Für eine Abschätzung von Grundwasserneubildung und Gebietsabfluss als Komponenten des Landschaftswasserhaushaltes ist der Skalenübergang vom Standort zum Einzugsgebiet notwendig. Aus vergleichenden Wassereinzugsgebietsstudien geht hervor, dass die Flächengröße von Aufforstungen mindestens 20 bis 25 % der Größe des Einzugsgebietes einnehmen muss, um den Rückgang des Gebietsabflusses mittels Pegelmessungen oder in Modellstudien sicher nachweisen zu können (BOSCH & HEWLETT 1982, Eckhardt et al. 2006). Danach würde beispielsweise die Neuanlage von 2.500 ha Kurzumtriebsplantage<sup>1</sup> auf Ackerland in einem Einzugsgebiet erst zu einem quantifizierbaren Rückgang des Gebietsabflusses führen, wenn das Wassereinzugsgebiet die Größe von 10.000 ha (100 km<sup>2</sup>) unterschreitet.

Prozessorientierte Modelle, welche die Dynamik des Wasser- und Stoffhaushalts auf der Ebene großer Einzugsgebiete darstellen können, sind jedoch geeignet, die Potenziale und Risiken von Landnutzungsänderungen zu erfassen. Dafür sind die Kenntnis der Ausgangslage (Landnutzungsverteilung, detaillierte Beschreibung von Bewirtschaftungsmaßnahmen), eine möglichst detaillierte Charakterisierung der Kurzumtriebsplantage, insbesondere die pflanzenspezifische Parametrisierung im Zeitverlauf sowie Lage und Größe dieser Baumbestände in einem Einzugsgebiet entscheidend. WAHREN et al. (2007) beschreiben am Beispiel von Wassereinzugsgebieten im Mittleren Erzgebirge die Effekte von Landnutzungsänderungen (Waldmehrung mit Baumarten der natürlichen Waldgesellschaft) auf die Wasserretention. Demnach gehen Grundwasserneubildung und der Gebietsabfluss zurück, wenn sich der Waldflächenanteil erhöht und die Ackerfläche entsprechend verringert. Besonders zu erwähnen ist dabei ein Rückgang des Oberflächenabflusses. Bewegt sich weniger Wasser an der Oberfläche, hat dies eine reduzierte Bodenerosion und einen geringeren Sedimenteintrag in Gewässer oder auch Talsperren zur Folge (z.B. WOHLRAB et al. 1992). Eine geringere Bodenerosion bedeutet gleichzeitig eine Reduktion des meist partikelgebundenen Austrags des Nährstoffs Phosphor. Zusammen mit dem Rückgang des Nitrataustrags mit dem Sickerwas-

<sup>1</sup> Die Biomasse aus rund 2.500 ha Kurzumtrieb ( $8 t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  Zuwachs, 6 % Ernteverlust, Verbrennung bei 35 % Restfeuchte) ist etwa notwendig, um ein Blockheizkraftwerk mit einer Leistung bis zu  $3,5 \text{ MW}_{\text{th}} + 2,5 \text{ MW}_{\text{el}}$  ausschließlich mit Hackschnitzeln zu betreiben.

ser verbessert sich somit insgesamt die Wasserqualität. Schließlich kann eine Baumbestockung die Scheitelwellen des Abflusses bei kleinen bis mittelgroßen Regenereignissen durch günstigere Vorfeuchte- und Infiltrationsbedingungen verzögern (WAHREN et al. 2007, 2008). Dadurch leisten auch Kurzumtriebsplantagen einen potenziellen Beitrag zum flächendeckenden Hochwasserschutz. Insgesamt ist im Zusammenhang mit dem Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen eine differenzierte Betrachtungsweise notwendig. Denn der im Vergleich zu ackerbaulichen Kulturen deutlich höhere Wasserverbrauch dieser Landnutzungsform kann im Hinblick auf den Landschaftshaushalt sowohl negative als auch positive Wirkungen zur Folge haben. Sollen Risiken minimiert und Leistungen optimiert werden, sind Szenarienanalysen unter Berücksichtigung der jeweiligen standörtlich-naturräumlichen Bedingungen erforderlich.

### 5.2.2.3 Literatur

- BOSCH, J.M., HEWLETT, J.D. (1982), A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.* 55, 3-23.
- BUNGART, R., HÜTTL, R. F. (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 Forest Research* 123, 105-115.
- ECKHARDT, K., BREUER, L., FREDE, H.G. (2006) Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. *J. Hydrol.* 273, 164-176.
- HEIDMANN, T., THOMSEN, A., SCHELDE, K. (2000) Modelling soil water dynamics in winter wheat using different estimates of canopy development. *Ecological Modelling* 129, 229–243.
- Jansson, P.E. & L. Karlberg (2004): Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. - Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm 435 S., (<ftp://www.lwr.kth.se/CoupModel/CoupModel.pdf>)
- PERSSON, G., LINDROTH, A. (1994) Simulating evaporation from short-rotation forest: variations within and between seasons. *J. Hydrol.* 156, 21-45
- PETZOLD, R., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2009) Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: Reeg, T., Bemann, A., Konold, W., Murach, D., Spiecker, H. (Hrsg.) *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Wiley-VCH Weinheim. 181-191.
- SCHINDLER, U., STEIDL, J., MÜLLER, L., EULENSTEIN, F., THIÈRE, J. (2007) Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 170, 357-362.
- SCHOLZ, V., HELLEBRAND, H. J., HÖHN, A. (2004) Energetische und ökologische Aspekte der Feldholzproduktion. Institut für Agrartechnik Bornim e.V., Bornimer Agrartech. Berichte Heft 35, 15-32.
- STEPHENS, W., HESS, T., KNOX, J. (2001) Review of the effects of energy crops on hydrology. Cranfield University. 59 S. (online: <https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/>).
- SVENSSON, M., JANSSON, P.E., GUSTAFSSON, D. KLEJA, D.B., LANGVALL, O., LINDROTH, A. (2008) Bayesian calibration of a model describing carbon, water and heat fluxes for a Swedish boreal forest stand. *Ecological Modelling* 213, 331-344.

- WAHREN, A., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., MÜNCH, A., DITTRICH, I. (2007) Identification and model based assessment of the potential water retention caused by land-use changes. *Advances in Geosciences* 11, 49-56.
- WAHREN, A., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H. (2008) Uncertainties in the parameterisation of rainfall-runoff-models to quantify land-use effects in flood risk assessment. In: Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W., Harrop, J. (Eds.) *Flood Risk Management: Research and Practice*, CRC Press/Balkema Proceedings and Monographs in Engineering, Water and Earth Science, pp. 1479 - 1483, Taylor & Francis Group, London, ISBN: 978-0-415-48507-4.
- WOHLRAB, B., ERNSTBERGER, H., MEUSER, A., SOKOLLEK, V. (1992) *Landschaftswasserhaushalt - Wasserkreislauf und Gewässer im ländlichen Raum. Veränderungen durch Bodennutzung, Wasserbau und Kulturtechnik*. Paul Parey, 352 S.

### 5.3 Raumplanerische Grundlagen für die umweltgerechte Biomasseproduktion

#### 5.3.1 Verknüpfung von Biomasseproduktion auf KUP mit Belangen des Natur- und Bodenschutzes – Linking biomass production in short rotation coppice with soil protection and nature conservation

**PETZOLD, R., BUTLER-MANNING, D., FELDWISCH, N., GLASER, T., SCHMIDT, P.A., DENNER, M. FEGER, K.H.:** Linking biomass production in short rotation coppice with soil protection and nature conservation. *Journal of Biogeosciences and Forestry* (submitted, under review)

##### 5.3.1.1 Abstract

Biomass from short rotation coppice (SRC) plantations has attracted widespread attention as a component of new sustainable energy concepts. Nevertheless, as yet the surface area of SRC plantations in Europe is relatively low compared to other biomass producing land-use systems. This is difficult to understand because it has been shown that SRC systems also offer distinct ecological benefits. Therefore, greater consideration of the corresponding ecosystem services should be incorporated into land-use planning processes. Presented in this study is a conceptual framework for the integration of soil protection and nature conservation into the spatial prioritisation of areas suitable for SRC. This approach includes the development of a site-specific yield model and the identification and classification of criteria and indicators for both soil protection and nature conservation. The basic concept for planning procedures was established and tested for the State of Saxony (Germany). Existing constraints were identified, and related mainly to the availability of information at different spatial scales. The regional-scale study emphasised the considerable biomass potential of SRC and the related synergy effects for soil protection and nature conservation. Future work should focus on the local (district, farm) and catchment scale and attempt to integrate additional aspects such as hydrological ecosystem services and carbon sequestration.

Keywords: short rotation coppice, yield estimation, soil protection, nature conservation, planning

##### 5.3.1.2 Introduction

A goal of the European Union states that up to the year 2020 the contribution of renewable sources of energy to total primary energy consumption should increase to a proportion of 20 % (EC 2009). Of the biomass producing systems, plantations of fast growing tree species with short rotations and subject to coppice management (SRC), grown on arable land for the purposes of heat or combined heat and power production are seen as a very effective means to achieve increased environmental benefits. In comparison to other biomass production systems, such as oil seed rape for oil production or maize for gasification, SRC is characterised by a positive greenhouse gas balance (Hellebrand et al. 2010) and, therefore, low CO<sub>2</sub> emission reduction costs (SABAP 2007), positive effects on soil ecology (MAKESCHIN 1994), and increased biodiversity (ROWE et al. 2010, GLASER & SCHMIDT 2010). These positive effects become even more pronounced when climate change scenarios are taken into consideration (VONHAAREN et al. 2010). The aforementioned benefits provided to society by SRC may be

---

summarised under the heading of ecosystem services (DAILY et al. 1997). It is also suggested from an economic perspective that lignocellulose supply systems like SRC be stimulated in order to develop the high inherent potential for the production of bioenergy within Europe (BERNDES & HANSSON 2007, DEWIT & FAAJI 2010). At present, however, the area of SRC in Europe remains rather low in comparison with other biomass systems. There are many possible reasons for this, for example:

- low availability of arable land for the establishment of SRC systems due to competition with food production;
- biased market situation brought about by counterproductive subsidies in the agricultural biomass production sector (SABAP 2007, 2010, BERNDES & HANSSON 2007);
- few best practice examples sufficiently highlighting the benefits of SRC (HOFFMANN & WEIH 2005);
- prejudices on the part of environmentalists and the public against land-use alterations (PRETZSCH & SKODAWESSELY 2010)
- legislative restrictions placed on landowners;
- reduction of landowners' opportunities to adjust agricultural production in reaction to short-term market developments as SRC is a long term commitment;
- a high proportion of arable land is merely leased and not owned;
- no adequate consideration of SRC in land-use planning procedures to date.

Some of the obstacles mentioned may be reduced only through modifications to the political framework conditions. However, existing knowledge with regard to SRC must also be better communicated, in order to promote broader acceptance amongst the various stakeholder groups (SKODAWESSELY et al. 2008).

The authors hypothesised that an integrated ('holistic') planning approach would be useful to develop greater practical evidence of SRC. In a first step, the potential effects of biomass production in SRC with regard to nature conservation and soil protection should be recognised as being important components of ecosystem services (DAILY et al. 1997). Therefore, existing synergy effects should be depicted and assessed, e.g. within planning processes or formulation of subsidy programs, as should potential trade-offs.

The aim of the study was to develop a conceptual framework for the planning of SRC at a regional scale in the Federal State of Saxony (Germany). This included: 1) a conceptual model to predict SRC biomass production on the basis of available soil and climate data; 2) defining priority and exclusion areas in relation to soil protection; 3) defining priority and exclusion areas in relation to species and habitat protection and legally protected areas; 4) application of the results within a GIS environment.

### 5.3.1.3 Materials and methods

#### Study area

The Federal State of Saxony is located in eastern Germany. It covers a total area of 18 415 km<sup>2</sup>. The state can be classified into three main geographical regions along a site gradient running from north to south, namely the lowlands, the hilly region and the low mountain range region (Tab. 5.3.1-1).

