
Hydrologische Aspekte von Pappel-Kurzumtriebsplantagen am Beispiel Kaufering

Martina Zacios und Lothar Zimmermann

Schlüsselwörter: Pappel, Kurzumtriebsplantage, Energiewald, Wasserhaushalt, Messung, Modellierung, LWF-BROOK90, Transpiration, Xylemfluss, Interzeption, Grundwasserneubildung, Stoffhaushalt, Nitrat, Trinkwasserschutzgebiet

Zusammenfassung: Eine Kurzumtriebsplantage entwickelt sich bedeutend schneller als ein Wald, da vorzugsweise Baumarten mit rasantem Jugendwachstum angebaut werden, entsprechend dynamisch entwickelt sich ihr Wasserhaushalt. Am Beispiel eines Trinkwasserschutzgebiets im Voralpenland werden Wasserhaushalts- und Stoffbilanzen für eine Pappel-KUP sowie für konventionelle landwirtschaftliche Nutzung über einen Zeitraum von vier Jahren vorgestellt. Der Wasserhaushalt wurde zum einen aus Messungen, zum anderen mit dem bodenhydrologischen Modell LWF-BROOK90 hergeleitet. Die Grundwasserneubildung unter Pappel war je nach Bestandesalter und Witterung um 35 bis 60% gegenüber einjährigen Ackerkulturen reduziert. Da die Evapotranspiration mit dem Alter der Bäume zunimmt, kann über kürzere Umtriebszeiten von maximal vier bis fünf Jahren diesem Effekt etwas entgegengewirkt werden. Die Nitratreinträge ins Grundwasser werden gegenüber konventionell bewirtschafteten landwirtschaftlichen Flächen deutlich reduziert, da je nach Standort bei Kurzumtriebsplantagen fast ganz auf eine Düngung verzichtet werden kann. Der Eintrag an Nitrat-Stickstoff in den Trinkwasserkörper ist unter der KUP 70 bis 76% niedriger. Abweichungen im ersten Jahr erklären sich durch Nachwirkungen eines vorausgehenden Grünlandumbruchs. Eine teilweise Ernte der Pappeln im Januar 2013 zeigte keine nennenswerten zusätzlichen Stoffverlagerungen in die Tiefe. Die Anlage für KUP auf landwirtschaftlichen Gebieten kann nicht nur für den Grundwasserschutz, sondern auch für den Gewässerschutz allgemein sowie für Hochwasser- und Erosionsschutz nützlich sein.

Die wertvolle Ressource Wasser, sei es Grund-, aber auch Oberflächenwasser, ist verschiedenen Gefahren der Verunreinigung ausgesetzt. Besonders hervorzuheben sind dabei Stickstoffverbindungen (im wesentlichen Nitrat) und Pflanzenschutzmittel (PSM), von denen aufgrund ihres flächenhaften Eintrags eine wesentliche Beeinträchtigung der Grundwasserqualität ausgehen kann (BayLfU 2014). Für Nitrat wird der gemäß Grundwasserverordnung geltende Schwellenwert in Höhe von 50 mg/l in Bayern im Rohwasser von etwa 3% der untersuchten Wassergewinnungsanlagen überschritten. Weitere 16 bis 20% der Anlagen bzw. gleichzeitig auch der gewonnenen Wassermenge verteilen sich auf die Belastungsklassen zwischen 25 und 50 mg/l und sind somit als mäßig bis stark belastet einzustufen. Mit Blick auf die Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie sind daher laut LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) weitergehende Maßnahmen erforderlich. Bayern setzt dabei auf ergänzende Maßnahmen im Rahmen des Bayerischen Kulturlandschaftsprogramms und eine entsprechende Beratung, um die Stickstoffeinträge zu vermindern und damit für eine Verbesserung der Nitratsituation im Grundwasser zu sorgen.

Durch eine Extensivierung der Landnutzung mittels der Anlage einer Kurzumtriebsplantage (KUP) können die Nitratreinträge ins Grundwasser gegenüber gedüngten Flächen, sei es Acker aber auch intensiv bewirtschaftetes Grünland, deutlich reduziert werden, da je nach Standort während der KUP-Bewirtschaftung größtenteils oder gar ganz auf eine Düngung verzichtet werden kann. Verglichen mit konventioneller Acker- und Grünlandnutzung ist auf KUP-Flächen auch der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln beispielsweise zur Unkrautregulierung in der Begründungsphase deutlich geringer. KUP sind damit eine geeignete Landnutzung, um Stoffeinträge in das Grundwasser zu minimieren.

Hauptthema dieses Beitrags aus dem Projekt »Ökologische und ertragskundliche Aspekte von Kurzumtriebsplantagen bei Kaufering (KLIP11)« ist daher die Hydrologie einer Pappel-Kurzumtriebsplantage darzustellen. Zum einen quantitativ, d. h. wie ändert sich die Grundwasserspende, zum anderen qualitativ, wie ändern sich die Stoffkonzentrationen sowie die Stoffausträge,



Abbildung 1:
Zur räumlichen Einordnung
des Untersuchungsge-
bietes;
N: Kaufering,
O: Bundeswehrflughafen
Penzing,
S: A96,
SW: Landsberg am Lech,
W: Lech;
blaue Fläche: Trink-
wassereinzugsgebiet;
blaues Rechteck: Lage der
Versuchsflächen

die in den Grundwasserkörper gelangen. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass nur aus dem Zusammenspiel von möglichst langen Messreihen und Modellierung fundierte Aussagen sowohl über den Wasser- als auch über den Stoffhaushalt der sehr wuchsdynamischen Kurzumtriebsbewirtschaftung bis über die erste Ernte hinaus abgeleitet werden können.

Untersuchungsgebiet Kaufering

Das Untersuchungsgebiet liegt im Gemeindegebiet Kaufering (Landkreis Landsberg am Lech, Bezirk Oberbayern; Topografische Karte 7931 NW-Quadrant; 10,882°–10,891° Ost, 48,079°–48,080° Nord). Die Versuchsfläche liegt auf ca. 620 m ü.NN. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 7,4 °C, der mittlere jährliche Niederschlag 972 mm (DWD-Station Penzing Periode 1961–1990). Als Grasreferenzverdunstung (ET_{pot}) wird für diese Klimaperiode ein Bereich von 500–525 mm/a

angegeben. Die klimatische Wasserbilanz liegt bei zwischen 400–600 mm/a (BMU 2003). Das Untersuchungsgebiet befindet sich östlich des Lechs auf der Lechhochterrasse zwischen Kaufering und Landsberg (Abbildung 1). Landschaftsgenetisch gehört die Fläche zum Bayerischen Alpenvorland. Es finden sich quartäre Lösslehme über risszeitlichen Moränen. Die Lössauflagen erreichen mehrere Meter Mächtigkeit. An den steilen Abbrüchen zum Lech wird die Obere Süßwassermolasse angeschnitten.

Das Trinkwasserschutzgebiet der Gemeinde Kaufering und somit auch die Intensiv-Messflächen liegen auf einem sehr ertragreichen Löss-Standort. Durch die extensivierte Landnutzung in Teilen des sonst sehr intensiv landwirtschaftlich genutzten Trinkwassereinzugsgebiets erhofft sich die Gemeinde einen Rückgang der Nitratkonzentration in ihrem Trinkwasser (derzeit 30 mg/l). In der Regel werden Kurzumtriebsplantagen jedoch nicht auf solch ertragreichen Böden angelegt.

Bodentiefe [cm]	Horizont [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	Kies [%]	Trockenraumdichte (TRD) [g/cm ³]	Gehalt an organischem Kohlenstoff C _{org} [%]	Kohlenstoff / Stickstoffverhältnis C / N
0–25	Ap	24,7	55,7	18,3	1,3	1,34	1,41	8,5
25–40	Ap-Bv	27,9	47,1	24,8	0,2	1,56	0,59	7,2
40–70	Bt-Bv	21,9	47,1	30,5	0,5	1,40	0,47	6,2
70–90	Sw-Bv1	19,2	49,9	28,7	2,2	1,56	0,42	7,1
90–110	Sw-Bv2	15,7	52,1	31,2	1,52	1,52	0,32	8,7

Tabelle 1: Bodeneigenschaften am Löss-Standort im Trinkwasserschutzgebiet Kaufering



Abbildung 2:
 Bodenprofil am Standort
 »Löss« (links)
 sowie am Standort
 »Schotter« (rechts)
 Fotos: M. Zacios

Flächen auf Grenzertragsstandorten bieten sich aufgrund der Genügsamkeit der Pappeln besonders an, zumal wenn wie im Raum Landsberg ausreichende Niederschläge vorhanden sind. Seit 2013 werden deshalb im Rahmen des Projekts auch Untersuchungen (Transpiration, Infiltration, Flora und Fauna) auf einem flachgründigen, mageren und trockenen Schotterstandort im Westen Kauferings, Unterirglinger Lechstufe, durchgeführt. Bei diesem Standort ist neben dem Wasserverbrauch der Bäume besonders ihre Reaktion auf etwaigen sommerlichen Wassermangel interessant.

Der Schwerpunkt der Kauferinger Erhebungen liegt in einem Trinkwasserschutzgebiet. Die Untersuchungen zum Wasser- und Stoffhaushalt werden an einer auf vormaligem Dauergrünland angelegten Kurzumtriebsplantage durchgeführt. Im April 2008 wurden auf drei Hektar, nach einem Grünlandumbruch, Stecklinge des Pappel-Hybriden Max3 (*Populus maximowiczii* ×

P. nigra) mit einem Pflanzabstand von 1 m auf 2 m Reihenabstand gesetzt. Um Konkurrenzen zwischen den jungen Pappeln und der Begleitvegetation, vor allem während der Anwuchsphase, zu minimieren, wurde ein Totalherbizid sowie ein Voraufaufmittel, zur Vermeidung der Keimung im Boden verbliebener Samen, auf der Fläche aufgebracht. Diese Fläche wird deshalb im Folgenden ggf. mit dem Kürzel »KUP konv.« (KUP konventionell) versehen.

Um die Unterschiede zwischen der Kurzumtriebsbewirtschaftung und konventionellem Ackerbau ermitteln zu können, werden die relevanten Parameter vergleichend auf einer angrenzenden landwirtschaftlichen Referenzfläche erfasst. Dieser benachbarte Referenzacker war im Aufnahmezeitraum 2009 bis 2014 mit der regional üblichen Fruchtfolge Winterweizen – Sommerweizen – Mais – Winterweizen – Grünroggen – Mais bestellt.

Bodentiefe [cm]	Horizont [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	Kies [%]	TRD [g/cm ³]	C _{org} [%]	C/N
0–20	Ap	24,4	35,2	31,8	8,7	1,71	3,7	9,6
20–35	Bvt	25,9	21,8	25,1	27,1		1,7	8,9
35–45	BvII-Cv	38,6	12,5	18,0	30,8	1,81	0,3	6,0
>45	Cn	43,9	12,8	11,9	31,4	1,70	0,2	9,5

Tabelle 2: Bodeneigenschaften am Schotter-Standort westlich von Kaufering

Messmethoden und Wasserhaushaltsmodellierung

Um Wasserflüsse in der KUP berechnen zu können, ist die Parametrisierung eines Wasserhaushaltsmodells notwendig. In der Literatur sind die zur Verfügung stehende Datengrundlagen, sowohl deutschlandweit als auch international, sehr dünn. Daher sind intensive Geländeerhebungen nötig, um zu belastbaren Modellergebnissen zu gelangen. Zu diesem Zweck wurde zwischen 2009 und 2015 ein hydrologisches Monitoring-System auf den Versuchsflächen eingerichtet.