**Tab. 5.3.1-1: Main geographic regions of Saxony**, and the corresponding climate and soil characteristics.

Geographic region	Altitude [m asl]	Mean annual air temperature [°C]	Mean annual precipitation [mm]	Predominant soil type
Lowlands	80 - 200	8.0 – 9.0	550 - 650	Sandy Cambisols
Hilly region	100 - 400	7.5 – 9.0	480 - 800	Luvisols
Low mountain range	400 - 1215	4.0 – 8.0	700 - >1 000	Skeletal Cambisols

Agriculture is the predominant land use in the Saxony lowlands, particularly in the more fertile areas located at the transition to the hilly loess region. There are also large areas to the north and northeast of the lowlands that have been affected by lignite open pit mining and subsequent reclamation. Forest cover amounts to 27 % of the lowland surface area.

The hilly region of Saxony is a typically agrarian landscape with large open fields featuring only very few structural elements such as trees and shrubs. Forests cover only 12 % of the state's hilly region. Due to their fine texture and the intensive farming, the soils are often prone to erosion by wind and water.

Forest cover in the low mountain range (Ore Mountains) is 42 % of the surface area. Arable land uses still predominate in the lower parts, but with increasing altitude grasslands becomes dominant and in the upper parts forest. Most of Saxony's rivers spring from the Ore Mountains, rendering the region extraordinarily important for public water supply.

#### Estimation of the site-specific production of biomass in SRC

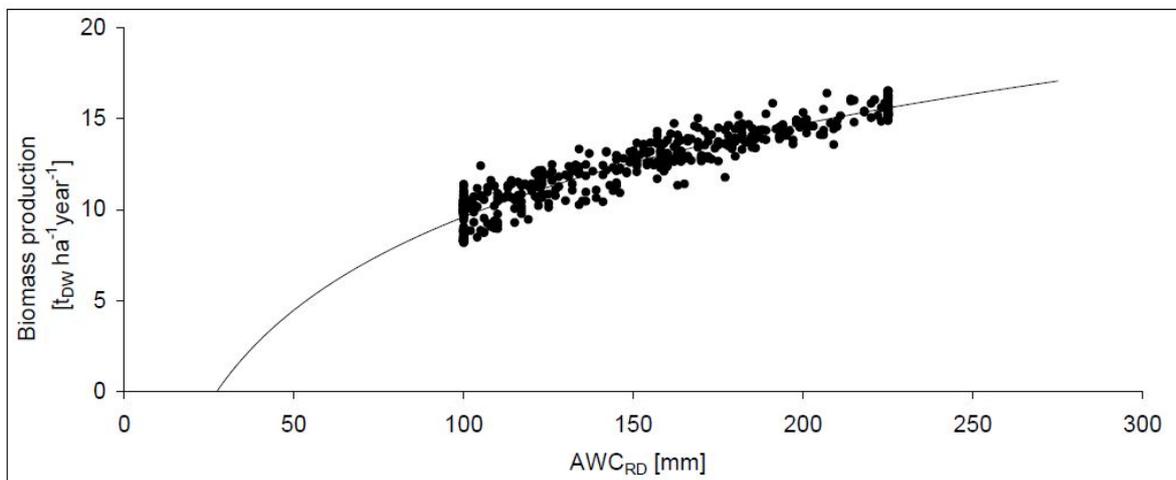
It has been shown that under the prevailing site conditions in Germany, biomass production by hybrid poplars exceeds that of willow clones in most cases (HOFFMANN & WEIH 2005). The first step in this study was to employ the empirical yield model developed by ALI (2009) to predict the production potential of SRC hybrid poplar on arable land in Saxony. The model includes climate variables (mean precipitation and temperature values during the growing season) and the plant available water capacity ( $AWC_{RD}$ ) depending on texture and rooting depth. The German site quality index for arable soils ('Ackerwertzahl', AZ) was also implemented. The AZ may vary between 7 (very poor) and 100 (very good). In the case of sites with  $AZ = 50$  the harvested yield of the reference crop wheat is roughly 50 % of that of sites with  $AZ = 100$  (further details on soil parameters see AD-HOC-AG BODEN 2005). However, digitised information concerning AZ is currently not always available at a high spatial resolution. In the case of Saxony, digital AZ data exists only in the form of an aggregated value at

the community administration level (LFULG 2011). This limits the spatial resolution of the modelling results. One of the simulation scenarios developed by ALI (2009) was taken as a basis for further downscaling (clone: *Populus nigra* x *P. maximowiczii*, cv. Max; planting density: 10 000 cuttings ha<sup>-1</sup>; biomass production: average annual growth in t<sub>DW</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> at the age of 9 years).

Due to the strong nonlinear correlation between potential biomass production BP<sub>pot</sub> and AWC<sub>RD</sub> (Abb. 3.3.1-1), the potential biomass production could be expressed as follows:

$$BP_{\text{pot}} = f(\text{AWC}_{\text{RD}}) \quad (1)$$

This relationship was used to downscale to a higher spatial resolution on the basis of the soil map for Saxony 1:200 000 (LFULG 2007).



**Abb. 5.3.1-1: Relationship between AWC<sub>RD</sub> and biomass production** (biomass = 7.384 \* ln(AWC<sub>RD</sub>) - 24.4; R<sup>2</sup>=0.89, p<0.001). The minimum for biomass production was fixed at AWC<sub>RD</sub>= 60 mm.

In a second step, we implemented reduction factors ranging from 0 to 1 for low temperature RF<sub>T</sub> and drought RF<sub>D</sub>, respectively. Employing this ecophysiology-oriented approach, the lower boundaries for the empirical growth model were defined. This accounted for the existing limits of site gradients in Saxony. The low temperature response followed certain assumptions:

- no biomass production at a mean annual temperature < 5 °C;
- favourable conditions for biomass production from a mean annual temperature of 6.5 °C (here 75 % of the optimal biomass production potential), and
- no limitations at mean annual temperatures ≥ 8 °C.

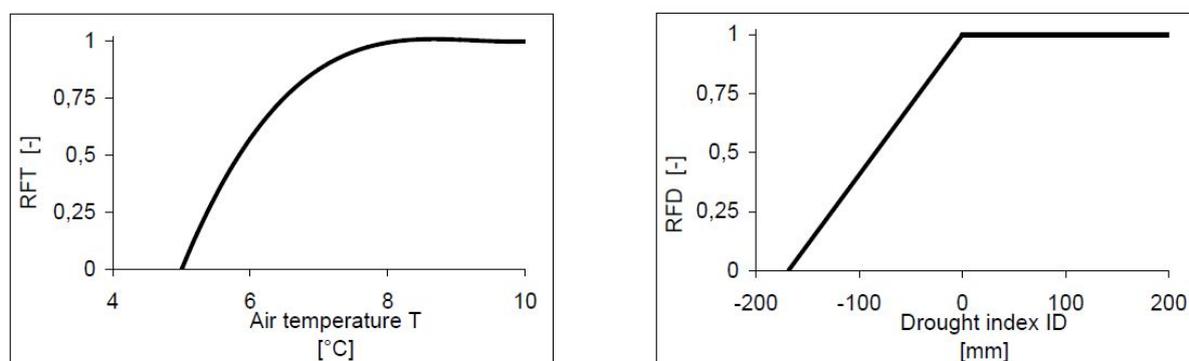
PETZOLD et al. (2009) showed that as the growing season advances, the transpiration of poplar plantations on sites without groundwater access in the drier regions of northern Saxony is controlled by a reduction in water availability (LAMERSDORF et al. 2010). Based on long-term average climatological conditions we assumed that by the end of June, halfway through the growing season, ≈ 50 % of the biomass production is achieved. Afterwards growth may be

severely limited by soil water shortage. Consequently, a drought index  $I_D$  was defined. This occurred as follows:

$$I_D = 0.5 \cdot AWC_{RD} + CWB_{Summer} \quad (2)$$

where  $AWC_{RD}$  [mm] is the available water capacity at the effective rooting depth and  $CWB_{Summer}$  [mm] is the accumulated climatic water balance during the period April - September.  $CWB_{Summer}$  was calculated as the difference between precipitation and potential evapotranspiration over grass (FAO). All of the climate data (period 1991 - 2005) originates from SMUL (2008).

Smoothing functions for temperature and drought response were adjusted according to Abb. 5.3.1-2.



**Abb. 5.3.1-2: Response functions for a) low mean annual air temperatures** (temperature reduction factor  $RF_T = 0.014 \cdot T^3 - 0.384 \cdot T^2 + 3.538 \cdot T - 9.82$  or  $RF_T = 1 - \exp(-0.95 \cdot (T-5)^{1.1})$ ) **and b) drought** (drought reduction factor  $RF_D$ ; for  $I_D \leq 0$ :  $RF_D = 5.92 \cdot 10^{-4} \cdot I_D + 1$ ; for  $I_D > 0$ :  $RF_D = 1$ ).

Growth conditions can improve significantly on warm sites where tree roots have access to groundwater, even in the event of a low climatic water balance. By contrast, wet and cold sites are not suitable for poplar cultivation. These specific site conditions were accounted for by incorporating the factor groundwater  $F_{GW}$  as follows:

- $F_{GW} = 0$ ; exclusion of poplar SRC at mean upper groundwater level (MUGL) at soil depth  $\leq 4$  dm (alternative: *Alnus glutinosa*, see below);
- $F_{GW} = 1.25$ ; biomass production at mean annual temperatures  $> 8$  °C and  $4$  dm  $< MUGL \leq 10$  dm;
- $F_{GW} = 1.1$ ; biomass production at mean annual temperatures  $> 8$  °C and  $20$  dm  $> MUGL > 1$  dm;

Information pertaining to this site property derived from soil profile descriptions included in the digital soil map (LFULG 2007).

Finally, the complete site-specific biomass production BP for poplar was calculated as follows:

$$BP = (0.5 \cdot BP_{pot} + 0.5 \cdot BP_{pot} \cdot RF_D \cdot RF_T) \cdot F_{GW} \quad (3)$$

Alder (*Alnus glutinosa*) is recommended as an alternative species for SRC cultivation on very wet sites with MUGL  $\leq 4$  dm below the surface. This tree species is characterised by a growth culmination at a later age and so grows slower than poplar (LOCKOW 1995). An overall biomass production of  $4 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  was assumed for all wet sites.

The cultivation and production of poplar biomass on warm and dry sites is very uncertain and can drop below  $5 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , or possibly even fail completely. Under such conditions, black locust (*Robinia pseudoacacia*) provides an alternative, even though the forecast yields may be low. Black locust biomass production may range from  $3.3 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (BÖHM et al. 2009) on reclaimed sites formerly used for surface mining of lignite in southern Brandenburg, and up to  $5.5 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in northeast Brandenburg (PETERS et al. 2007). For dry sites, characterised by mean annual temperatures  $> 8$  °C and a forecast poplar biomass yield according to equation (3) of  $< 5 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ , black locust SRC was recommended, with an assumed overall biomass production of  $5 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ .

### Assessment of possible synergies with nature conservation, landscape and soil protection

#### **Data, legal framework, data processing**

A fairly good data foundation on features pertaining to soil protection, land-use distribution and nature conservation exists for Saxony. The data used for the analysis and evaluation of specific areas in this study was provided by the Saxon State Office for Environment, Agriculture, and Geology (LFULG). In most cases it was possible to use pre-processed spatial data:

- digital maps of biotope types and land use types derived from colour infrared orthophotos (status: 2005);
- digital soil maps 1:200 000 and 1:25 000;
- digital maps of the vulnerability of soils to erosion by water and wind;
- digital terrain model (grid width 20 m);
- digital maps of protected areas according to various nature conservation regulations;
- digital maps of biotopes valuable for nature conservation, including all legally protected biotopes (status: 2009);
- red lists of threatened species and maps detailing the occurrence of selected threatened species.

Some legal regulations also served to define the specific protection status of certain areas:

- Habitats Directive (EC 1992) and Birds Directive of the European Union (EC 1979);
- Saxony Nature Conservation Act (SÄCHSNATSCHG 2010) and Saxony Water Act (SÄCHSWG 2010);
- EC cross compliance regulations in agriculture (EC 2003).

The assessment of the risk of erosion by water followed the empirical model provided by the unified soil loss equation (USLE) developed by WISCHMEIER & SMITH (1978) and adapted for natural conditions in Germany (SCHWERTMANN et al. 1990):

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (4)$$

where A is the long term average soil loss [ $t \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ], R the rainfall erosivity index [ $N \text{ h}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ], K is a factor for the soil erodibility [ $t \text{ h ha}^{-1} \text{ N}^{-1}$ ], S and L are topographical factors accounting for slope steepness and length [-], C is the plant cover factor [-] and P is a factor that takes account of specific erosion control practices [-].