Bodenfeuchte und Stoffkonzentrationen im Sickerwasser

Seit Herbst 2009 werden auf den beiden Intensivmessflächen KUP und Acker die Messungen der Bodenfeuchte sowie die Gewinnung von Sickerwasserproben kontinuierlich durchgeführt. Im Hinblick auf die rasche Dynamik auf KUP-Flächen und zur Abdeckung eines längeren Zeitraums mit unterschiedlichen Witterungsbedingungen sind die fast fünfjährigen Zeitreihen für das bessere Verständnis der hydrologischen Prozesse wertvoll. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf etwaigen Auswirkungen der ersten Teilernte, die im Januar 2013, also nach der fünften Vegetationsperiode, auf einem Drittel der Fläche durchgeführt wurde. Über den Wasserverbrauch wiederaustreibender Wurzelstöcke liegen deutschlandweit ebenso wenige

Daten vor wie über die stofflichen Auswirkungen der ersten Erntemaßnahme.

Kurzumtriebsplantagen, die auf ehemaligen landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen angelegt wurden, bedeuten eine Extensivierung der Bewirtschaftung. Im Gegensatz zur landwirtschaftlichen Produktion ist, abgesehen von der Bestandsbegründung und den damit einhergehenden Vorarbeiten, keine weitere Bodenbearbeitung, Düngung oder Ausbringung von Pflanzenschutzmittel notwendig. Besonders in Trinkwasserschutzgebieten ist dies ein interessanter Punkt, da aufgrund der zu erwartenden geringeren Sickerwassermenge und der fehlenden Stickstoffdüngung eine bessere Sickerwasserqualität zu erwarten ist (Lamersdorf und Schmidt-Walter 2011; Petzold et al. 2010; DBU 2010).

Um die Auswirkungen der Landnutzungsänderung von landwirtschaftlich genutzter Fläche zur Kurzumtriebsplantage auf die Sickerwasserqualität sowie -quantität erfassen zu können, sind umfangreiche Kenntnisse zur Bodenwasserdynamik und zur Bodenwasserchemie erforderlich. Aus diesem Grund wurden im Sommer 2009 auf der KUP sowie auf der landwirtschaftlich genutzten Vergleichsfläche unter anderem je ein zwei Meter breiter und drei Meter tiefer Messschacht installiert. Abbildung 3 links zeigt einen schematischen Schnitt durch solch einen Schacht. Die ausführliche Beschreibung des Messdesigns erfolgte in Niederberger et al. (2010) sowie in Zacios und Nieder-

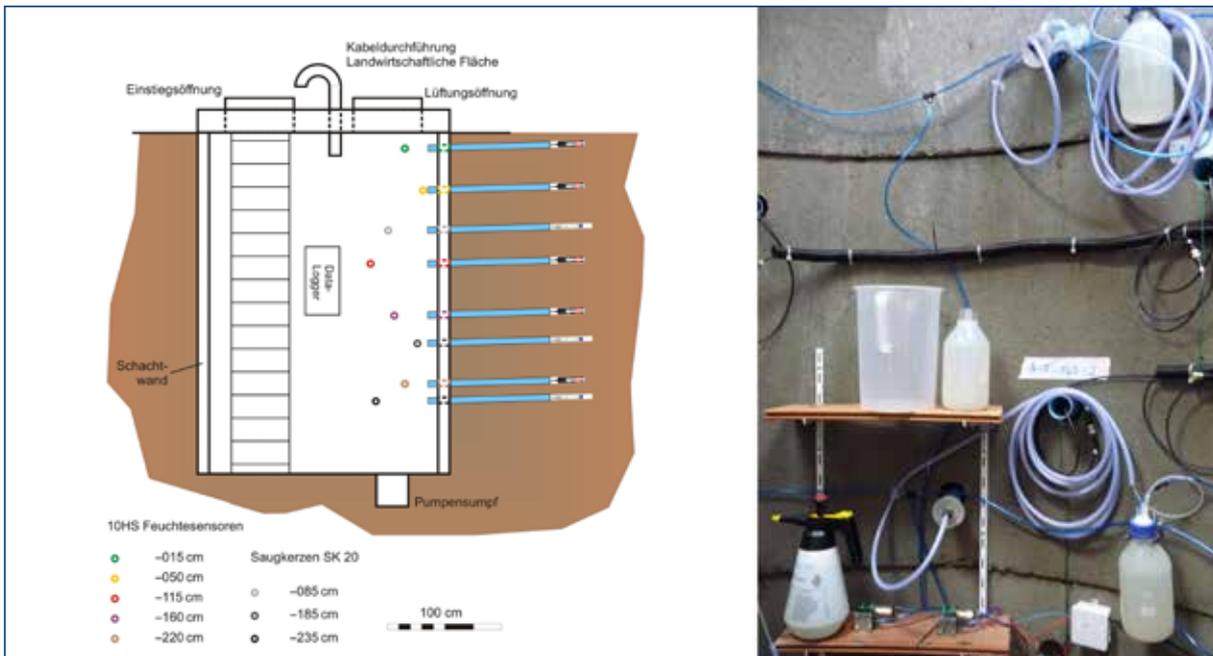


Abbildung 3: Messschacht; links: Schematischer Längsschnitt; rechts: Innenansicht Foto: L. Zimmermann

berger (2011), im Folgenden soll es nur kurz umrissen werden: Der Bodenwassergehalt wird mit FDR-Sonden (10HS, Firma Decagon) in den Tiefenstufen 15, 50, 115 cm und unter der KUP zusätzlich in 160 und 220 cm mit drei bis fünf Wiederholungen gemessen. Die Sonden ermitteln kapazitativ den volumetrischen Wassergehalt des Bodens. Mittels Keramik-Saugkerzen (SK20, Firma UMS München sowie bauähnlichen Saugkerzen aus eigener Herstellung) werden in den Messschächten Sickerwässer aus den Tiefen 85 cm, 185 cm sowie unter der KUP zusätzlich aus 235 cm gewonnen. Der zur Gewinnung der Sickerwasserproben nötige Unterdruck von 400–500 mbar wird je Tiefenstufe automatisch alle sechs Stunden über Pumpen (SP560 EC-LC, Firma Schwarzer Precision) angelegt. Abbildung 3 rechts zeigt die Innenansicht des fertig instrumentierten Schachts. Zu erkennen sind die gläsernen Auffangflaschen für die Bodenwasserproben. In den schwarzen Hüllrohren verlaufen die Kabel der Wassergehaltssonden. Unten im Bild sind die automatischen Pumpen zum Anlegen des Unterdrucks zu erkennen.

Im April 2011, nach der Mais-Aussaat, wurden zur Erfassung der räumlichen Verteilung der Stoffkonzentrationen auf der Ackerfläche vier Messplots mit je vier Saugkerzen in 85 cm Tiefe installiert (Abbildung 4). Die Plots orientierten sich an dem Muster der N_{\min} -Gehalte der N_{\min} -Inventur im Dezember 2010. An diesen Saugkerzen wird seitdem in regelmäßigen Abständen mit einer Handpumpe, seit 2012 dann automatisch alle sechs Stunden ein entsprechender Unterdruck angelegt. Die erhaltenen Proben werden, wie die Niederschlagsproben, im vierzehntäglichen Turnus entnommen.

Zusätzlich zu dem seit 2009 betriebenen Messschacht unter dem nun bereits geernteten Teil dieser KUP wurde im Juli 2013 ein neuer Messgraben unter dem noch nicht geernteten Teil derselben KUP in Betrieb genommen. Entsprechend dem bestehenden Messdesign wurden auch hier in je vier Bodentiefen sowohl FDR-Sensoren zur Erfassung der Bodenfeuchte als auch Saugkerzen zur Gewinnung von Sickerwasserproben installiert. So können seither in Kaufering die Bodenfeuchtedynamik sowie die Stoffkonzentrationen im Sickerwasser unter zwei verschiedenen Bewirtschaftungsstadien parallel beobachtet werden. Zum einen als Fortsetzung der bestehenden Zeitreihe unter ein- (2013) bzw. zweijährigen (2014) Trieben nach der ersten Ernte und zum anderen also unter sechs- (2013) bzw. siebenjährigen (2014) Pappeln noch im ersten Umtrieb auf der gleichen Fläche. Hieraus können für die Praxis wertvolle Empfehlungen bezüglich der Umtriebszeiten abgeleitet werden.



Abbildung 4: Saugkerzenplot (T1) mit vier Saugkerzen auf der Ackerfläche (links im Hintergrund die Intensivmessfläche KUP konv., rechts im Hintergrund KUP ökol.)

Foto: M. Zacios

Aus den mit dem Wasserhaushaltsmodell LWF-BROOK90 berechneten Sickerwasserraten und den auf den Versuchsflächen gemessenen Stoffkonzentrationen im Sickerwasser konnten die Stofffrachten, also die Stoffeinträge in den Grundwasserkörper über das Sickerwasser, bestimmt werden. Hierfür wurden die modellierten Sickerwasserraten zwischen zwei Probennahmeterminen mit der Stoffkonzentration der gewonnenen Sickerwasserproben pro Tiefenstufe verrechnet.

Niederschlag, Interzeption und Stammabfluss

Der Niederschlag im Freiland sowie unterhalb der Baumkronen wird sowohl quantitativ als auch qualitativ erfasst. Diese Erhebungen dienen zunächst dazu, die durch Interzeptionsverluste auf der Pappelfläche entstandene Differenz der Niederschlagsmengen zu bestimmen und somit die modellierten Interzeptionsverluste validieren zu können. Der Freilandniederschlag wird mithilfe von drei Bulksammlern (LWF-Sammler, Abbildung 5 links) auf einer der Pappelfläche direkt benachbarten Freifläche aufgefangen. Die Bulksammler haben einen Durchmesser von 203 mm bzw. eine Auffangflächen von $0,032\text{m}^2$.

Als Interzeption wird derjenige Anteil des Niederschlags bezeichnet, der von der Vegetation zurückgehalten wird und von dort direkt wieder in die Atmosphäre verdunstet, somit dem Boden nicht zugeführt wird. Umso größer die Blattfläche, desto höher auch der Anteil des abgefangenen Niederschlags. Zusätzlich zur Interzeptionsverdunstung als Summe aus dem von der Pflanzenoberfläche verdunsteten, interzeptierten Niederschlag (Regen + Schnee) kommt noch im Winter das von der Schneeoberfläche verdunstete Wasser hinzu. Letzteres macht nur einen sehr geringen Betrag



Abbildung 5: Instrumentierung zur Erfassung des Niederschlages; links: Depositionssammler Freiland; mittig: Niederschlagsrinnen zur Erfassung des Bestandsniederschlags unter den Pappeln; rechts Stammabflussrinne Fotos: M. Zacios

aus durch die aufgrund der Höhenlage relativ kurze Dauer der Schneedecke sowie der generell während des Winters niedrigen Verdunstung.