The interpretations of soil data with regard to single and combinations of the USLE factors transcend the minimum standards of the EC's cross compliance regulations (EC 2003). For example, the vulnerability analysis also contains spatial information concerning erosion-prone steep slopes and areas affected by the potential accumulation of surface run-off.

A simplified assessment of the risk of erosion by wind is based on an evaluation of the soil texture, the soil organic matter content in the upper soil, the mean annual wind speed at a height of 10 m, the crops cultivated and the crop rotation, and the height of and distance to wind breaks (LFULG 2007, DEUMLICH et al. 2006). All of the data and additional information were processed in a geographic information system (GIS).

### Definition of synergy classes

The effects of SRC cultivation on nature, landscape and on soil protection may range from positive to negative, or they may be neutral. Therefore, a classification scheme was developed to demonstrate seven different categories of synergy (Tab. 5.3.1-2).

**Tab. 5.3.1-2: Overview of synergy classes for the combination arable land and SRC with regard to the conservation of nature, landscape, and soil.**

Synergy class		Description
No.	Denotation	
1	very high synergy	expected synergy effects
2	high synergy	expected synergy effects but less than in class 1
3	verify synergy	specific evaluation may reveal either a 'synergy' or 'no synergy'
4	no synergy – risk	no synergy effects expected; cultivation of SRC poses a risk
5	no synergy – exclusion	cultivation of SRC poses a high risk to nature and the landscape
0	neutral – neither synergy nor risk	neutral area; neither synergy effects nor risks expected
9	not assessed	area not evaluated (all land-use types except arable land)

We used a method that included objective and subjective elements within a GIS, known as a spatial expert system (MALCEWSKI 2004).

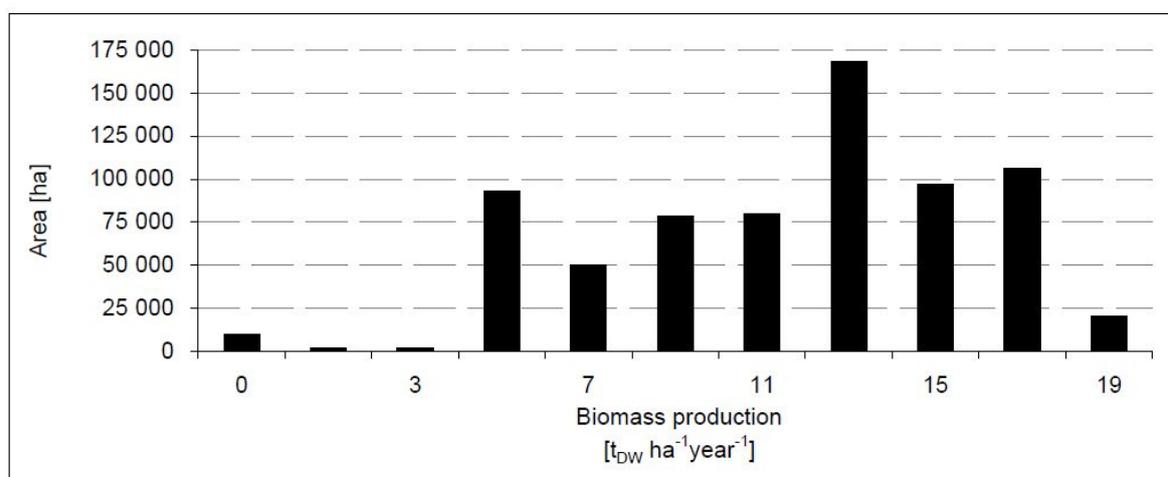
Several stakeholders from the Saxon State Office for Environment, Agriculture, and Geology, scientists and independent consulting engineers dealing with ecosystem services were involved in the evaluation procedure. Their expert knowledge with regard to landscape ecology, nature and landscape conservation, soil protection, surface water quality, species pro-

tection, agricultural management, and biomass production was structured during workshops and personal communication. Furthermore, experts on state subsidies in support of landscape protection were also included. The goal of this procedure was to define indicators facilitating a final categorisation of site types according to the classification presented in Tab. 5.3.1-2.

### 5.3.1.4 Results

#### Site-based estimation of biomass production potential

The site-based potential for biomass production was estimated for arable land only. An application of the biomass model for other land-use types was ruled out due to the expected risk of negative impacts of biomass production in terms of soil protection (see Tab. 5.3.1-3). An equivalent evaluation for grassland (mainly pasture) is lacking as yet but should be carried out. Roughly 617 400 ha, or 88 % of the arable land of Saxony, are suitable for poplar SRC, with a mean biomass production potential of  $12 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  ( $\pm 3$ , standard deviation). A total of 82 900 ha, or 12 % of total arable land in Saxony, were deemed to be suited to alder cultivation, with a mean forecast yield of  $4 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The potential area of SRC with black locust was 3 400 ha ( $< 1 \%$  of the total arable land), with an assumed biomass production potential of  $5 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . The distribution of the arable area according to different biomass production classes is illustrated in Abb. 5.3.1-3.



**Abb. 5.3.1-3: Potential surface area and site-based biomass production in SRC on arable land in the State of Saxony.** The species considered are poplar, alder, and black locust.

### Soil protection

The assessment of synergy effects for soil protection on arable sites with SRC was based on seven criteria (Tab. 5.3.1-3), which were applied to the total area of Saxony (1 845 488 ha). The main evaluation results are presented in Tab. 5.3.1-3. More than 25 % of the state's total area, for example, is prone to water erosion. Therefore, perennial crops like trees managed as SRC would have high and very high synergy effects in terms of reducing the erosion potential.

**Tab. 5.3.1-3: Criteria and indicators for the identification of soil protection synergy effects arising from SRC on arable land in the State of Saxony.**

Criterion	Indicator	Synergy class <sup>a</sup>	Area [ha]	Proportion of total area <sup>b</sup> [%]
Risk of erosion through accumulation of surface run-off (Thalweg erosion)	soil loss & catchment size: < 15 t ha <sup>-1</sup> and < 2 ha or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 802 500	97.7
	≥ 15 t ha <sup>-1</sup> and ≥ 2 ha	1	42 908	2.3
Prone to water erosion (K*R*L*S) (sheet and rill erosion)	<u>soil loss</u> : < 15 t ha <sup>-1</sup> or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 369 861	74.2
	15 – < 30 t ha <sup>-1</sup>	2	193 888	10.5
	≥ 30 t ha <sup>-1</sup>	1	281 739	15.3
Particularly susceptible to erosion; short but steep slopes (sheet and rill erosion)	<u>factor K*S</u> : < 0.9 or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 771 993	96.0
	≥ 0.9	1	73 496	4.0
Prone to wind erosion (LFULG 2007)	degree of potential danger: none to low or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 498 391	75.0
	medium	2	183 379	9.9
	high to extremely high	1	163 719	8.9
Wetlands (LFULG 2007)	degree of waterlogging none to medium or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 543 863	78.3
	high to extremely high	4	301 625	16.3
Soils worth protecting (LFULG 2007)	Potential for development of biotopes <sup>c</sup> : none to low or n.d. <sup>e</sup>	0; 9	1 321 056	71.6
	high to very high	3	524 432	28.4
Current land use according to the main classes contained on the digital land-use maps	land-use type: diverse land uses <sup>d</sup>	5	559 301	30.3
	grassland	4	306 848	16.6
	arable land	1	713 439	38.7
	water bodies	0	40 134	2.2
	settlement, infrastructure	9	225 766	12.2

<sup>a</sup> Areas without data or assessment were classified to synergy class 9

<sup>b</sup> The total area corresponds to the whole of Saxony (1 845 488 ha). The value given for each criterion is always relative to the total area of Saxony.

<sup>c</sup> Includes aspects of natural and cultural history. Assessment of dominant soil forms only.

<sup>d</sup> Category includes bogs and swamps, neglected grassland, rocky and dwarf shrub areas, forests, coppice and hedgerows.

<sup>e</sup> No data.

### Nature conservation

The discussion process involving nature conservation stakeholders resulted in the application of four synergy classes: 0 (neutral), 1 (very high synergy, Tab. 5.3.1-4), 3 (verify synergy, Tab. 5.3.1-5) and 5 (exclusion, Tab. 5.3.1-6). Areas deemed to have a very high synergy amount to 26 % of Saxony's total arable land area and mainly are located in the sparsely wooded regions in central and northern Saxony (Tab. 5.3.1-4). The establishment of a biotope network may also prove beneficial (very high synergy), if SRC with edges comprising native tree and shrub species and with a rotation period  $\geq 10$  years. However, more detailed assessment according to the type of biotope and other overlapping criteria is necessary. A visual evaluation was based on merged soil protection and nature conservation data sets (results not shown).

**Tab. 5.3.1-4: Areas characterised by very high synergy if planted with SRC** (synergy class 1: 'very high').

Synergy class 1 very high synergy		Criterion	Total area in Saxony [ha]	Arable land <sup>a</sup> [ha]	Proportion of total arable land area [%]
Sparsely wooded regions	Regions where Saxony's regional planning body recommends an increase in the forest cover		472 478	180 686	25.7
Buffer along water edges	After a 10 m strip to allow for close to nature development (see Tab. 5.3.1-6) a 20 m strip of SRC should follow (vegetative filter strip)		104 667	6 509	0.9
Total area, adjusted by overlapping areas within this synergy class			555 341	184 045	26.1

<sup>a</sup> Less areas of synergy classes 3 and 5.

For an area > 272 000 ha, or 38 % of Saxony's arable land, an additional, more detailed evaluation (synergy class 3) is needed in order to come to a final synergy classification (Tab. 5.3.1-5). Special knowledge of the landscape characteristics and the specific protection goals is necessary. To achieve this, an assessment should be made on a local scale in cooperation with stakeholders from the district level.

**Tab. 5.3.1-5: Areas requiring further evaluation and the consideration of specific protection goals; assessment on a regional and local scale (synergy class 3: 'verify synergy').**

Synergy class 3 verify synergy	Criterion	Total area in Saxony [ha]	Arable land <sup>a</sup> [ha]	Proportion of total ar- able land <sup>a</sup> [%]
Landscape conserva- tion area (protected landscape according to IUCN classification)	Damage and impairment of protection goals defined in management plans to be avoided; responsibility of dis- trict administration	557 018	173 020	24.6
Sites of community importance (SCI) ac- cording to EU Habitats Directive	Damage and impairment of conservation goals of SCIs to be avoided	168 667	6 397	0.9
Special protected area (SPA) according to EU Birds Directive	Damage and impairment to conservation goals of SPAs to be avoided	248 965	45 791	6.5
Biosphere reserve: development zone (or transition area accord- ing to UNESCO defini- tion)	Damage and impairment to specific management goals of development zones to be avoided	16 952	4 802	0.7
Nature park (protected landscape according to IUCN classification)	Impairment of goals defined in management plans to be avoided (e.g., recreational function); responsibility of dis- trict administration	198 796	30 761	4.4
Field margins, sites with rare or threatened wild herb species	Occurrence of rare or threat- ened (critically endangered, endangered or vulnerable) plant species	143 744	84 550	12.0 <sup>b</sup>
Areas recommended for biomass production with black locust ( <i>Robinia pseudoaca- cia</i> )	Damage to protected biotopes to be avoided by ensuring a minimum distance of 500 m to black locust SRC	3 408	3 391	0.5
Buffer around high pri- ority protected areas	Damage to protected objects in top priority protected areas (see Tab. 5.3.1-6; e.g., shading of margins rich in species) to be avoided by a installing a buffer of 20 m	3 337	699	0.1
Habitats of rare and threatened or legally protected wild species	Damage to be avoided; cultiva- tion of SRC in strips may be an alternative to SRC in closed blocks. Further evaluation needed	no specific area for evaluation, data incom- plete	-	-
Total area, adjusted by overlapping areas within this synergy class		913 715	272 074	38.6

<sup>a</sup> Less areas of synergy class 5<sup>b</sup> Search area with current and potential occurrence of rare or threatened wild plants of arable land.