Da sich die Interzeption kaum direkt erfassen lässt, wird sie auf der KUP indirekt über den Bestandsniederschlag, bestehend aus Kronentraufe und Stammabfluss, erhoben. Die Kronentraufe wird über Niederschlagsrinnen gesammelt. Diese wurden nach der DVWK-Richtlinie gebaut (DVWK 1986). Sie haben eine Gesamtlänge von 10 m und eine Öffnungsbreite von 14 cm und damit eine Auffangfläche von 1,4 m². Die Niederschlagsmenge wird ereignisbezogen 100-ml-weise über eine Kippwaage registriert. 2,5 ml pro Kippung werden in eine Sammelflasche geleitet. Die gewonnenen Proben sowohl auf Freiland als auch im Bestand werden in der Regel alle zwei Wochen entleert und anschließend im Labor der LWF analysiert. So können die Stoffeinträge über den Niederschlag als 14-Tages-Summen erfasst werden.

Seit dem Frühjahr 2013 wird neben dem Freilandniederschlag sowie der Kronentraufe an drei Bäumen zusätzlich der Stammabfluss erfasst. Wie bei Buchen begünstigen die trichterförmige Baumkrone sowie die glatte Rinde den Ablauf des interzipierten Niederschlages am Stamm entlang zum Boden. Mit zunehmendem Stammdurchmesser der Bäume hat der Stammabfluss im Laufe der Jahre quantitativ an Bedeutung gewonnen. Die drei Niederschlagskomponenten Freilandniederschlag, Kronentraufe und Stammablauf werden zur Validierung der Modellberechnungen der Interzeption verwendet.

Blattfläche

Für die Berechnung des Wasserhaushalts eines Bestands ist die Blattfläche ein ausschlaggebender Parameter, da der Wasserhaushalt der Pflanze neben den Wurzeln hauptsächlich über die Blätter gesteuert wird. Pflanzen verdunsten über ihre stomatären Öffnungen auf ihren Blättern Wasser. Sie profitieren in zweierlei Hinsicht von diesem Mechanismus. Zunächst gewährleistet der durch die anhaltende Verdunstung verursachte Transpirationssog in der Pflanze eine ständige Nachlieferung von frischem, nährstoffreichem Wasser aus dem Boden. Darüber hinaus schützt die Verdunstung die Pflanze bei starker Sonneneinstrahlung vor Überhitzung. Die Menge an transportiertem Wasser in einer Pflanze wird maßgeblich durch ihre Blattfläche bestimmt. Die Blattfläche eines Bestands wird über den LAI (Leaf Area Index), also dem Blattflächenindex, dargestellt. Der LAI wird in m² projizierte Blattfläche pro m² Bodengrundfläche angegeben und kann Werte zwischen 0 und über 10 annehmen.

Der LAI für Grünland (Bewuchs KUP-Fläche 2007) konnte aus einer Literaturstudie (Breuer et al. 2003) übernommen werden. Für die Jahre 2009, 2010 und 2011 sowie 2013 und 2014 ist der LAI der Pappeln aus den in den Streusammlern gewonnenen Laubproben bestimmt worden. Diese Berechnungen des LAI beruhen auf dem Verhältnis Blattfläche zu Blattmasse.



Abbildung 6: Bestimmung der Durchwurzelungsintensität (Wurzelspitzen pro dm^2)

Fotos: M. Zacios

Durchwurzelung

Ziel der Untersuchungen war es, die Wurzelverteilung bzw. Durchwurzelungsintensität unter KUP sowie deren Unterschiede auf flachgründigen, skelettreichen Standorten bzw. tiefgründigen Standorten zu ermitteln. Sie liefern Informationen zur Tiefenerschließung des Wurzelsystems und erlauben damit eine Einschätzung, bis zu welcher Tiefe dem Boden Wasser entzogen wird. Außerdem können Hinweise auf mögliche Durchwurzelungsbarrieren abgeleitet werden. Angaben zu (maximalen) Durchwurzelungstiefen stellen eine wichtige Grundlage zur Festlegung der Bezugstiefe der für die Ertragsmodellierung verwendeten Wasserhaushaltskenngröße nutzbare Feldkapazität (nFK) dar.

Im März 2011 wurden unter der Kauferinger Kurzumtriebsplantage erstmalig Wurzelspitzenzählungen durchgeführt. Wie auf dem Foto in Abbildung 6 zu erkennen, wurde dafür ein Bodenprofil freigelegt, an welchem anschließend ein 1 m^2 großer Rahmen angebracht wurde. Gezählt wurden quadratdezimeterweise alle Wurzelspitzen mit einem Durchmesser kleiner 2 mm und so insgesamt die Feinwurzeln an zwei Profilwänden aufgenommen. Die maximale Durchwurzelungstiefe der Ackerfrüchte konnte, wie der LAI, aus der Literaturstudie von Breuer et al. (2003) übernommen werden.

Im Herbst 2013 wurden diese Aufnahmen wiederholt, unter Einbeziehen weiterer Kurzumtriebsplantagen auf unterschiedlichen Standorten bzw. Bewirtschaftungsvarianten. Auf dem intensiv untersuchten Löss-Standort sowie auf dem neuen flachgründigen und mageren Schotter-Standort wurden insgesamt 15 m^2 Wurzelprofil aufgenommen. Für die folgenden fünf Nutzungsvarianten liegen Durchwurzelungsintensitäten vor:

Auf dem Schotter-Standort:

- KUP auf Grünland Bestand
(Kürzel S_{GL_B} für Schotter_Grünland_Bestand)
nach fünfter Vegetationsperiode, erster Umtrieb

Auf dem Löss-Standort:

- KUP auf Grünland Bestand L_{GL_B} ,
entspricht KUP konv., nach sechster Vegetationsperiode, erster Umtrieb
- KUP auf Grünland geerntet L_{GL_E} ,
entspricht KUP konv., nach erster Vegetationsperiode, zweiter Umtrieb, also ein Jahr nach der ersten Ernte
- KUP auf Acker Bestand L_{A_B} ,
entspricht KUP biol., nach sechster Vegetationsperiode, erster Umtrieb
- KUP auf Acker geerntet L_{A_E} ,
entspricht KUP biol., nach erster Vegetationsperiode, zweiter Umtrieb, also ein Jahr nach der ersten Ernte

Auf allen Untersuchungsflächen wurden Schürfgaben angelegt, die Profile nach AG Boden (2005) angesprochen, Wurzelspitzenzählungen durchgeführt und Bodenproben für die physikalische Laboranalytik entnommen. Anhand von Stechzylinderproben wurde die Trockenrohddichte als wesentlicher Eingangsparameter zur Berechnung von Kenngrößen des Wasserhaushalts bestimmt. Die beprobten Standorte in Kaufering decken ein recht breites Standortspektrum ab. Die Untersuchungsflächen sind charakterisiert durch flachgründige Braunerden aus kalkreichem Flussschotter der Lech-Hochterrasse (»Auenpararendzina«) sowie pseudovergleyte Braunerden bis Parabraunerden aus Lösslehm.



Abbildung 7: links: TDP-Sensoren; rechts: vier TDP- (oben) und vier HRM-Sensoren (unten) parallel an einer 10 cm dicken Pappel Fotos: M. Zacios

Transpiration

Bei der Pappel ist die Transpiration wie bei vielen anderen vegetationsbedeckten Flächen die dominierende Verdunstungskomponente und hat daher besondere Bedeutung für den Wasserhaushalt. Die Modellierung der Transpiration des Pappelbestands konnte jedoch bisher nicht ohne große Unsicherheiten in den Ergebnissen abgeschlossen werden. Aus diesen Gründen sollte in der zweiten Projektphase zur Validierung die Transpiration durch die Messung des Xylem-Saftflusses im Stamm gemessen werden. Zum Einsatz kamen zwei unterschiedliche Messsysteme, Xylemflusssensoren nach GRANIER (TDP) sowie Sensoren nach der HRM-Methode (Burgess et al. 2001). Seit Mai 2013 konnten die während der Sommermonate gemessenen Saftflüsse zur Verifizierung der modellierten Transpirationsraten herangezogen werden.

Installiert wurden für den Zeitraum vom 19. Mai bis 31. Juli 2013 am Löss-Standort zunächst an zwei Bäumen mit einem Durchmesser von 10 cm jeweils vier Graniersonden (SFS2 Typ M, Firma UP GmbH) sowie vier bzw. zwei HRM-Sonden (SFM1, Firma ICT Int. PTY Limited, Australien), um die Anatomie der Pappeln (z. B. die Variabilität des Durchflusses im Stammquerschnitt) besser kennenzulernen. Ab 1. August 2013 bis zum Ende der Vegetationsperiode waren neun Sensoren an neun Bäumen mit repräsentativen Stammdurchmessern angebracht. Seit Beginn der Vegetationsperiode 2013 (Mitte Mai) wurden auf der Schotterfläche ebenfalls neun TDP-Sensoren nach GRANIER an neun repräsentativen Bäumen mit Logger und Energieversorgung installiert.

Das Versuchsdesign während der Vegetationsperiode 2014 hat sich an demjenigen der Vegetationsperiode 2013 orientiert. Von Ende Mai bis September 2014 waren auf der Löss- sowie auf der Schotterfläche, wie in Abbildung 8 zu sehen, jeweils neun TDP-Sensoren

in neun Bäumen angebracht. Die für die Messungen herangezogenen Bäume wurden anhand der Häufigkeitsverteilung der im Winter 2013/2014 erhobenen BHD ausgewählt. Diese Bäume sollen die Bandbreite der auf den jeweiligen KUP vorhandenen BHDs möglichst gut abdecken. Die sensibleren HRM-Sensoren verfügen unter anderem über zwei Messpunkte pro Messnadel und liefern so auch Informationen über die radiale Verteilung des Saftflusses im Stamm. Eine gute Kenntnis der Baumanatomie ist äußerst wertvoll, wenn die gemessenen Saftflussraten auf den gesamten Stamm umgerechnet werden. Die sechs vorhandenen HRM-Sensoren wurden paarweise aus verschiedenen Richtungen in einen Stamm mit bestimmtem Durchmesser eingebaut. Die Sensoren wurden im Laufe des Sommers mehrmals umgesetzt, um die räumliche Verteilung des Saftflusses innerhalb möglichst vieler Stämme unterschiedlicher Durchmesser zu erfassen.

Mithilfe der beschriebenen Sensoren werden die Saftflussdichten in cm^3 pro cm^2 pro Stunde am Messpunkt bestimmt. Um nun die Transpirationsleistung des gesamten Baumes berechnen zu können, ist es hilfreich, die Fläche des wasserleitenden Querschnitts der Bäume zu kennen. Zu diesem Zweck wurden zum einen bei der Erntemaßnahme im Winter 2012/2013 Stammscheiben gefällter Bäume vermessen sowie Kernbohrungen der bemessenen Bäume mithilfe eines Zuwachsbohrers durchgeführt.

Wasserhaushaltsmodell LWF-BROOK90

Der Wasserhaushalt einer Fläche definiert sich hauptsächlich über die Komponenten Niederschlag, Verdunstung sowie Versickerung. Die Niederschlagsmenge ist relativ einfach zu erfassen, anders verhält es sich jedoch mit der Transpiration und vor allem der Infiltration. Diese beiden Parameter lassen sich nur mit erheblichem technischen Aufwand bestimmen. Für



Abbildung 8: Saftflussmessungen mit TDP-Sensoren; links: Löss-Standort; rechts: Schotter-Standort

Fotos: M. Zacios

Fragestellungen zur Grundwasserneubildung sowie zu Stoffeinträgen ins Grundwasser werden deshalb oft Wasserhaushaltsmodelle zu ihrer Beantwortung herangezogen.