Areas not suitable for SRC plantations (Tab. 5.3.1-6) consist of sites that are top priority for nature conservation goals, as defined by law. Overall, 2.3 % of Saxony's total arable land, or 16 363 ha, was grouped in synergy class 5. Finally, 231 669 ha respectively 33 % of the arable land were assessed to be neutral if planted with SRC. That means neither synergy nor risk is expected on these sites.

**Tab. 5.3.1-6: Areas with no nature conservation synergies** (synergy class 5: 'exclusion')

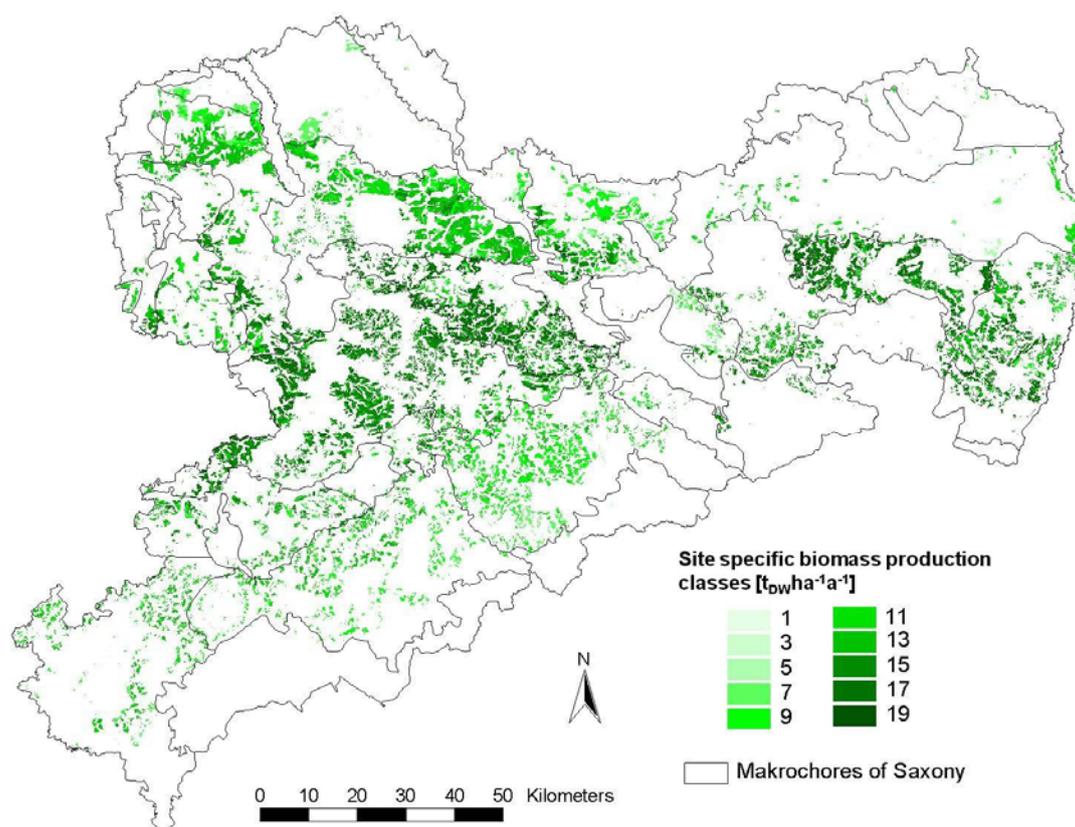
Synergy class 5 no synergy – exclusion	Criterion	Total area in Saxony [ha]	Arable land [ha]	Proportion of total arable land [%]
National park; entire area	Long term development and protection of natural self-regulation (processes without human interference) have top priority <sup>a</sup>	9 354	180	<0.1
Biosphere re- serve; core area and buffer zone	Protection goals have top priority as core areas (strict nature reserve) and buffer zones (habitat and species management areas) are nature reserves by law <sup>a</sup>	13 165	465	<0.1
Nature reserve (IUCN catego- ries: strict na- ture reserve and habitat/ species management area)	Protection goals have top priority by law <sup>a</sup>	51 861	1 180	0.2
Natural monu- ments (areas up to 5 ha)	Protection goals have top priority by law <sup>a</sup>	approx. 6 500	approx. 250	<0.1
Worth protect- ing biotopes (selective bio- tope mapping)	Protection goals have high priority, legally designated <sup>a</sup> protected biotopes are included. Damage forbidden	97 724	1 649	0.2
Water edges	A strip of 10 m alongside waterway should be allowed to develop in a way that is close to nature <sup>b</sup>	56 483	4 675	0.7
European hamster ( <i>C. crictetus</i> ) habi- tats	Protected according to annex IV of the Habitats Directive (EC 1992). Habitat must be preserved. Cultivation of SRC in strips may be possible. Further evaluation needed.	10 401	8 727	1.2
Total		193 704	16 363	2.3

<sup>a</sup> SÄCHSNATSCHG (2010) <sup>b</sup> SÄCHSWG (2010)

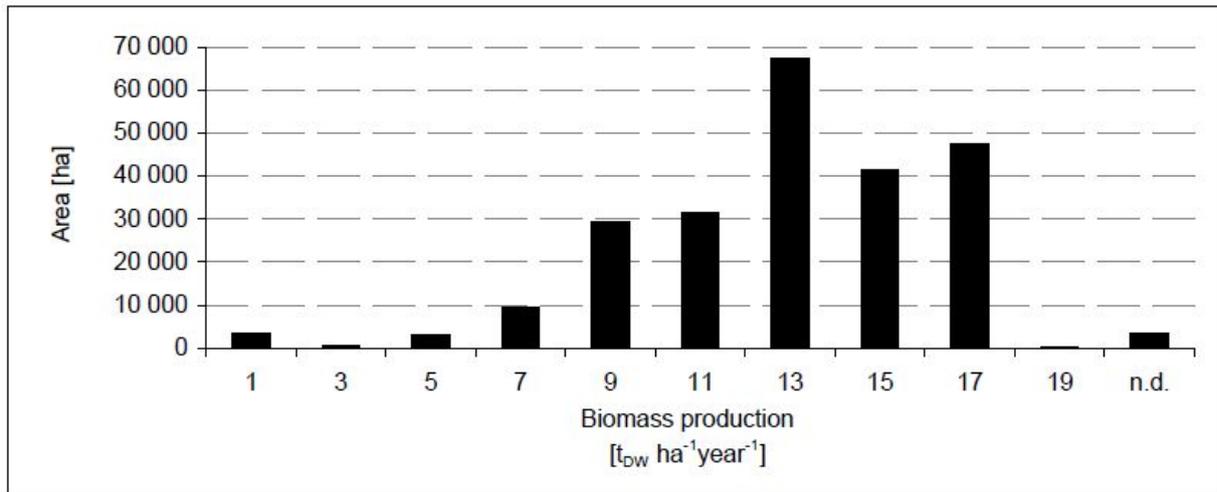
## Synthesis

The results of the assessment of the soil protection and nature conservation features were merged within a GIS. Where more than one synergy class was found for a particular area on the basis of the different criteria, the inferior synergy class was prioritised.

The arable land deemed to have high and very high synergy ratings amounted to 236 462 ha. The site-based potential for biomass production was related to the synergy values derived for the respective areas (Abb. 5.3.1-4). As expected, larger areas with a high biomass production potential were identified in the hilly loess region, which is dominated by large-scale agricultural cultivation. This region is characterised by a low proportion of forest cover and often a risk of soil erosion, but also high soil quality and moderate climate conditions. Consequently, the average site-specific biomass production is also rather high in this region, with  $\geq 15 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  (Abb. 5.3.1-4). Large areas with somewhat lower production potential can be found at the transition to the drier lowlands of Saxony. Potential areas for SRC were also identified at the transition to the Ore Mountains in southern Saxony. However, the expected biomass production in this latter region is mainly  $< 10 \text{ t}_{\text{DW}} \text{ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$  due to a shorter growing season and lower soil quality.

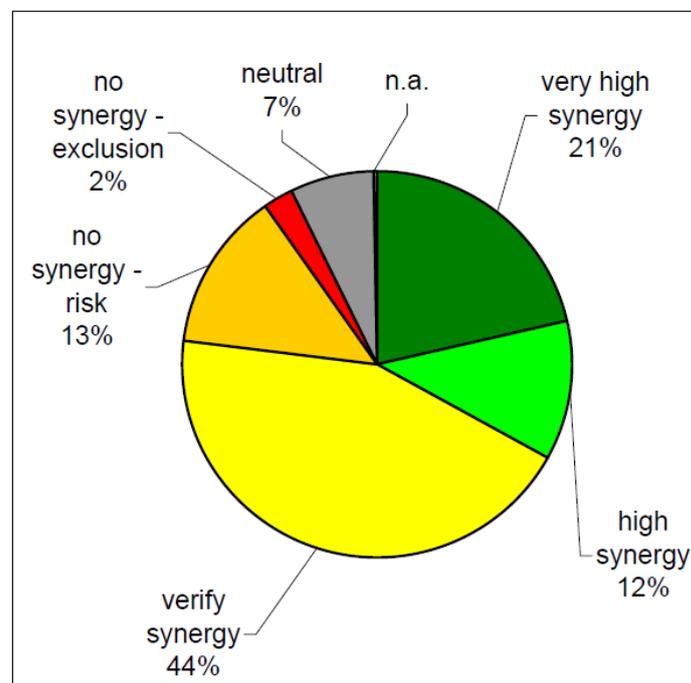


**Abb. 5.3.1-4: Site-based biomass production potential of SRC plantations on arable land deemed to have either a high or a very high synergy effect with respect to soil protection and/or nature conservation within the State of Saxony (Germany). Boundaries are natural landscape units ('Makrochoren').**



**Abb. 5.3.1-5: Site-based biomass production of SRC plantations on areas identified as having a high or very high synergy effect with respect to soil protection and/or nature conservation goals.**

Of the whole arable land area assessed, 152 907 ha (21 %) were classified as having a very high synergy effect; 83 555 ha (12 %) high synergy; 313 718 ha (45 %) need further evaluation; 95 087 ha (13 %) have no synergy but potentially pose a risk; 16 610 ha (2 %) have no synergy and should be completely excluded from SRC; the effect of SRC is deemed neutral on 50 932 ha (7 %) and 1 387 ha (< 1 %) were not assessed (see relative proportions in Abb. 5.3.1-6).



**Abb. 5.3.1-6: Distribution of synergy classes with respect to SRC on arable land after all soil protection and nature conservation assessment criteria are merged (n.a. = not assessed).**

### 5.3.1.5 Discussion

The range of the site-based biomass production estimates attained in this study compares with independent results from demonstration plots in Germany (HOFFMANN & WEIH 2005). They found average poplar SRC yields of 6 to 18 t<sub>DW</sub> ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup> depending on soil and climatic conditions. However, it should be noted that existing information regarding biomass yields in Saxony has been collated from experimental and demonstration plots. This often results in a bias in the findings in favour of higher yields than can be achieved under actual management conditions. At the same time, ongoing improvements to management technologies will counterbalance these possibly too generous biomass production estimates (MOLA-YUDEGO 2011). To prevent wind erosion, it may be sufficient to plant fast growing tree species in strips rather than blocks. This would mean that smaller areas are needed to maximise synergy effects. The optimal land-use type in susceptible regions will, therefore, more closely resemble an agroforestry system than a conventional SRC plantation.

The assessment of the impact of SRC on areas with regard to soil protection excluded land presently used as grassland (mainly pasture). The main concerns here were a distinct loss of soil organic carbon, leaching of nitrate into the groundwater, and the release of carbon dioxide into the atmosphere due to increased mineralisation following conversion from grassland to SRC (DON et al. 2009, CIAIS et al. 2010). Further research is needed to determine whether advanced SRC cultivation techniques like direct planting, planting in strips, and the avoidance of deep ploughing when the plantation is established on grassland sites may prevent excess mineralisation of soil organic matter. Nevertheless, it is clear that grassland characterised by a low level of management intensity is often of high nature conservation value and should not be converted into SRC.