Das Wasserhaushaltsmodell BROOK90 (Federer 1995) ist ein deterministisches, prozessorientiertes Modell zur Beschreibung aller Komponenten der Wasserbilanz in täglicher Auflösung. Es rechnet mit einem mittleren Parametersatz, so dass es in erster Linie standortbezogen eingesetzt wird. Eingeschränkt ist es auch für kleinere homogene Einzugsgebiete (bis einige km²) anwendbar (Kennel 1998; Zimmermann et al. 2000). Im Modell BROOK90 wird zur Berechnung der Verdunstung der Widerstandsansatz nach Shuttleworth und Wallace (1985) verwendet, der eine Weiterentwicklung der Berechnung der Verdunstung nach Penman-Monteith darstellt, um in einem einschichtigen Bestand neben Transpiration und Interzeption auch die Boden evaporation berechnen zu können. Die detaillierte, physikalisch begründete Abbildung des Wasserhaushalts im Modell bedingt eine Vielzahl von Parametern.

Zur Berechnung des Wasserhaushalts sind tägliche Messwerte für den Niederschlag, die Luftfeuchte, die Windgeschwindigkeit, die Globalstrahlung sowie das Tagesminimum und -maximum der Lufttemperatur erforderlich. Der Interzeptionsverlust wird mithilfe eines einfachen Speicheransatzes, getrennt für Schneefall oder Regen, ermittelt. Die Speicherkapazität des Kronenraums ist dabei vom Blatt- und Stammflächenindex des Bestands sowie der mittleren, monatspezifischen Dauer eines Niederschlagsereignisses abhängig. Bei der Berechnung der Interzeptionsverdunstung wird der Bestandswiderstand auf null gesetzt und der aerodynamische Widerstand in Abhängigkeit von der Bestandshöhe verwendet. Eine potenzielle Transpiration wird über den Ansatz von Shuttleworth and Wallace (1985)

in Abhängigkeit von der maximalen Blattleitfähigkeit berechnet, reduziert in Abhängigkeit von Luftfeuchte, Temperatur und Strahlungstransmission. Der aerodynamische Widerstand hängt von einem saisonal veränderlichen Blattflächenindex sowie der Bestandshöhe ab. Die Boden evaporation wird durch den Bodenwassergehalt in der obersten Bodenschicht gesteuert.

Die Schneeschmelze aus der Schneedecke basiert auf dem Tagesgradverfahren und berücksichtigt die Temperatur und den Flüssigwassergehalt der Schneedecke. Der Tagesgradfaktor wird in Abhängigkeit vom Blatt- und Stammflächenindex verändert. Die Evaporation von der Schneedecke hängt von den aerodynamischen Widerständen und dem Wasserdampfgradienten ab und wird mit einem empirischen Faktor reduziert.

Der Bodenwasserfluss kann zweigeteilt als Matrix- und Makroporenfluss berechnet werden. Zunächst kann über Parameter des Makroporenflusses gesteuert werden, wie sich das infiltrierte Wasser über das Bodentiefenprofil verteilt und wie hoch der Anteil ist, der direkt als schneller Zwischenabfluss in den Makroporen dem Vorfluter zufließt. Der Anteil des Oberflächenabflusses ergibt sich aus dem Anteil der Sättigungsflächen im Einzugsgebiet. Je nach Sättigung und Hangneigung werden auch in den einzelnen Bodenschichten Lateralflüsse modelliert, die zum »Interflow« beitragen. Der Matrixfluss wird über die Darcy-Richards-Gleichung simuliert. Durch die Transpiration wird jeder Bodenschicht je nach ihrer Durchwurzelungsintensität sowie ihrem Matrixpotenzial Wasser entzogen. Die aktuelle Transpiration ergibt sich dann aus dem Minimum von potenzieller Transpiration und der Bodenwassernachlieferung, die bestimmt wird durch den Widerstand des Wasserflusses, von der Wurzelverteilung und dem Wasserpotenzial der Bodenschichten. Die Parametrisierung der Bodenwassercharakteristik $\psi = f(\Theta)$ sowie der hydrau-

lischen Leitfähigkeit $k=f(\Theta)$ erfolgt über eine modifizierte Funktion nach Mualem-Van Genuchten. Eine Grundwasserkomponente am Gesamtabfluss kann als konstanter Anteil des Grundwassers je Tag festgelegt werden, zusätzlich kann Undichtigkeit eines Einzugsgebiets berücksichtigt werden.

An der bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF) wurde zum Originalprogramm eine eigene Simulationsumgebung mit Anbindung an eine Access-Datenbank entwickelt (Hammel und Kennel 2001). Modifikationen wurden bei der Parametrisierung der bodenhydraulischen Funktionen, der Zeitschrittsteuerung und dem Wurzelwachstum durchgeführt. Da nicht alle Eingabeparameter als vor Ort gemessene Größen vorliegen, wurden für einige Parameter Schätzverfahren implementiert. Die bodenhydraulischen Funktionen werden aus Pedotransferfunktionen abgeleitet.

Mithilfe des Modells LWF-BROOK90 wurden die Komponenten des Wasserhaushalts der beiden Flächennutzungen Acker und Kurzumtriebsplantage berechnet. In dieses Modell fließen die gesammelten

Informationen ein, sowohl Informationen über Witterungsverhältnisse sowie über die Bodenverhältnisse (Korngrößenzusammensetzung, Lagerungsdichte etc.) als auch Angaben über die Pflanzenentwicklung (z. B. Blattfläche und Durchwurzelungsintensität). Zur Validierung des Modells wurden die gemessenen Bodenwassergehalte sowie der gemessene Bestandsniederschlag unter KUP herangezogen.

Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Geländeerhebungen sowie der Wasserhaushaltsmodellierung vorgestellt. Zunächst werden die Aufnahmen der Durchwurzelung besprochen, bevor auf die Bodenfeuchtdynamik unter den verschiedenen Nutzungsvarianten verglichen wird. Anschließend wird auf die Kalibrierung sowie Validierung des Wasserhaushaltsmodells eingegangen sowie die berechneten Wasserhaushaltskomponenten mit besonderem Schwerpunkt auf der Grundwasserneubildung von Acker und KUP

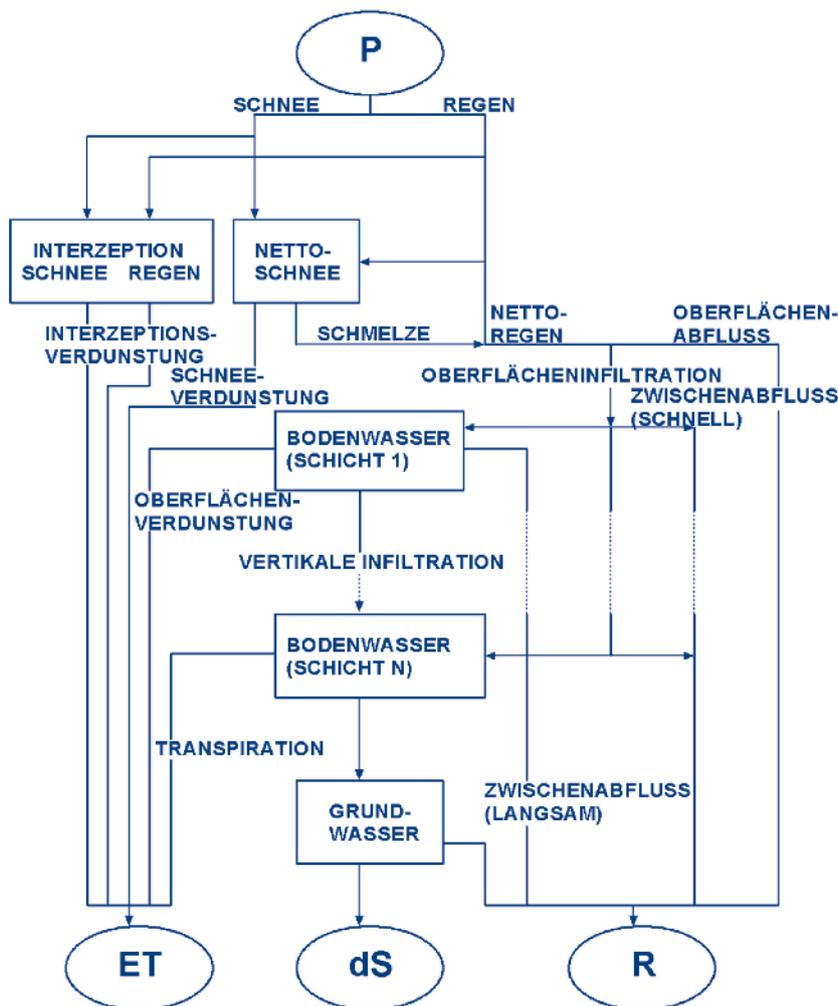


Abbildung 9:
Flussdiagramm von
BROOK90,
P: Niederschlag,
ET: Evapotranspiration,
dS: Tiefensickerung,
R: Abfluss
(SIEMENS 1998)

gezeigt. Zuletzt werden die erfassten Stoffkonzentrationen im Sickerwasser und die daraus berechneten Stoffausträge vorgestellt.

Durchwurzelung

Die Untersuchungen zur Durchwurzelungsintensität unter KUP wurden auf den zuvor beschriebenen fünf Nutzungsvarianten L_GL_B; L_GL_E; L_A_B; L_A_E sowie S_GL_B durchgeführt. Links oben in Abbildung 10 sind die Durchwurzelungsintensitäten der drei fünf bzw. sechs Jahre alten KUP-Bestände einander gegenübergestellt. Die Varianten L_GL_B sowie S_GL_B unterscheiden sich in den oberen 30 cm kaum voneinander, die Variante L_A_B sticht hier etwas hervor. Auf dieser Fläche wurde im Anlagejahr und auch später kein Herbizid aufgebracht. Die höhere Durchwurzelungsintensität könnte zum einen auf die nach wie vor noch verbreitet vorkommende Begleitvegetation zurückzuführen sein. Zum anderen wäre es möglich, dass die Pappeln auf dieser Fläche durch die größere Konkurrenz mit der Begleitvegetation in den ersten Jahren mehr Feinwurzeln ausbilden mussten

um sich ausreichend mit Wasser und Nährstoffen zu versorgen. Anzumerken ist des Weiteren, dass auf der Schotterfläche lediglich bis 70 cm Bodentiefe Wurzeln zu finden waren. Auf den Lössflächen konnten vereinzelt Wurzeln auch bis 100 cm erfasst werden. Einzelne Senkwurzeln haben, wie beim Einbau des neuen Messgrabens beobachtet, den Boden auch noch bis in größere Tiefen erschlossen.

Anders verhält es sich bei den geernteten KUP-Varianten (rechts oben in Abbildung 10). Die KUP auf Grünland ist deutlich windexponierter als die zwischen zwei weiteren KUP-Beständen liegende geerntete KUP auf Acker. Im Frühjahr nach der Ernte konnten so auf KUP_GL_E deutlich mehr Samen aus den benachbarten Flächen angeweht werden als auf KUP_A_E. Die flächendeckende Grasvegetation unter den einjährigen Trieben spiegelt sich deutlich in der Durchwurzelungsintensität bis 30/40 cm wider. Diese Tatsache muss auch bei der Modellierung des Wasserhaushalts berücksichtigt werden. Vergleicht man die beiden unteren Diagramme in Abbildung 10, wird der Unterschied ebenfalls deutlich.