The scale of the study design was the regional level. This information may serve for a rational allocation of subsidies to encourage SRC and maximise synergy effects according to the site conditions in different regions. However, the relatively large area of synergy class 3 'verify synergy' needs to be refined and tested at a lower (farm, district) level. Detailed knowledge of objects of nature and landscape protection, and existing management plans for protected areas under the responsibility of district authorities should be incorporated in an ongoing and refined appraisal process. A key problem for each assessment remains the definition of criteria and appropriate indicators. In particular, indicators for the assessment of the effects of SRC on biodiversity still rely on existing data sets not specific to SRC. It would appear to be necessary to monitor the actual effects on biodiversity of newly established SRC on arable land for the development and adaptation of appropriate indicators.

Another planning approach, the sustainability appraisal framework (SAF), also includes the economic and social implications of a land-use change due to increased biomass production (HAUGHTON et al. 2009). These authors combined an approach in which environmental and physical constraints are mapped with the identification of stakeholder aspirations. The abundance of butterflies was found to be an appropriate indicator for the assessment of the biodiversity of different biomass crop systems. However, which mechanisms are suited to implementing the identified synergy effects in practice remains open. FOHRER et al. (2009) combined the agri-economic model ProLand, for the generation of spatially distributed land-use scenarios, the grid based YELL model, to simulate the distribution of breeding habitats of key

species, and finally the hydrological model SWAT, to assess changes in land use on hydrologic ecosystem services. With this combined model framework, FOHRER et al. (2009) demonstrated multidimensional trade-offs. This approach may represent an important information base for decision makers. Nevertheless, the authors highlighted that the uncertainty associated with the model is high and needs to be addressed. The priority areas identified for SRC in this study may also serve as an input for a spatially explicit modelling of scenarios and for an integrated assessment of hydrologic ecosystem services, like flood protection, water quality or groundwater recharge (BRAUMANN et al. 2009) at the catchment scale. Such efforts are currently being undertaken as part of the joint research project AGROFORNET (2011).

### 5.3.1.6 Conclusions

The conceptual framework for planning SRC and the incorporation of nature conservation and soil protection goals presented in this paper yields spatially explicit information concerning priority areas and the site-specific biomass production potential at the regional scale. The results may serve as important basic information supporting the allocation of subsidies for a joint improvement of biomass production, soil protection, and nature conservation. Further development of the framework should also include other ecosystem services related to soil and water resources (e.g., carbon sequestration, flood protection, groundwater recharge). Another focus should be the refinement of the planning tool at the local (farm, district) scale. Stakeholders must be involved at each step in order to make the greatest use of existing knowledge, particularly information on biodiversity, and to ensure broad acceptance of planning outcomes. A gap in the existing knowledge was identified with respect to the uncertain soil ecological impact of advanced SRC establishment techniques on sites which hitherto have been used as grassland. Finally, indicators for better assessment of biodiversity in SRC should be developed on the basis of current monitoring programmes.

### Acknowledgement

The study was funded by the Saxon State Ministry of the Environment and Agriculture (SMUL).

### 5.3.1.7 References

- AD-HOC-AG BODEN (2005) *Bodenkundliche Kartieranleitung*. 5th edition. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung. Stuttgart
- ALI, W (2009) *Modelling of biomass production potential of poplar in short rotation plantations on agricultural lands of Saxony*. PhD thesis, TU Dresden, Faculty of Forest, Geo and Hydro Sciences.
- BERNDES, G, HANSSON, J (2007) Bioenergy expansion in the EU: Cost-effective climate change mitigation, employment creation and reduced dependency on imported fuels. *Energy Policy* 35: 5965–5979
- BÖHM, C, QUINKENSTEIN, A, FREESE, D, HÜTTL, R (2009) SRC at reclamation sites of Lower Lusatia - Growth development of four-year-old black locust (in German). *AFZ/DerWald* 64: 532-533
- BRAUMAN, KA, DAILY, GC, KA'EO DUARTE, T, MOONEY, HA (2007): The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 32: 67–98

- CIAIS, P, SOUSSANA, JF, N VUICHARD, N, LUYSSAERT, S, DON, A, JANSSENS, IA, PIAO, SL, DECHOW, R, LATHIÈRE, J, MAIGNAN, F, WATTENBACH, M, SMITH, P, AMMANN, C, FREIBAUER, A, SCHULZE, ED and the CARBOEUROPE Synthesis Team (2010): The greenhouse gas balance of European grasslands. *Biogeosciences Discuss.* doi:10.5194/bgd-7-5997-2010
- DAILY, GC, ALEXANDER, S, EHRLICH, PR, GOULDER, L, LUBCHENCO, J, MATSON, PA, MOONEY, HA, POSTEL, S, SCHNEIDER, SH, TILMAN, D, WOODWELL, GM (1997) Ecosystem services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. *Issues in Ecology* 2: 1-16
- DEUMLICH, D, FUNK, R, FRIELINGHAUS, M, SCHMIDT, WA, NITZSCHE, O (2006) Basics of effective erosion control in German agriculture. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 370–381
- DEWIT, M, FAAIJ, A (2010) European biomass resource potential and costs. *Biomass and Bioenergy* 34: 188-202
- DON, A, REBMANN, C, KOLLE, O, SCHERER-LORENZEN, M, SCHULZE ED (2009) Impact of afforestation-associated management changes on the carbon balance of grassland. *Global Change Biology* 15: 1990-2000
- EC (1979) Council Directive on the Conservation of Wild Birds.
- EC (1992) Council Directive 92/43/EEC on the Conservation of Natural Habitats and of Wild Fauna and Flora
- EC (2003): Council Regulation (EC) No 1782/2003 of 29 September 2003 establishing common rules for direct support schemes under the common agricultural policy and establishing certain support schemes for farmers and amending Regulations (EEC)
- EC (2009) Directive 2009/28/EC of the European Parliament and the Council on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- FOHRER, N, MÖLLER, D, STEINER, N (2002) An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 27: 655-662
- GLASER, T, SCHMIDT, PA (2010) Impacts of SRC on phytodiversity (in German). In: BEMMANN, A, & C. KNUST (eds.): *AGROWOOD Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Weißensee Verlag, Berlin, pp. 153-160
- HAUGHTON, AJ, BOND, AJ, LOVETT, AA, DOCKERTY, T, SÜNNENBERG, G, CLARK, SJ, BOHAN, DA, SAGE, RB, MALLOTT, MD, MALLOTT, VE, CUNNINGHAM, MD, RICHE, AB, SHIELD, IF, FINCH, JF, TURNER, MM, KARP, A (2009) A novel, integrated approach to assessing social, economic and environmental implications of changing rural land-use: a case study of perennial biomass crops. *Journal of Applied Ecology* 46: 315–322
- HOFFMANN, D, WEIH, M (2005) Limitations and improvement of the potential utilisation of woody biomass for energy derived from short rotation woody crops in Sweden and Germany. *Biomass and Bioenergy* 28: 267-279
- HELLEBRAND, H, STRÄHLE, M, SCHOLZ, V, KERN, J (2010) Soil carbon, soil nitrate, and soil emissions of nitrous oxide during cultivation of energy crops. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 87: 175-186

- LAMERSDORF, N, PETZOLD, R, SCHWÄRZEL, K, FEGER, KH, KÖSTNER, B, MODEROW, U, BERNHOFER, C, KNUST, C (2010) Soil ecological aspects of SRC (in German). In: BEMMANN, A, KNUST, C (eds.): AGROWOOD – Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, pp. 170-188
- LfULG (2007) Bodenatlas des Freistaates Sachsen. Teil 4: Auswertekarten zum Bodenschutz. DVD. Saxoprint Dresden
- LfULG (2011) Bodenschätzung online: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/11629.htm> (accessed: 25/06/11)
- LOCKOW, KW (1995) Die neue Ertragstafel für Roterle - Modellstruktur und Anwendung in der Forstpraxis. Beiträge für Forstwirtschaft und Landschaftsökologie 29: 49 – 55
- MAKESCHIN, F (1994) Effects of energy forestry on soils. Biomass and Bioenergy 6: 63-79
- MALCEWSKI, J (2004) GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. Progress in Planning 62: 3–65
- MOLA-YUDEGO, B (2011) Trends and productivity improvements from commercial willow plantations in Sweden during the period 1986-2000. Biomass and Bioenergy 35: 446-453
- PETERS, K, BILKE, G, STROHBACH, B (2007) Yield performance of six-year-old black locust (*Robinia pseudoacacia*) on four former arable sites of different soil quality in Brandenburg (in German). Archiv f. Forstwesen u. Landschafts.ökol 41, 26-28
- PETZOLD, R, SCHWÄRZEL, K, FEGER, KH (2010) Transpiration of a hybrid poplar plantation in Saxony (Germany) in response to climate and soil conditions. Eur. J. For. Res. 130: 695–706
- PRETZSCH, J, SKODAWESSELY, C (2010) Socio-economic and ethical aspects of short rotation coppice (in German). In: Bemmman, A, Knust, C (eds.): AGROWOOD Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee Verlag, Berlin, pp. 230-242
- ROWE, R, HANLEY, M, GOULSON, D, CLARKE, D (2010) Potential benefits of commercial willow short rotation coppice (SRC) for farm-scale plant and invertebrate communities in the agri-environment. Biomass Bioenergy. doi:10.1016/j.biombioe.2010.08.046
- SABAP (2007) Use of biomass for energy generation – Recommendations to policy makers. Expertise of the Scientific Advisory board on Agricultural Policy (SABAP). Online: [http://www.bmelv.de/cIn\\_163/SharedDocs/Standardartikel/EN/Ministry/ScientificAdvisoryBoards/AgriculturalPolicyPublications.html](http://www.bmelv.de/cIn_163/SharedDocs/Standardartikel/EN/Ministry/ScientificAdvisoryBoards/AgriculturalPolicyPublications.html)
- SABAP (2010) EU agricultural policy after 2013 - Plea for a new policy for food, agriculture and rural areas. Expert opinion of the Scientific Advisory board on Agricultural Policy (SABAP). Online: [http://www.bmelv.de/cIn\\_163/SharedDocs/Standardartikel/EN/Ministry/ScientificAdvisoryBoards/EU-ag-policy-after-2013.html](http://www.bmelv.de/cIn_163/SharedDocs/Standardartikel/EN/Ministry/ScientificAdvisoryBoards/EU-ag-policy-after-2013.html)
- SÄCHSNATSCHG (2010) Saxon Nature Conservation Act. SächsGVBl.: 270
- SÄCHSWG (2010) Saxon Water Act. SächsGVBl.: 270
- SCHWERTMANN, U, VOGEL, W, KAINZ, M (1990) Bodenerosion durch Wasser. Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart

- SKODAWESSELY, C, GLASER, T, PRETZSCH, J, SCHMIDT, PA (2008) Attitudes of farmers and nature conservation associations to short-rotation coppice (in German). *Swiss Forestry Journal* 159: 158-164
- SMUL (ed. 2008) Sachsen im Klimawandel - Eine Analyse. Online: <http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/klima/1988.htm> (accessed: 29/06/11)
- TU DRESDEN (2011): AGROFORNET online: <http://www.agrofor.net.de> (accessed: 25/06/11)
- VONHAAREN, C, SAATHOFF, W, BODENSCHATZ, T, LANGE, M (2010) Der Einfluss veränderter Landnutzungen auf Klimawandel und Biodiversität unter besonderer Berücksichtigung der Klimarelevanz von Maßnahmen des Naturschutzes und der Landschaftspflege. Bundesamt für Naturschutz (ed.), *Biologische Vielfalt* Nr. 94
- WISCHMEIER, W, SMITH, D (1978) *Predicting Rainfall Erosion Loss: A Guide to Conservation Planning*. United States Department of Agriculture, *Agriculture Handbook* 537. Washington, DC.

## 6 Zusammenfassende Bewertung und Perspektiven

In der vorliegenden Arbeit wurden die ökologischen Aspekte von Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen untersucht. Zwei Fallstudien lieferten dabei aktuelle Messergebnisse zum Wasser- und Stoffhaushalt des Pappelhybrids *Populus nigra x maximowiczii* auf einem Standort im mittelsächsischen Lösshügelland. Am Beispiel dieses Standorts wurde gezeigt, welche Möglichkeiten und Grenzen der Einsatz eines prozessorientierten Wasserhaushaltsmodells für die Bewertung des Wasserhaushalts verschiedener Landnutzungsformen bietet. Schließlich wurde am Beispiel Sachsens erprobt, wie standörtliche Ertragspotenziale von Kurzumtriebsplantagen sowie Synergien und trade-offs mit weiteren, ausgewählten Ökosystemdienstleistungen räumlich differenziert dargestellt werden können. Diese Darstellung kann eine Planungsgrundlage, beispielsweise für die Ausgestaltung von Förderinstrumenten bieten.

Die in Kapitel 2 der Arbeit formulierten Hypothesen wurden überwiegend bestätigt. Im Einzelnen lassen sich den Thesen folgende Schlussfolgerungen zuordnen:

- I. Hypothese: Der Wasserverbrauch von Pappel-KUP ist höher als der von landwirtschaftlichen Kulturen und den meisten Waldökosystemen.

Diese Hypothese wurde durch die vorgelegten Untersuchungen eindeutig belegt. Es existieren jedoch Hinweise aus Studien anderer Autoren (Hall et al. 1996, Bungart & Hüttl 2004), dass auch Waldökosysteme mit Kiefern einen ähnlich hohen Wasserverbrauch haben können wie Pappel-KUP.

- II. Hypothese: Der höhere Wasserverbrauch von KUP im Vergleich zu annuellen Ackerkulturen führt zu einer reduzierten Grundwasserneubildung.

Diese Hypothese wurde für die Bewertungsebene Standort bestätigt. Eine Übertragung dieser Aussage auf ganze Einzugsgebiete ist jedoch nicht möglich. Durch den Skalenübergang müssen für eine Bewertung auf Einzugsgebietsebene vor allem Flächengröße und Lage der Pappel-KUP im Vergleich zur Gesamtgröße des betreffenden Einzugsgebietes herangezogen werden.

- III. Hypothese: Die Nährelemententzüge durch die Ernte von Pappel-KUP werden aktuell durch die atmosphärischen Depositionen ausgeglichen.

Diese Hypothese wurde durch die vorgelegte Fallstudie bestätigt. Abweichende Bewirtschaftungsformen mit sehr kurzen Umtriebszeiten, verbunden mit der Entnahme von hohen Anteilen an nährstoffreichen Biomassekompartimenten (Rinde, Knospen, Zweige) sowie zurückgehende Depositionen können allerdings zu einer Widerlegung der These führen.

- IV. Hypothese: Pappel-KUP tragen zu einer temporären Erhöhung des Kohlenstoffspeichers im Boden bei.

Diese Hypothese konnte mit der vorgelegten Fallstudie nicht bestätigt werden. Einige Studien anderer Autoren bestätigen jedoch die These. Entscheidend für eine Bewertung ist,

welche Ausgangsbedingungen am Standort vorherrschen und welche Zeitspanne betrachtet wird. Auf Böden mit relativ geringem Vorrat an organischer Substanz können Pappel-KUP zu einer Kohlenstoffanreicherung führen. Auf Böden mit relativ hohem Ausgangsvorrat kann es durch die Anlage von Pappel-KUP auch zu Kohlenstoffverlusten im Boden kommen. Tendenziell trägt eine lange Nutzungsdauer mit Pappel-KUP zu einer Kohlenstoffanreicherung im Boden bei.

- V. Hypothese: In Sachsen existiert ein beträchtliches Flächenpotenziale auf dem mit Pappel-KUP positive Wirkungen für Boden- und Naturschutz erzielt werden können.

Diese Hypothese wurde bestätigt.

Insgesamt stellen Pappel-Kurzumtriebsplantagen eine im Vergleich zu anderen Bioenergieträgern wie Raps und Mais sehr umweltfreundliche Landnutzungsform dar, wenn bei der Planung, Flächenanlage und Bewirtschaftung grundlegende standortsökologische Aspekte beachtet werden. Die Gefahr einer kritischen Reduzierung der Grundwasserneubildung ist nur gegeben, wenn Kurzumtriebsplantagen auf sehr großen Flächen (relativ zum betrachteten Einzugsgebiet) angelegt werden. Für ökonomisch interessante Erträge, unter den aktuellen Rahmenbedingungen in Sachsen mindestens 8 bis 10  $t_{\text{atro}} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  auf vormals ackerbaulich genutzten Flächen, ist vor allem eine ausreichende Wasserversorgung notwendig. Die Nährstoffentzüge mit der Biomasse werden derzeit weitgehend durch atmosphärische Einträge kompensiert oder können langfristig durch entsprechende Zufuhr ausgeglichen. Die Düngenotwendigkeit ist - wenn überhaupt auf lange Sicht notwendig - deutlich geringer als bei einjährigen Ackerkulturen. Dadurch liegt auch der Energieeinsatz für die Herstellung und Ausbringung von Düngemitteln für die Bewirtschaftung von KUP sehr niedrig. Zudem werden weniger klimarelevante Gase, vor allem  $\text{N}_2\text{O}$ , emittiert. Auch hinsichtlich anderer Ökosystemdienstleistungen wie Bodenschutz, Biodiversität und Wasserqualität weisen KUP eine sehr gute Bilanz im Vergleich zu einjährigen Ackerkulturen auf.

Dass Kurzumtriebsplantagen bisher in Deutschland trotz der vielen Vorteile kaum nennenswerte Flächenanteile aufweisen, liegt an der wirtschaftlichen Konkurrenz etablierter landwirtschaftlicher Kulturen. Die wirtschaftliche Überlegenheit vieler Agrarprodukte, z.B. Raps und Energiemais, beruht neben anderen Faktoren auch auf vielfältigen Subventionen der Primärproduktion sowie im verarbeitenden Gewerbe. Im Zuge der aktuellen Reform der gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union „GAP 2013“ besteht die Chance, KUP und deren Vorteilswirkungen in größerem Maße in der Agrarlandschaft zu etablieren. Insofern hemmen derzeit nicht die fehlenden wissenschaftlichen Grundlagen den zukünftigen Ausbau der KUP-Wirtschaft. Dieser ist vielmehr von dem politischen Willen abhängig, die Erkenntnisse der angewandten Forschung bei der Ausgestaltung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen adäquat zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit wäre, dass bei der Umsetzung des „Greening“ in der Landwirtschaft der Anbau von Kurzumtriebsplantagen auch auf ökologischen Vorrangflächen erlaubt wird (vgl. VTI 2012, ZALF 2012, DBV 2012).

Für die erfolgreiche Etablierung und Bewirtschaftung von KUP können folgende zusammenfassende Empfehlungen für die Praxis gegeben werden:

1. Die standortkundlichen Rahmenbedingungen und Standortansprüche von schnellwachsenden Baumarten sind bei der Planung und Anlage von Kurzumtriebsplantagen zwingend zu berücksichtigen. Insbesondere ist zu beachten, dass hohe Biomasse-Erträge nur bei ausreichend guter Wasserversorgung erzielt werden können.
2. Kurzumtriebsplantagen sind besonders in den ersten 2 bis 3 Jahren der Anlage sehr anfällig für Trockenstress. Das Wurzelwerk ist nach der Stecklingspflanzung noch nicht ausreichend ausgebildet und der potenzielle Bodenwasservorrat ist noch nicht vollständig erschlossen. Je nach betrieblichen Rahmenbedingungen kann in dieser Phase eine Bedarfsbewässerung der Kurzumtriebsplantage in Trockenperioden das Ausfallrisiko reduzieren.
3. Über die gesamte Nutzungsdauer einer Pappel-Kurzumtriebsplantage sollte auf eine ausgeglichene Nährstoffbilanz geachtet werden. Das Ziel muss der Erhalt einer günstigen Bodenpufferkapazität sowie die Aufrechterhaltung des standortstypischen Ertragspotenzials sein. Bei angepassten Kalkungs- und Düngekonzepten könnte auch die Verwertung und Rückführung von Holzasche aus Biomasse-Heizkraftwerken in geeigneter Form (z.B. Rinden-Asche-Pellets) berücksichtigt werden.
4. Aus regionalplanerischer Sicht und bei der Entwicklung von Förderinstrumenten im Rahmen der Reform der gemeinsamen europäischen Agrarpolitik (GAP) sollten die positiven Umweltwirkungen von Kurzumtriebsplantagen im Vergleich zu anderen Bioenergiepflanzen und landwirtschaftlichen Kulturen stärker berücksichtigt werden.

Aus wissenschaftlicher Sicht konnten in der vorliegenden Arbeit einige Fragen nicht abschließend beantwortet werden. Außerdem ergaben sich durch die Bearbeitung der Forschungsvorhaben neue Problemstellungen. Folgende Forschungsfragen können Ausgangspunkt für künftige, weiterführende Untersuchungen sein:

1. Wie lassen sich die Unterschiede im Wasserhaushalt zwischen verschiedenen Pappelklone sowie schnellwachsenden Baumarten (z.B. Robinie) und deren Relevanz für Standortsempfehlungen sowie hinsichtlich Grundwasserneubildung besser darstellen?
2. Wie kann die bei der prozessorientierten Modellierung auftretende Unsicherheit der Modellergebnisse besser dargestellt und in die Praxis kommuniziert werden?
3. Welche Methoden sind geeignet oder lassen sich weiterentwickeln, um die auf Standortsebene erzielten Ergebnisse (zum Wasserhaushalt) auf die Landschaftsebene übertragen?
4. Die Bewertungen zum Vorrat an organischer Bodensubstanz sind abhängig vom Ausgangszustand und von potenziell erreichbaren Zielzuständen. Wie lassen sich ökologische Referenzzustände standortsbezogen objektiv herleiten?
5. Wie können die Verfahren der Flächenvorbereitung bei der Anlage von KUP so optimiert werden, dass auf Standorten mit hohem Vorrat an organischer Bodensubstanz (z.B. Grünland) die Kohlenstoffverluste weitgehend minimiert werden?
6. Lassen sich die Verfahren bei der Flächenrückumwandlung von KUP zu Ackerflächen so gestalten, dass die akkumulierte organische Bodensubstanz erhalten bleibt?
7. Wie sind naturschutzfachlich aufgewertete KUP im Vergleich zu intensiv genutzten Niederwäldern ökologisch und ökonomisch zu beurteilen?

## 7 Zusammenfassung

Kurzumtriebsplantagen (KUP) besitzen das Potenzial, große Mengen Biomasse für die Erzeugung erneuerbarer Energie und als nachwachsender Rohstoff bereitzustellen. Es ist bekannt, dass KUP auf landwirtschaftlichen Flächen mehr Ökosystemdienstleistungen hervorbringen können als die üblicherweise angebauten einjährigen Ackerfrüchte oder Energiepflanzen wie Raps und Mais. Dennoch gibt es bisher nur wenige Informationen über den Wasserverbrauch und die Transpiration von Pappelarten und ihren Hybriden unter den spezifischen Standortsbedingungen in Deutschland. Darüber hinaus bestehen Wissenslücken für die Abschätzung langfristiger Auswirkungen von KUP auf bodenökologische Aspekte.

Um diese „Defiziten“ zu begegnen, wurden auf einem Standort im mittelsächsischen Löss-Hügelland Felduntersuchungen durchgeführt. Für die Analyse der Effekte von KUP auf die Bodenwasserbilanz wurden Safffluss- und Bodenfeuchtemessungen in einer 10jährigen Hybrid-Pappelplantage durchgeführt. Darüberhinaus wurden Biomasseakkumulation, Nährelementverteilung und bodenökologische Parameter erforscht.

Die Daten wurden genutzt, um ein prozessorientiertes Wasserhaushaltsmodell zu parametrisieren und zu kalibrieren. Das validierte Modell wurde danach für die Abschätzung und Bewertung des Einflusses von Pappel-KUP und Winterweizen auf die Wasserbilanz verschiedener sächsischer Standorte genutzt. Außerdem wurden die standortsspezifischen Biomasseerträge von KUP hergeleitet, und mit Hilfe von sachsenweit digital verfügbaren Standortdaten in einem Geografischen Informationssystem (GIS) dargestellt. Die regionalisierten standortstypischen Ertragspotenziale wurden mit den Informationen von Flächen verschnitten, auf denen der Anbau von KUP zu Synergien oder potenzielle Risiken für den Bodenschutz sowie den Natur- und Landschaftsschutz führen kann.