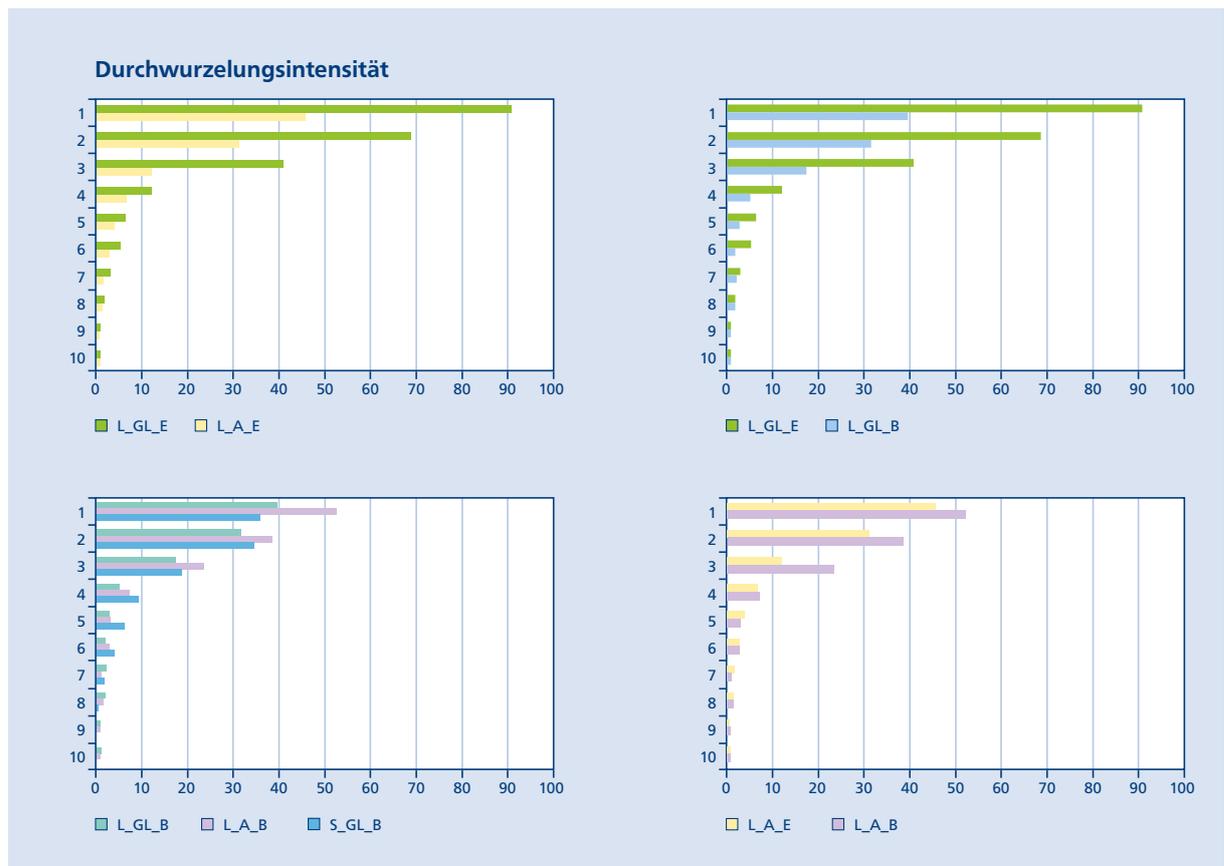


Abbildung 10: Durchwurzelungsintensitäten pro Dezimeter Bodentiefe (1–10) [Wurzelspitzen/dm²] der Standorte in Kaufering; beprobt wurden folgende Varianten: Schotter-Standort mit Vornutzung Grünland (S_GL_B), Löss-Standort mit Vornutzung Grünland (L_GL_B), Löss-Standort mit Vornutzung Acker (L_A_B), alle Beprobungen im Bestand. Dargestellt ist der mittlere Feinwurzelanteil aus allen am Standort beprobten Profilen.

In Abbildung 11 zeigt sich trotz der Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten jedoch ein deutlicher Trend. Unter allen Flächen wurden rund 70% der Wurzeln in 0–20 cm gefunden, 82–88% der Wurzeln wurden in den oberen 30 cm gezählt.

Bodenfeuchtdynamik unter KUP

Im Jahresverlauf zeigen die unter der Kurzumtriebs- plantage gemessenen volumetrischen Bodenwasser- gehalte der fünf Messtiefen deutliche Unterschiede zueinander (Abbildung 12). Naturgemäß reagieren die Bodenfeuchten in 15 cm besonders sensibel auf

die Witterungsverhältnisse. Diese direkten Reaktionen nehmen mit zunehmender Bodentiefe erwartungs- gemäß ab. Die sukzessive Erschließung des Bodens mit Wurzeln sowie der steigende Wasserbedarf der rasant wachsenden Pappeln spiegeln sich in den Messungen wider. Im Herbst 2009 ist der Wasserentzug während der Vegetationsperiode bis 115 cm Tiefe zu erkennen. 2010 gehen die Bodenfeuchten bereits bis in 160 cm, analog zu den darüber liegenden Tiefen, etwas zurück. Ab 2011 ist auch in dieser Tiefe eine deutliche und lang anhaltende Senkung der Bodenwassergehalte er- reicht worden, welche sich analog sogar bis in 220 cm

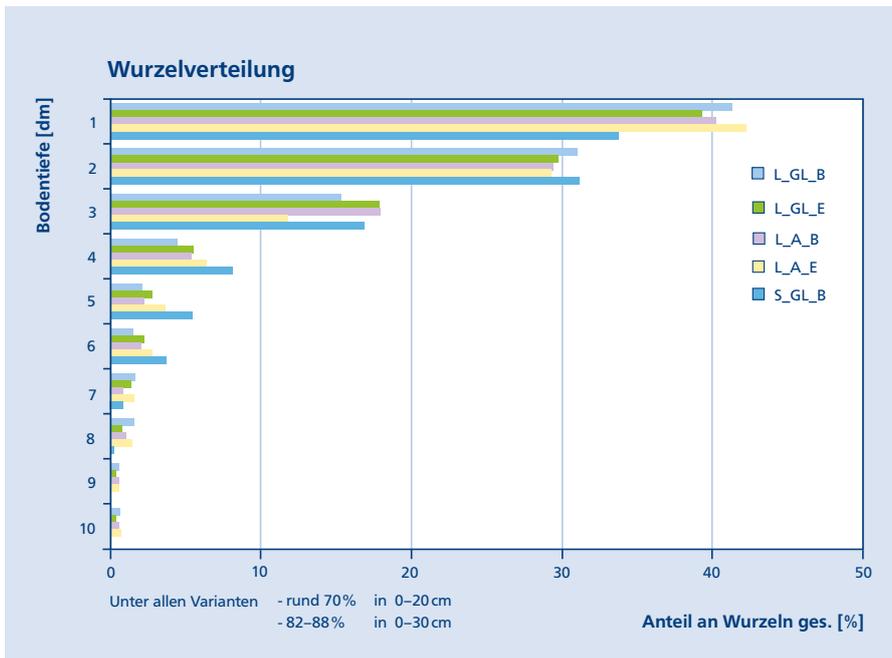


Abbildung 11: Verteilung der Wurzeln mit der Bodentiefe [%] aller Varianten

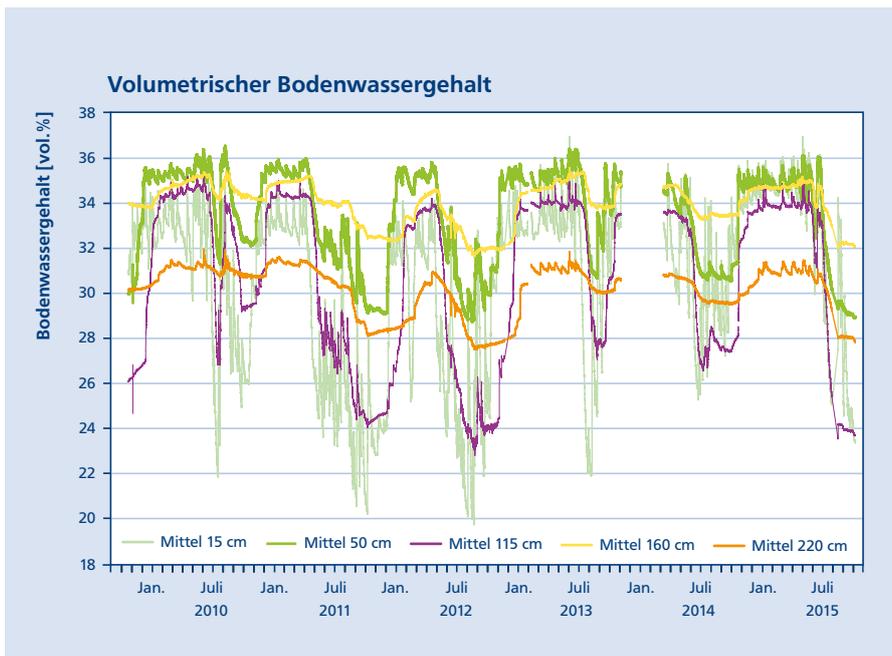


Abbildung 12: gemessener volumetrischer Bodenwassergehalt [%] unter KUP; Tiefen 15, 50, 115, 160, 220 cm; 10/2009 – 10/2015

Tiefe nachvollziehen lässt. Von einer Wasseraufnahme durch die Pflanze ist in diesen Tiefen allerdings bei gegebenen Standortbedingungen nicht auszugehen, wahrscheinlicher ist der Wasserentzug durch kapillaren Aufstieg. Klar zu erkennen ist auch die zeitlich verzögerte Wiederbefeuchtung des Bodens mit zunehmender Tiefe. Im Jahr nach der ersten Ernte (2013) liegen die minimalen Bodenfeuchten aus allen Tiefen in etwa auf dem Niveau vom dritten Jahr nach Anlage der KUP 2010. Mit zunehmendem Alter des zweiten Umtriebs wird auch der Bodenwasserspeicher wieder bis in größeren Bodentiefen genutzt.

Pappeln und auch Weiden haben einen verhältnismäßig hohen Wasserbedarf, welcher die Grundwasserspende unter KUP verglichen mit einjährigen Ackerkulturen reduziert. Für diesen erhöhten Wasserbedarf sind im Wesentlichen folgende vier Bedingungen verantwortlich:

Die längere Vegetationsperiode der Bäume: Während der Acker bereits im Hochsommer abgeerntet ist, verbrauchen die Bäume noch bis in die Herbstmonate hinein das im Boden gespeicherte Wasser.

Die größere Blattfläche der Bäume: Sie ist die treibende Kraft für die erhöhte Transpiration.