Die Ergebnisse zeigen, dass Hybrid-Pappelplantagen deutlich mehr Wasser als Ackerkulturen und einheimische Forstbaumarten verbrauchen. Es kann daraus abgeleitet werden, dass die Anlage von KUP auf Ackerflächen den wassergebundenen Nährstoffaustrag sowie den Austrag von Schadstoffen reduziert. Auch das Erosionsrisiko wird verringert. Andererseits kann eine (im Vergleich zum betroffenen Einzugsgebiet) großflächige Anlage von KUP zu einer geringeren Grundwasserneubildung führen. Eine ausreichende Wasserversorgung des Standorts ist unverzichtbar, um die Wuchspotenziale von Pappel-Hochleistungssorten voll auszuschöpfen.

Pappel-KUP können weitgehend ohne zusätzliche Düngung bewirtschaftet werden. Ehemals intensiv genutzte Ackerböden enthalten ausreichend Nährstoffe und Elemententzüge über die geerntete Biomasse werden durch atmosphärische Depositionen ausgeglichen. Auf lange Sicht kann der KUP-Anbau jedoch zu einer Verringerung des pH-Wertes und der Kationenaustauschkapazität im Boden führen. Für die Vermeidung negativer Folgen für die Bodenfruchtbarkeit und das Pflanzenwachstum sind dann angepasste Konzepte für die Kalkung und Düngung notwendig.

Die GIS-basierte Datenanalyse unterstreicht, dass in Sachsen beträchtliche Flächenpotenziale für die Anlage von KUP existieren. Auf einem großen Teil würde die Anlage von KUP auch andere Ökosystemdienstleistungen aus dem Bereich Boden- und Naturschutz verbessern.

Die künftige praktische Bedeutung von Kurzumtriebsplantagen wird jedoch in hohem Maße von der Gestaltung der agrarpolitischen Rahmenbedingungen in der EU abhängig sein.

Auch künftig sollte bei der Anlage von KUP-Flächen eine ökologische Begleitforschung erfolgen. Es besteht unter anderem der Bedarf, auch die ökologischen Aspekte von anderen schnell wachsenden Baumarten im Kurzumtrieb zu bewerten. Ein weiteres Ziel könnte die Verbesserung von Anlage- und Rückumwandlungstechnologien sein, um die Stabilität der akkumulierten organischen Bodensubstanz zu erhalten. Es wird geschlussfolgert, dass die künftige praktische Bedeutung von KUP eher von den sozioökonomischen Rahmenbedingungen und der regionalen Umsetzung der gemeinsamen Agrarpolitik der Europäischen Union abhängen wird als von unzureichenden Standortbedingungen.

## 8 Abstract

Short rotation plantations and short rotation coppice (SRC) have the potential to contribute significant amounts of biomass to the sectors of green energy and of renewable raw materials. It is generally accepted that SRC may provide more ecosystem services on agricultural land than common annual arable or even energy crops like oil seed rape or maize do. However, only sparse information exists about the water demand and transpiration of poplar species and their hybrids for site conditions in Germany. Furthermore, there is a lack of knowledge about the long-term impact of short rotation plantations on soil ecology.

To overcome these shortcomings, field investigations were conducted at a site in the hilly loess region of Saxony. To study effects of SRC on the soil water balance, sap flow and soil moisture measurements were conducted in a 10 years old hybrid poplar plantation. Moreover biomass accumulation, nutrient allocation and soil ecological parameters were determined.

The data were used to parameterize and calibrate a process-oriented hydrological model. The validated model was subsequently used to determine and assess the impact of short rotation poplar plantations and winter wheat on the water balance of different sites in Saxony. Finally, site specific yields of SRC were determined and areas with synergies and potential risks for soil protection, nature conservation at the regional scale were identified using Geographical Information Systems. The results show that hybrid poplar plantations consume significantly more water than arable crops and native tree species. Thus, it can be expected that the establishment of short rotation coppice may reduce the export of nutrients and pollutants or lower the risk of soil erosion. On the other hand, the large-scale establishment of short rotation coppice at catchments with negative climatic water balance may lead to a decrease of groundwater recharge. A sufficient water supply is indispensable in order fully to exploit the growth potential of high yielding poplar clones.

Short rotation plantations with poplar on arable land may be extensively managed without fertilization. Former intensively used agricultural soils provide sufficient nutrients and element exports by harvested biomass may be balanced by atmospherical deposition. However, it might be that in the long run cation exchange capacity and pH of the soils will decrease. This would require appropriated concepts for liming and fertilization.

The GIS based analysis shows that there exist a substantial potential of arable land for the cultivation of SRC in Saxony. There, the establishment of SRC may improve other ecosystem services as soil protection and nature conservation too.

Future research should be included into the ecological evaluation of new SRC plots. There is a need to assess ecological aspects of other fast growing tree species in SRC, in particular Black Locust. Another task could be the improvement of conversion practices to ensure the stability of accumulated soil organic matter during establishment and reconversion of SRC sites. It can be concluded that the future practical relevance of SRC is rather dependant on socio-economic framework conditions and the regional implementation of the common agricultural policy within the European Union than on insufficient site condition.

## 9 Literatur

- AGROWOOD (2010): Anbau, Ernte und Verwertung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen in der Region Freiberg (Sachsen) und im "Schradenland" (Südbrandenburg). (online verfügbar: [www.agrowood.de](http://www.agrowood.de); Abruf am 15.06.2012)
- ALVENÄS, G., JANSSON, P.-E. (1997). Model for evaporation, moisture and temperature of bare soil: calibration and sensitivity analysis. *Agricultural and Forest Meteorology* 88, 47-56
- BAUM, C., PETER LEINWEBER, P., WEIH, M., LAMERSDORF, N., DIMITRIOU, I. (2009): Effects of short rotation coppice with willows and poplar on soil ecology. *Agriculture and Forestry Research* 59, 183-196
- BEMMANN, A., NAHM, M., BRODEBECK, F., SAUTER, U.H. (2010): Holz aus Kurzumtriebsplantagen: Hemmnisse und Chancen. *Forstarchiv* 81, 246-254
- BEMMANN, A. UND C. KNUST (Hrsg. 2010): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-89998-159-9
- BMU (2011): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2011; Stand Juli 2012. (online verfügbar: [http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee\\_in\\_deutschland\\_graf\\_tab.pdf](http://www.erneuerbare-energien.de/fileadmin/ee-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee_in_deutschland_graf_tab.pdf); Abruf am 03.01.2013)
- BLAKE, T.J., SPERRY, J.S., TSCHAPLINSKI, T.J., WANG, S.S. (1996): Water relations. In: STETTLER, R.F., BRADSHAW, H.D., HEILMAN, P.E., HINCKLEY, T.M. (Hrsg.): *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*. NRC Research Press, Ottawa, Ontario, Canada: 401-422
- BOELCKE, B. (2006): Schnellwachsende Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen. – Leitfaden zur Erzeugung von Energieholz. Schwerin. 36 S.
- CHRISTERSSON, L. SENNERBY-FORSSE, L. ZSUFFA, L. (1993): The role and significance of woody biomass plantations in Swedish agriculture. *The Forestry Chronicle* 69, 687-693
- DAVIS, S.C., BOUNDY, R.G., DIEGEL, S.W. (2012): 2011 Vehicle technologies market report. Oak Ridge National Laboratory. (online verfügbar: <http://www.osti.gov/bridge>; Abruf am 15.06.2012)
- DBV (2012): Stellungnahme des Deutschen Bauernverbandes (DBV) für die 78. Sitzung des Ausschusses für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zur Öffentlichen Anhörung zum Thema: „GAP-Reform“. (online verfügbar: [http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012\\_10\\_22\\_GAP-Reform/Stellungnahmen](http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012_10_22_GAP-Reform/Stellungnahmen); Abruf am 25.11.2012)
- DENDROM (2008): Zukunftsrohstoff Dendromasse. (online verfügbar: [www.dendrom.de](http://www.dendrom.de); Abruf am 15.06.2012)
- DIETZSCH, A. (2011): Nutzung kontaminierter Böden - Anbau von Energiepflanzen für die nachhaltige, ressourcenschonende und klimaverträgliche Rohstoffabsicherung zur Erzeugung von Strom/Wärme und synthetischen Biokraftstoffen der zweiten Generation. *Schriftenreihe des LfULG* 19, 77 S.

- DIMITRI, L. (1988): Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb zur Energiegewinnung. Schriften des Forschungsinstitutes für schnellwachsenden Baumarten 4. ISBN 3-927194-00-X. Hannoversch Münden 72 S.
- DREWER, J., FINCH, J.W., LLOYD, C.R., BAGGS, E.M., SKIBA, U. (2011): How do soil emissions of N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> from perennial bioenergy crops differ from arable annual crops? *GCB Bioenergy* 4:408–419
- DÜLL, R., KUTZELNIGG, H. (1994): Botanisch-ökologisches Exkursionstaschenbuch. 5. überarbeitete Auflage. Quelle & Meyer Verlag. Wiesbaden
- ERIKSSON, H., EKLUNDH, L., HALL, K., LINDROTH, A. (2005): Estimating LAI in deciduous forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* 129, 27–37
- FEDERER, C.A. (2002): BROOK 90: A simulation model for evaporation, soilwater, and streamflow. (online verfügbar: <http://www.ecoshift.net//brook/brook90.htm>; Abruf am 25.11.2012)
- FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (1999): Modellvorhaben „Schnellwachsende Baumarten“ – Zusammenfassender Abschlussbericht. ISBN-10: 3784330096 Landwirtschaftsverlag. Münster
- FNR – Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (2012): Anbaufläche für nachwachsende Rohstoffe 2011. (online verfügbar: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbau/anbauflaeche-fur-nachwachsende-rohstoffe-2012-tabelle.html>; Abruf am 17.01.2013)
- FSB (2012): Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten. (online verfügbar: <http://www.schnellwachsendebaumarten.de>; Abruf am 15.06.2012)
- GÜNTHER, H. (1952 oder 53): Pappelforschung.- Gesamterforschung der Pappel und Aspe als schnellwüchsige Weichholzarten zwecks gesteigerter Rohstoffversorgung für die Papier- und Zellulose-Industrie. Jahresbericht 1953. Institut für Forstwissenschaften. Tharandt
- HALL, R.L., ALLEN, S.J., ROSIER, P.T.W., SMITH, D.M., HODNETT, G., ROBERTS, J.M., HOPKINS, R., DAVIES, H.N. (1996): Hydrological effects of short rotation energy coppice. Final report to ETSU. Institute of Hydrology, Wallingford
- HOFMANN, M. (1999): Modellvorhaben Schnellwachsende Baumarten. Zusammenfassender Abschlussbericht. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe Band 13 ISBN 3-7843-3009-6. Gülzow
- HOFMANN, M. (1998) Bewirtschaftung schnellwachsender Baumarten auf landwirtschaftlichen Flächen im Kurzumtrieb. Forschungsinstitut für schnellwachsende Baumarten. Merkblatt 11 Hann. Münden
- JANSSON, P.E. & L. KARLBERG (2004). Coupled heat and mass transfer model for soil-plant-atmosphere systems. - Royal Institute of Technology, Dept of Civil and Environmental Engineering, Stockholm 435 S., (online verfügbar: <ftp://www.lwr.kth.se/CoupModel/CoupModel.pdf>; Abruf am 15.06.2012)
- JOACHIM, H.F. (1953): Untersuchungen über die Wurzelbildung der Pappel und die Standortsansprüche von Pappelsorten. Wissenschaftliche Abhandlungen der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Band 7. Berlin 208 S.

- JOACHIM, H.F. (1991): Hybrid Aspen - schnellwüchsige, leistungsfähige und vielseitig einsetzbare Baumarten. IFE-Berichte aus Forschung und Entwicklung 22. Eberswalde 47 S.
- JUG, A., HOFMANN-SCHIELLE, C., MAKESCHIN, F., REHFUESS, K.E. (1999a): 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 Ecol Manage* 121, 67-83
- JUG, A., HOFMANN-SCHIELLE, C., MAKESCHIN, F., REHFUESS, K.E. (1999b): Short-rotation plantations of balsam poplars, aspen and willows on former arable land in the Federal Republic of Germany : III. Soil ecological effects. *Forest Ecol Manage* 121, 85-99
- KAHLE, P., HILDEBRAND, E., BAUM, C., BOELCKE, B. (2007): Long-term effects of short rotation forestry with willows and poplar on soil properties. *Arch Agron Soil Sci* 53, 673-682
- KLAPPAUF, L., BARTELS, C., LINKE, F.A., FESSNER, M. (o.J.): Waldleute im Harz - Umweltsünden und technische Innovation. Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege. (online verfügbar: <http://www.harzarchaeologie.de/17.html>; Abruf am 04.11.2012)
- KNUR, L., MURACH, D., SCHULTZE, M. (Hrsg. 2009): DENDROM – Zukunftsrohstoff Dendromasse. Systemische Analyse, Leitbilder und Szenarien für die nachhaltige energetische und stoffliche Verwendung von Dendromasse aus Wald- und Agrarholz. ISBN-10: 3-941300-05-9. Verlag Norbert Kessel. Remagen
- KORT, J., COLLINS, M., DITSCH, D. (1998): A review of soil erosion potential associated with biomass crops. *Biomass and Bioenergy* 14, 351–359
- LAMERSDORF, N., PETZOLD, R., SCHWÄRZEL, K., FEGER, K.H., B. KÖSTNER, U. MODEROW, C. BERNHOFER, C. KNUST (2010): Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen (Kap. 3.4). In: A. Bemmman und C. Knust (Hrsg.): AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven. Weißensee-Verlag, Berlin, ISBN 978-3-89998-159-9, S. 170-188
- LUNDMARK, A., JANSSON, P.E. (2009): Generic soil descriptions for modelling water and chloride dynamics in the unsaturated zone based on Swedish soils. *Geoderma* 150, 85-95
- MAKESCHIN F., REHFUESS, K.E., RÜSCH, I., SCHÖRRY, R. (1989): Anbau von Pappeln und Weiden im Kurzumtrieb auf ehemaligem Acker: standortkundliche Voraussetzungen, Nährstoffversorgung, Wachstumsleistung und bodenökologische Auswirkungen. *Forstw Cbl* 108:125-143
- MAKESCHIN, F. (1994): Effects of energy forestry on soils. *Biomass Bioenergy* 6:63-79
- MALCZEWSKI, J. (2004): GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning* 62, 3–65
- MANTAU, U. et al. (2010): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report. Hamburg/Germany, June 2010. 160 S.
- MEIRESONNE, L., DESCHRIJVER, A., DEVOS, B. (2006): Nutrient cycling in a poplar plantation (*Populus trichocarpa* x *Populus deltoides* 'Beaupré') on former agricultural land in northern Belgium. *Canadian Journal of Forest Research* 37, 141-155
- MILNIK, A., HEYDE, V., SCHULT, R. (1998) In Verantwortung für den Wald - Die Geschichte der Forstwirtschaft in der Sowjetischen Besatzungszone und in der DDR. Branden-

- burgisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrg.). ISBN 3-933352-00-. Potsdam
- MONTEITH, J.L., (1965): Evaporation and the environment. In: The State and Movement of Water in Living Organisms. XIX Symp. Society for Experimental Biology, Swansea, Cambridge University Press, 205–234
- PETZOLD, R., K. SCHWÄRZEL, FEGER, K.H. (2009): Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen. In: T. REEG, A. BEMMAN, W. KONOLD, D. MURACH, H. SPIECKER (Hrsg.): Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen. Wiley-VCH, Weinheim, 181-191
- PETZOLD, R., FEGER, K.H., SCHWÄRZEL, K. (2010): Wieviel Wasser verbraucht eine Kurzumtriebsplantage? Jahrestagung der DBG: Böden - eine endliche Ressource, September 2009, Bonn. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. (online verfügbar: <http://eprints.dbges.de/188/>; Abruf am 16.08.12)
- POLSTER, H. (1957): Transpirationsintensität und Wasserbedarf von Pappelklonen. Wissenschaftliche Abhandlungen der Akademie der Landwirtschaftswissenschaften Band 27 Beiträge zur Pappelforschung II, S. 99-147
- RASCHKA, H.D. (1997) forstliche Biomasseproduktion im Kurzumtrieb. FBVA Berichte Nr. 97. Wien
- R DEVELOPMENT CORE TEAM (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.
- RICHARDS, L.A., (1931): Capillary conduction of liquid through porous medium. Physics 1, 318–333
- RICHTER, D. (1995). Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 93 S.
- RÖHRICHT, C. & RUSCHER, K. (2009) Anbauempfehlungen - Schnellwachsende Baumarten im Kurzumtrieb. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Pillnitz 58 S.
- SADORI, L., SUSANNA, F., BALOSSI RESTELLI, F. (2008) Collapsed Beams and Wooden Remains from a 3200 BC Temple and Palace at Arslantepe (Malatya, Turkey). In G.Fiorentino und D. Magri (Hrsg.): Charcoals from the Past: Cultural and Palaeoenvironmental Implications, BAR International Series 1807. Archaeopress Oxford. S. 237-250
- SCHMIDT-WALTER, P., LAMERSDORF, N.P. (2012): Biomass Production with Willow and Poplar Short Rotation Coppices on Sensitive Areas - The Impact on Nitrate Leaching and Groundwater Recharge in a Drinking Water Catchment near Hannover, Germany. BioEnergy Research 5, 546-562
- SCHOLZ, V., HEIERMANN, M., KERN, J., BALASUS, A. (2011): Environmental impact on crop cultivation. Archives of agronomy and soil science 57, 805-837
- SEINTSCH, B. (2011): Der Rohstoff Holz zwischen stofflicher und energetischer Verwertung. Vortrag zur „Herbstwaldtagung 2011“ am 22.10.2011 in Bad Segeberg. (online verfügbar: <http://www.sdw-sh.de/vortrherbstwald2011/seintsch.pdf>, Abruf am 06.01.2012)

- Shaw, R.H. & PEREIRA, A.R. (1982): Aerodynamic roughness of a plant canopy: a numerical experiment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 26, 51-56
- SPANK, U. (2010): Site Water Budget: Influences of Measurement Uncertainties on Measurement Results and Model Results. Univ. Diss. TU Dresden
- STETTLER, R.F., BRADSHAW, H.D., HEILMAN, P.E., HINCKLEY, T.M. (1996): *Biology of Populus and its implications for management and conservation*. NRC Research Press, National Research Council of Canada. ISBN 0-660-16506-6. Ottawa
- STEINSIEK, P.M. (2008): Forst- und Holzforschung im „Dritten Reich“. *Freiburger Schriften zur Forst- und Umweltpolitik* 18. ISBN 978-3-935638-98-2. Verlag Norbert Kessel. Remagen
- STEPHENS, W., HESS, T., KNOX, J. (2001): Review of the effects of energy crops on hydrology. Report to MAFF. Institute of Water and the Environment, Cranfield University, Silsoe
- THRÄN, D., EDEL, M., PFEIFER, J., PONITKA, J., RODE, M. KNISPEL, S. (2011): Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung. DBFZ-Report 4, (online verfügbar: [http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user\\_upload/DBFZ\\_Reports/DBFZ\\_Report\\_4.pdf](http://www.dbfz.de/web/fileadmin/user_upload/DBFZ_Reports/DBFZ_Report_4.pdf); Abruf am 06.01.2012)
- SUCHOMEL, C. & W. KONOLD (2008): Niederwald als Energiequelle – Chancen und Grenzen aus Sicht des Naturschutzes. *Ber. Naturf. Ges. Freiburg i. Br.*, 98: 61 - 120
- UNSELD, R. (1999) Kurzumtriebsbewirtschaftung auf landwirtschaftlichen Grenzertragsböden. Dissertation Universität Freiburg. Shaker-Verlag Aachen. 193 S.
- VON WETTSTEIN, W. (1944): Die Vermehrung und Kultur der Pappel. Sauerländers Verlag. Frankfurt a. Main. 52 S.
- VTI (2012): Stellungnahme des Johann Heinrich von Thünen-Institutes (vTI) für die 78. Sitzung des Ausschusses für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zur Öffentlichen Anhörung zum Thema: „GAP-Reform“. (online verfügbar: [http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012\\_10\\_22\\_GAP-Reform/Stellungnahmen](http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012_10_22_GAP-Reform/Stellungnahmen); Abruf am 25.11.2012)
- WEISGERBER, H. (1975): Kurzumtrieb bei Pappeln als Möglichkeit zur Steigerung der Holzproduktion. *Die Holzzucht* 29: 29-32
- WEISGERBER, H. (1986): Anbau schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb – Voraussetzungen, Leistungen, Perspektiven. *Journal of Agronomy and Crop Science* 156, 173–187
- WEISGERBER, H. (1988): Raschwüchsige Baumarten in kurzen Umtriebszeiten - Aktuelle Erkenntnisse der Züchtung und Produktion. *Forstarchiv* 59, 1988, S. 84-89
- WOLF, H., BÖHNISCH, B. (2004): Modellvorhaben StoraEnso/Verbundvorhaben - Pappelanbau für die Papierherstellung: Teilvorhaben: Anbau von Pappeln und Aspen auf potentiellen landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase I); Monitoring von Pappelanbauten auf landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase II): Abschlussbericht; Laufzeit des Vorhabens: 01.11.1997 - 31.08.2000 (Pha-

se I), 01.10.2000 - 31.12.2003 (Phase II); Berichtszeitraum: 01.11.1997 - 31.12.2003 (unveröffentlicht)

ZACHARIAS, S. & G. WESSOLEK (2007): Excluding Organic Matter Content from Pedotransfer Predictors of Soil Water Retention. *Soil Science Society of America Journal* 71, 43-50

ZALF (2012) Stellungnahme des Leibniz-Zentrums für Agrarlandschaftsforschung e.V. für die 78. Sitzung des Ausschusses für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz zur Öffentlichen Anhörung zum Thema: „GAP-Reform“. (online verfügbar: [http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012\\_10\\_22\\_GAP-Reform/Stellungnahmen](http://www.bundestag.de/bundestag/ausschuesse17/a10/anhoerungen/2012_10_22_GAP-Reform/Stellungnahmen); Abruf am 25.11.2012)

Erklärung:

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als diese kenntlich gemacht worden. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Die Idee, Konzeption und Durchführung der kumulativen Dissertationsschrift stammen vollständig von mir und wurde mit Prof. Feger abgestimmt. Die Manuskripte der publizierten Beiträge in den genannten wissenschaftlichen Zeitschriften und Büchern wurden von mir erstellt und mit den Koautoren abgestimmt. Sämtliche notwendige Revidierungen vor der Publikation wurden durch mich vorgenommen.

Die Boden- und Pflanzenuntersuchungen für den Artikel in der Zeitschrift „Die Bodenkultur“ [PETZOLD, R., SCHUBERT, B., FEGER, K.H. (2011): Biomasseproduktion, Nährstoffallokation und bodenökologische Veränderungen in einer Pappel-Kurzumtriebsplantage in NO-Deutschland. – Die Bodenkultur 61, 23-35] erfolgten zum Teil im Rahmen einer Diplomarbeit (Frau Schubert), die von mir wissenschaftlich betreut und bei den Feldarbeiten unterstützt wurde. Alle anderen Daten wurden durch mich erhoben. Die Auswertung erfolgte durch mich. Idee, Konzeption und Erstellung des Manuskripts erfolgte durch mich in Abstimmung mit den Koautoren.

Im Artikel für die Zeitschrift „Journal of Biogeosciences and Forestry“ [PETZOLD, R., BUTLER-MANNING, D., FELDWISCH, N., GLASER, T., SCHMIDT, P.A., DENNER, M., FEGER, K.H. (Manuskript im Reviewprozess): Linking biomass production in short rotation coppice with soil protection and nature conservation. Journal of Biogeosciences and Forestry] wurde das Material für die Teile zum Bodenschutz und Naturschutz insbesondere durch Dr. Norbert Feldwisch bzw. Herrn Thomas Glaser erstellt. Alle anderen Inhalte, die Manuskripterstellung einschließlich Synthese erfolgten durch mich in Abstimmung mit den Koautoren.

Frau Jana Petzold übernahm das Korrekturlesen der Dissertationsschrift.

Weitere Personen waren an der geistigen Herstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe eines oder mehrerer Promotionsberater(s) in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde zum Zwecke der Promotion vorgelegt.

Ich bestätige, dass ich die Promotionsordnung der Fakultät Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden anerkenne.

Ort, Datum, Unterschrift