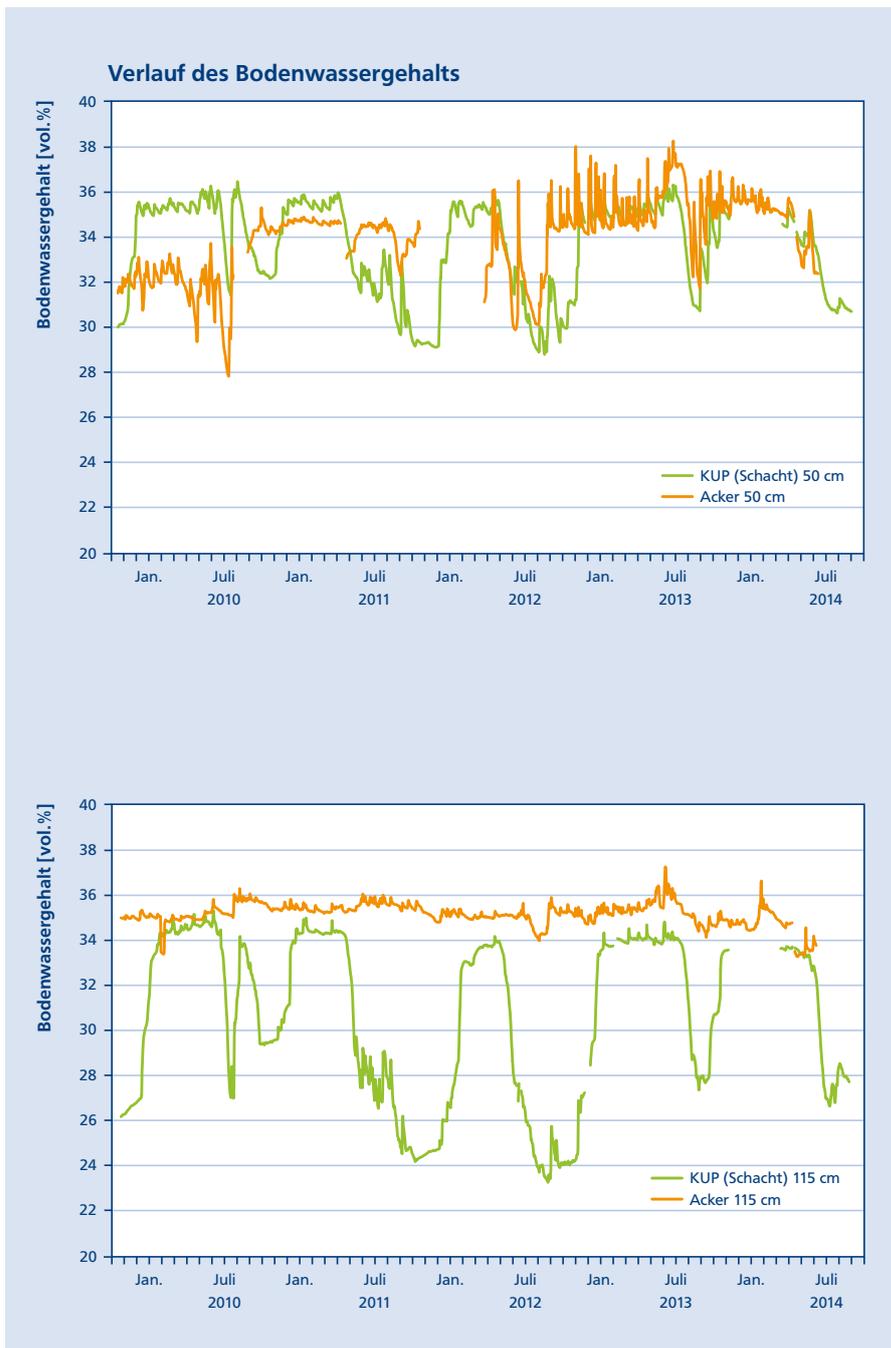


Abbildung 13: Verlauf des Bodenwassergehalts [Vol.-%] unter KUP (grün) und Acker (orange) in 50 cm Bodentiefe; deutlich ist die frühere Auffüllung des Bodenwasserspeichers unter Acker in den Spätsommer/Herbstmonaten zu erkennen.

Abbildung 14: Verlauf des Bodenwassergehalts [Vol.-%] unter KUP (grün) und Acker (orange) in 115 cm Bodentiefe; deutlich ist die tiefere Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers unter KUP im Vergleich zu den einjährigen Ackerkulturen zu erkennen.

Die tiefere Erschließung des Bodens über die mehrjährigen Wurzelstöcke: Besonders in größeren Tiefen wird dem Boden so mehr Wasser entzogen und es bedarf, abhängig vom Standort, einer verhältnismäßig längeren Zeitspanne, bis der Bodenwasserspeicher im Herbst wieder gefüllt ist und Grundwasserneubildung stattfinden kann (Abbildung 14).

Das schnelle Wachstum der KUP-Bäume: Für die rapide Biomasseproduktion wird viel Wasser benötigt.

Die Unterschiede in der Länge der Vegetationsperiode sind besonders deutlich an der schnelleren Wiederbefüllung des Bodenwasserspeichers unter einjährigen Kulturen aus Abbildung 13 ersichtlich. Hier ist die gemessene Bodenfeuchte in 50 cm unter den beiden Kulturen dargestellt. In den Herbstmonaten dauert es unter KUP deutlich länger, bis der Bodenwasserspeicher wieder Feldkapazität erreicht hat.

Besonders deutlich wird der Unterschied im Wasserverbrauch zwischen Ackerkulturen und Pappelplantagen an den Bodenfeuchten in 115 cm Tiefe (Abbildung 14). Während in dieser Tiefe unter Acker, wenn überhaupt, lediglich geringe Bodenfeuchterückgänge in den Hochsommermonaten zu verzeichnen waren, zeigt die Bodenfeuchte unter Pappeln hier noch einen sehr deutlich ausgeprägten Jahresgang. Die Boden-austrocknung im Jahr nach der ersten Ernte kann in dieser Tiefe mit jener 2010, also im dritten Jahr nach Anlage der KUP verglichen werden. Die Zeitspanne, in der eine Senkung des Bodenwasservorrats zu verzeichnen war, ist jedoch witterungsbedingt deutlich kürzer als 2010, so dass in diesem Jahr mit größeren Sickerwassermengen zu rechnen ist.

Vergleich KUP verschiedener Umtriebszeiten

In Abbildung 15 sind schließlich die zwischen Juli 2013 und September 2015 im neuen Messgraben erfassten Bodenfeuchten jenen des seit 2009 bestehenden Messschachts gegenübergestellt. Der Messschacht (hellgrüne Linie) befindet sich unter dem im Januar 2013 geernteten und wieder neu ausgetriebenen Teilbestand der KUP, der Messgraben liegt im »Altbestand« der KUP unter sechsjährigen (2013) bis achtjährigen (2015) Pappeln. Die Messtiefen entsprechen mit 15, 50, 115 sowie 160 cm jenen des Schachts. In 15 cm scheint die geerntete KUP-Fläche den Boden etwas stärker auszutrocknen (Abbildung 15, links oben). Diese Beobachtung passt sehr gut mit den ermittelten Durchwurzelungsintensitäten der beiden Flächen zusammen (Abbildung 10 unten links, L_GL_B und L_GL_E). In dieser Tiefe könnte der erhöhte Wasserentzug auf der geernteten Fläche vor allem durch die flächendeckende Begleitvegetation bedingt worden

sein. In 50 cm Bodentiefe (Abbildung 15, rechts oben) ist unter den beiden Nutzungsvarianten auf den ersten Blick kein größerer Unterschied im Wasserentzug zu erkennen. Betrachtet man nun den Bodenfeuchteverlauf in 115 cm in Abbildung 15 links unten, ist zu erkennen, dass im Hochsommer der Boden unter der geernteten Fläche wiederum etwas trockener wird als unter dem »Altbestand«. In 160 cm Bodentiefe (Abbildung 15 rechts unten) verhält es sich genau anders herum. Dies kann auf die leicht abweichenden Unterschiede in den Bodenarten der beiden Messstandorte zurückzuführen sein. In 115 cm ist der Boden unter dem Altbestand im Vergleich zur geernteten Fläche etwas schluffiger, dafür weniger sandig. In 160 cm wiederum ist der Boden unter dem Altbestand deutlich sandiger. Die Pappeln im »Altbestand« mit einem mittleren BHD von 8 bis 10 cm scheinen dem Boden in 160 cm Bodentiefe deutlich Wasser zu entziehen, wohingegen sich der Wasserentzug des geernteten Bestands auf die darüber liegenden Bodenschichten zu konzentrieren scheint.

Transpiration

Im Folgenden sollen nur beispielhaft die berechneten Transpirationsraten [l/Tag] zweier Bäume (L5 und L4) mit unterschiedlichem Brusthöhendurchmesser (BHD 14 bzw. 9,5 cm) gezeigt werden. Abbildung 16 zeigt die Kernbohrungen durch die zwei bemessenen Bäume (L5 oben; L4 unten). An der dunklen Färbung des Stamminneren ist das Kernholz deutlich zu erkennen. Lediglich im helleren, äußeren Bereich (Splintholz) findet Saftfluss statt. Die Unterschiede zwischen den Bäumen aber auch innerhalb des Stammes zwischen den Windrichtungen sind deutlich zu erkennen. Die aus den Kernbohrungen aller bemessenen Bäume erhaltenen Informationen werden zur Bestimmung der Transpirationsraten für den gesamten Baum aus den Punktmessungen verwendet.

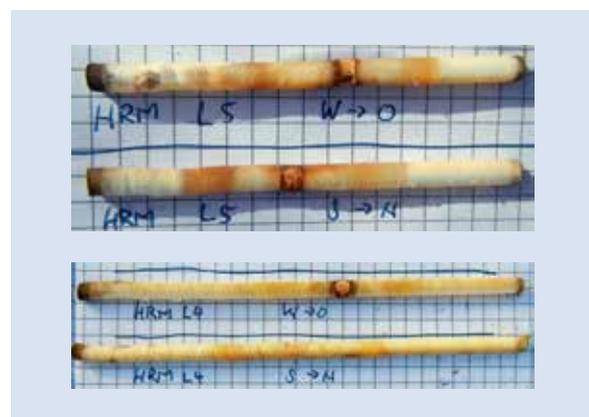


Abbildung 16: Kernbohrungen durch die Bäume L4 mit BHD 14 cm (unten) sowie L5 9,5 cm (oben) Foto: M. Zacios

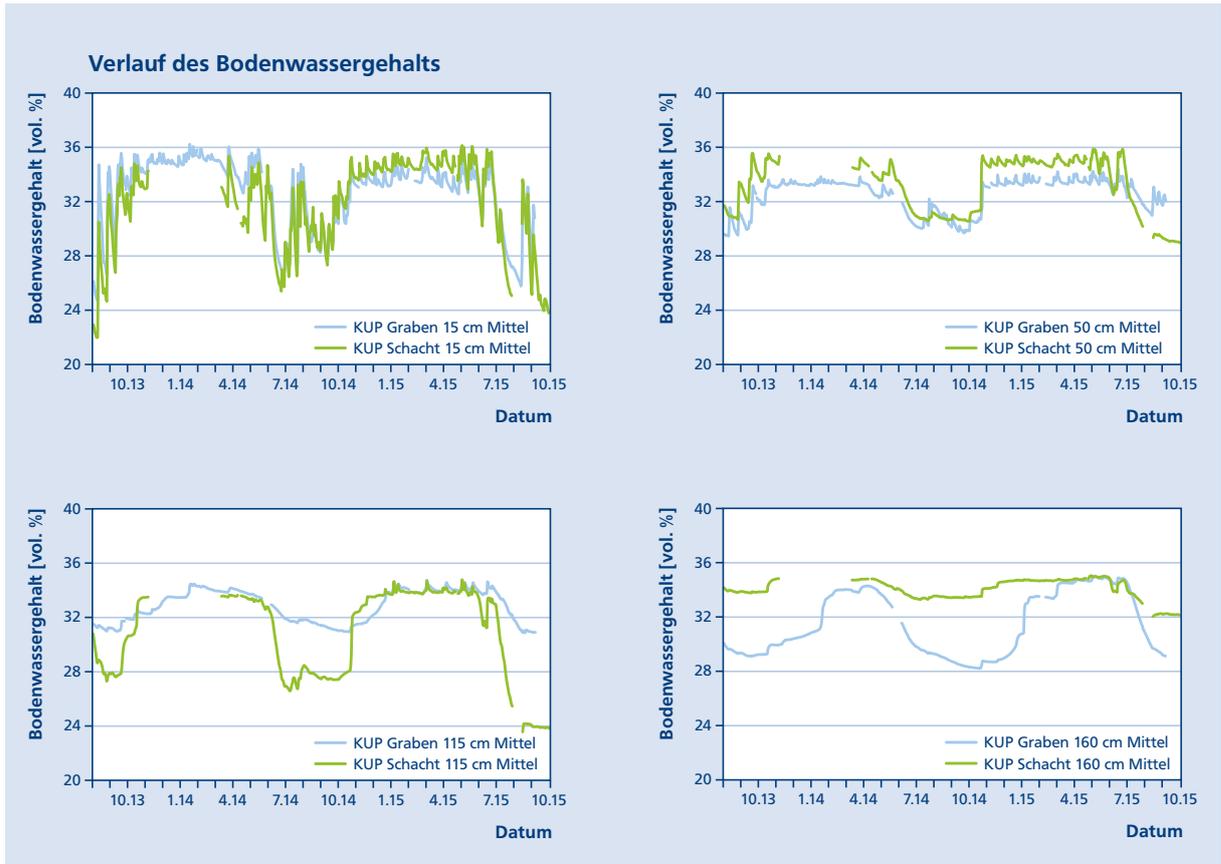


Abbildung 15: Verlauf des Bodenwassergehalts [vol. %] unter KUP erstmals geerntet Winter 2012/2013 (grün) und KUP im ersten Umtrieb 6- bis 8-jährig (blau); Zeitraum: Juli 2013 bis September 2015; 15 cm Bodentiefe (links oben); 50 cm Bodentiefe (rechts oben); 115 cm Bodentiefe (links unten) sowie 160 cm Bodentiefe (rechts unten)

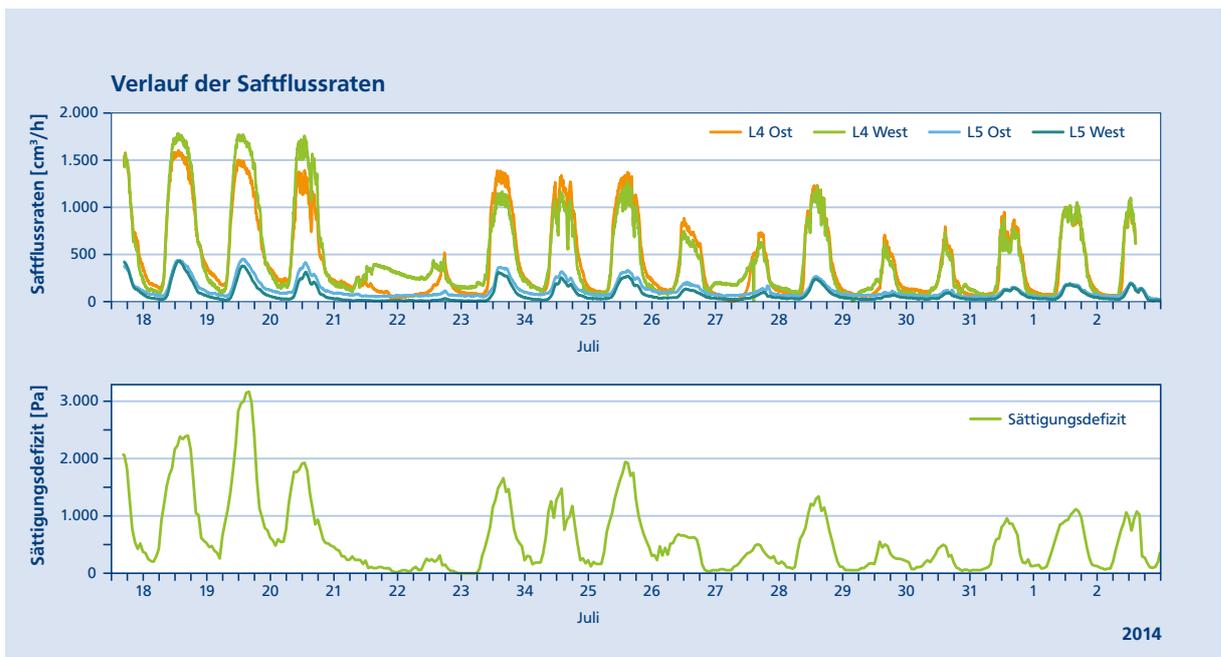


Abbildung 17: (oben) Saftflussraten [cm³/Stunde] der Bäume L4 mit BHD 14 cm sowie L5 9,5 cm jeweils im Westen und Osten des Stammes; (unten) Sättigungsdefizit (Pa)

In Abbildung 17 sind die aus den Messungen berechneten Saftflussraten für den Zeitraum vom 18. Juli bis 2. August 2014 einander gegenübergestellt. L5 zeigt erwartungsgemäß auf den gesamten Stamm berechnet deutlich geringere Saftflussraten von im Maximum $500 \text{ cm}^3/\text{Stunde}$, wohingegen L4 maximale Raten von über $1.600 \text{ cm}^3/\text{Stunde}$ besonders zu Beginn der dargestellten Zeitreihe aufweist. Vergleicht man nun den Verlauf des Sättigungsdefizits des Wasserdampfdrucks in Abbildung 17 unten mit jenem der Saftflussraten ist ein deutlicher Zusammenhang zwischen beiden zu erkennen. Dies zeigt auch den direkten Zusammenhang zwischen gemessenem Xylemfluss und Transpiration. Neben der aktuellen Globalstrahlung und den Windverhältnissen ist das Sättigungsdefizit der Luft eine zentrale Steuergröße für die Transpiration. Das Sättigungsdefizit wird berechnet aus der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur und beschreibt die Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck zum aktuell vorhandenen Wasserdampfdruck in der Luft, also

wie viel die Luft noch an zusätzlichen Wasserdampf aufnehmen kann. Neben dem Sättigungsdefizit spielen aber auch die Globalstrahlung (über Blatttemperatur) und der Wind (Feuchtigkeitsaustausch) eine Rolle für die Transpiration.

Wasserhaushaltsmodellierung

Bevor die für Acker und KUP berechneten Wasserbilanzen sowie die Grundwasserneubildungsraten dargestellt werden können, wird an dieser Stelle zunächst die Kalibrierung sowie Validierung des Wasserhaushaltsmodells und somit kurz auf die Modellgüte eingegangen.

Die beschriebenen gemessenen Bodenfeuchten wurden zur Kalibrierung des Bodenwasserhaushaltsmodells LWF-BROOK90 verwendet. In den folgenden Abbildungen ist der berechnete Bodenwassergehalt über das gesamte Bodenprofil in mm dem aus den Messungen ermittelten gegenüber gestellt (für KUP in Abbildung 18, für Acker in Abbildung 19). Zusätzlich

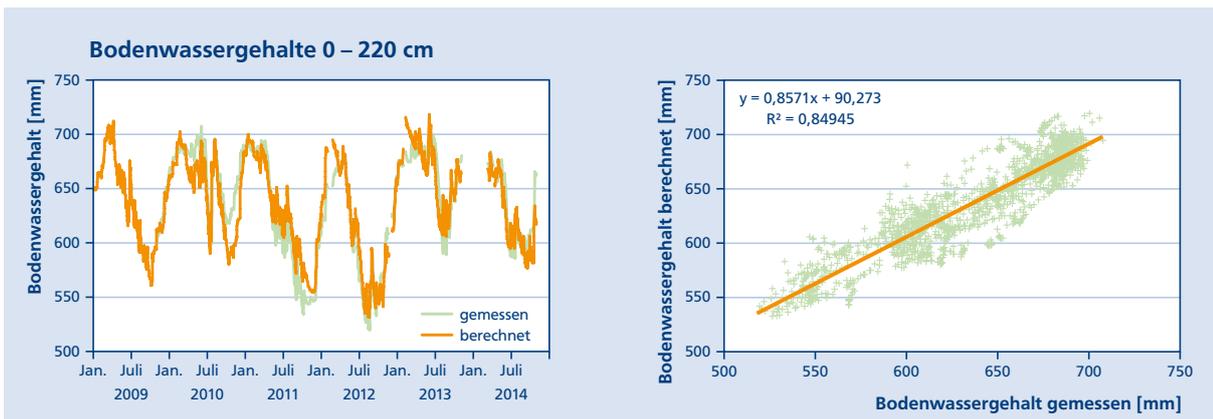


Abbildung 18: links: Bodenwassergehalte im Hauptwurzelbereich der KUP 0–220 cm gemessen (grün) und berechnet (orange); rechts: gemessene vs. berechnete Bodenwassergehalte.

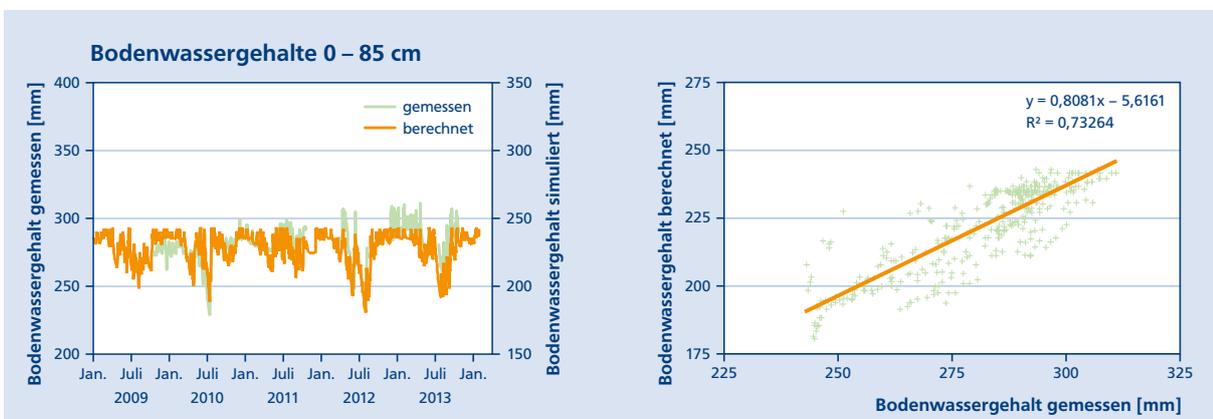


Abbildung 19: links: Bodenwassergehalte im Hauptwurzelbereich des Ackers 0–85 cm gemessen (grün) und berechnet (orange); rechts: gemessene vs. berechnete Bodenwassergehalte

sind die Korrelationskoeffizienten der jeweiligen Zeitreihen zueinander dargestellt (gleiche Abbildungen jeweils rechts). Mit einem zufriedenstellenden Endstand konnte die Berechnung der Bodenfeuchtedynamik der KUP-Fläche abgeschlossen werden ($R^2 = 0,85$). Ausgenommen einiger weniger Wiederbefeuchtungsphasen sowie den maximalen Austrocknungen des Bodens konnte die Bodenwasserdynamik mit dem Modell sehr gut nachvollzogen werden.

Etwas weniger gut aber immer noch zufriedenstellend gelang die Modellkalibrierung auch auf der Ackerfläche ($R^2 = 0,73$). Die Parametrisierung für den Acker war nicht ganz trivial, da LWF-BROOK90 schwerpunktmäßig zur Berechnung von Waldbeständen konzipiert wurde und deshalb entsprechende Anpassungen z. B. in der Dynamik des Wurzelwachstums angestellt werden musste. Mithilfe der 2012 zusätzlich installierten Bodenfeuchtesensoren in 5 und 30 cm konnte jedoch eine deutliche Verbesserung der Modellgüte erreicht werden.

Validierung der modellierten Interzeption über die gemessene Kronentraufe sowie den Stammabfluss

Unter dem Bestandsniederschlag wird im Allgemeinen der Niederschlag verstanden, welcher unterhalb der Baumkronen bzw. in diesem Fall, unterhalb der Ackerfrucht auf den Boden gelangt. Er ergibt sich also aus der Differenz zwischen Freilandniederschlag und den Interzeptionsverlusten. In den Abbildungen 20 und 21 sind der aus den Klimastationsdaten ermittelte Freilandniederschlag, der über die Bestandsrinnen erfasste Bestandsniederschlag unter KUP (BS-NS), die modellierte Interzeption (INTmod) sowie die Summe aus gemessenem Bestandsniederschlag und modellierter Interzeption (BS-NS+INTmod) jeweils kumuliert für die Zeiträume November 2009 bis Mai 2012 bzw. für das hydrologische Jahr 2014 einander gegenübergestellt. Der Vergleich des Freilandniederschlags mit der Summe des gemessenen Bestandsniederschlags und der modellierten Interzeption bietet eine gute Möglichkeit die Berechnungen der Interzeption zu validieren. Diese beiden Kurven verlaufen erfreulich parallel, die Interzeption wird im Modell also zufriedenstellend nachvollzogen. Der Vergleichbarkeit halber werden hier diejenigen Zeiträume aufgetragen, für die korrekte Bestandsniederschlagsmessungen unter KUP zur Verfügung standen. Die Lücken begründen sich durch Messausfälle beispielsweise bedingt durch das Einfrieren der Wippe in den Wintermonaten. Der in der Summe am Ende des Messzeitraums festgestellt Unterschied beläuft sich auf 100 mm für die erste Periode von 2,5 Jahren und auf 30 mm für das Jahr 2014. Die

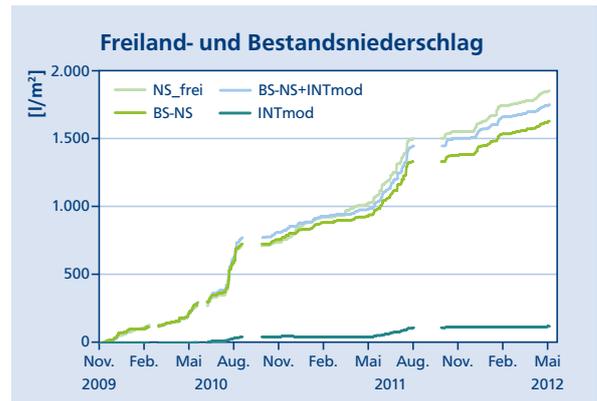


Abbildung 20: Niederschlag (NS_frei), Summe aus gemessenen Bestandsniederschlag und berechneter Interzeption (BS-NS+INTmod); Bestandsniederschlag (BS-NS) sowie berechnete Interzeption (INTmod) jeweils in mm kumuliert für den Zeitraum November 2009 bis Mai 2012

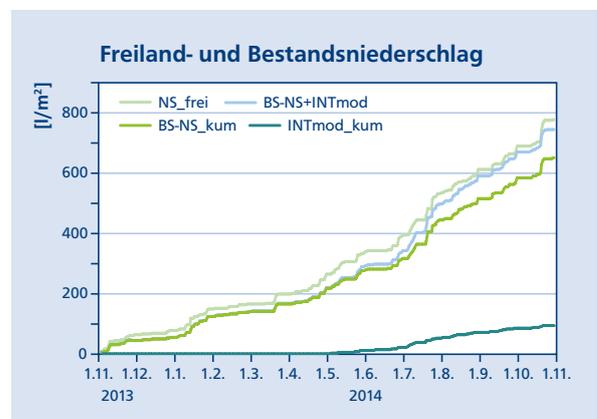


Abbildung 21: Niederschlag (NS_frei), Summe aus gemessenem Bestandsniederschlag (nur Kronentraufe) und berechneter Interzeption (BS-NS+INTmod); Bestandsniederschlag (BS-NS) sowie berechnete Interzeption (INTmod) jeweils in mm kumuliert für das hydrologische Jahr 2014 (Zeitraum November 2013 bis Oktober 2014)

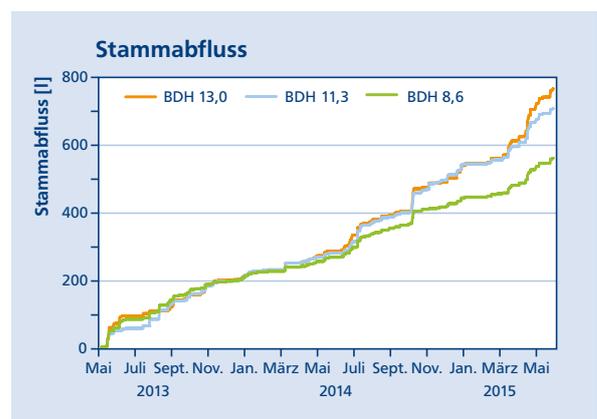


Abbildung 22: Stammabfluss an drei Bäumen mit BHD 8,6 – 11,3 – 13 cm; kumulierte Summen für den Zeitraum Mai 2013 bis Mai 2015

modellierter Interzeption kann aufgrund dieser geringe Unterschiede als realistisch eingestuft werden.

Seit Mai 2013 wird an drei Bäumen mit den Brusthöhendurchmessern (BHD im Herbst 2014) von 8,6 cm sowie 11,3 und 13 cm der Stammabfluss erfasst. Die Summen des am Stamm entlang dem Boden zugeführten Niederschlagswassers sind wie aus den in Abbildung 22 dargestellten kumulierten Summen für den bemessenen Zeitraum von Mai 2013 bis Mai 2015 keinesfalls vernachlässigbar. Sie belaufen sich in der Summe dieser zwei Jahre auf 560 bis 770 Liter. Werden diese Werte über die Häufigkeitsverteilung der BHDs gewichtet auf den gesamten Bestand verrechnet, ergibt sich für das hydrologische Jahr 2014 ein Stammabfluss von 110 l/m², welcher dem Bodenwasserspeicher zugeführt wird. Dieser Stammabfluss wird momentan noch nicht in der Modellierung berücksichtigt, erklärt jedoch zu einem gewissen Grad die Differenz zwischen dem Freilandniederschlag und der Summe aus Kronentraufe und modellierter Interzeption.

Validierung der modellierten Transpiration – erste Ergebnisse

Die während den Vegetationsperioden 2013 und 2014 an sechs- bzw. siebenjährigen Bäumen ermittelten Saftflussraten sollen zur Validierung der berechneten Transpirationsraten herangezogen werden. In Abbildung 23 sind die während einer Vorstudie an einer 9 cm starken Pappel ermittelten Transpirationsraten aufgetragen. Die aus den vier verschiedenen Himmelsrichtungen (Nord, Ost, Süd, West) gemessenen Saftflussraten wurden für den jeweils aus den Kernboh-

rungen für die Himmelsrichtung ermittelten leitenden Querschnitt auf den gesamten Baum hochgerechnet und auf die Modellausgangsgröße von 1 m² bezogen. In Abbildung 23 sind die Unterschiede in den so ermittelten Transpirationsraten deutlich zu erkennen. Im Osten des Stammes wird demzufolge deutlich weniger Wasser transportiert als in den übrigen Bereichen des Stammes. Der zeitliche Verlauf sowie die mittleren mit dem Wasserhaushaltsmodell berechneten Transpirationsraten zeigen eine zufriedenstellende Übereinstimmung. Für den Zeitraum 20. Mai bis 29. Juni 2013 wurden aus den Messungen im Mittel Tagessummen der Transpiration von 2,36 l/m² ermittelt, die modellierten mittleren Tagessummen belaufen sich auf 2,51 l/m². Die Gesamtsumme transpirierten Wassers von 941 l/m² aus den Messungen für den gleichen Zeitraum steht einer modellierten Transpiration von 1001 l/m² gegenüber und zeigt auch hier zufriedenstellende Übereinstimmung mit den Modellberechnungen. Die für die Modellierung gefundenen, die Transpiration bestimmenden Pflanzenparameter wie beispielsweise die maximale Blattleitfähigkeit, können anhand dieser Daten als plausibel eingestuft und somit die berechnete Transpiration als realistisch angenommen werden.

Die Daten aus den Sommern 2013 sowie 2014 werden im Rahmen des KLIP11-Nachfolgeprojekts N7 (seit November 2015) mit dem Schwerpunkt auf der Grundwasserspende sowie dem Wasserverbrauch der Pappeln tiefergehend analysiert sowie bewertet werden können. Besonderer Schwerpunkt wird hier auf der Hochrechnung der punktuellen Messungen an Bäumen der unterschiedlichen BHDs sowie den unter-

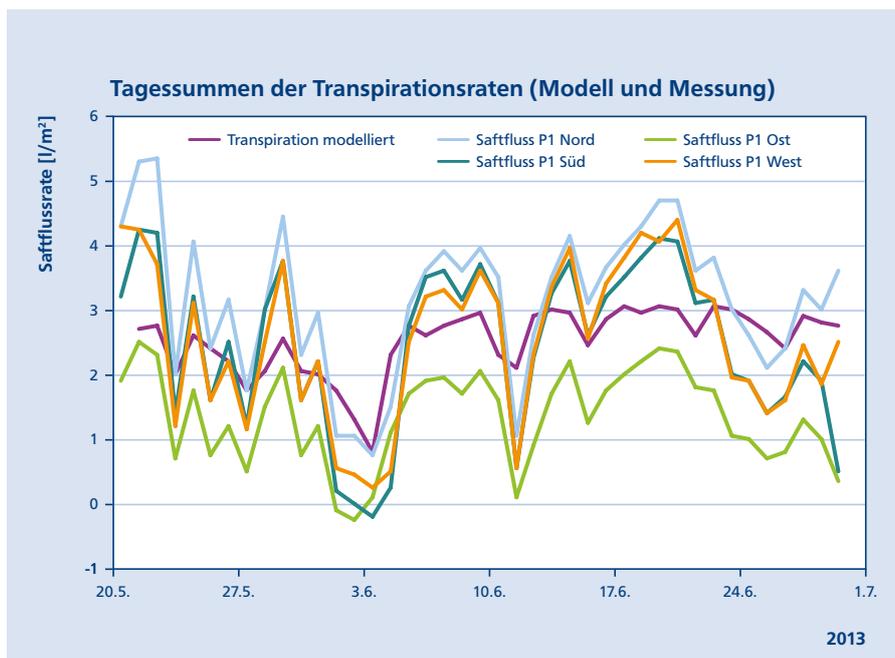


Abbildung 23: Tagessummen gemessener Transpirationsraten [l/m²] einer 6-jährigen Pappel mit BHD = 9 cm (Nord-Ost-Süd-West) sowie modellierter Transpiration [l/m²] für den Zeitraum von 20. Mai bis 29. Juni 2013

schiedlichen Standorten auf den Bestand liegen. Auch für den Schotter-Standort wird dann eine Validierung der Modellberechnungen möglich sein.

Wasserbilanzen KUP und Acker

Eine KUP entwickelt sich bedeutend schneller als ein Waldbestand, da vorzugsweise Baumarten mit rasantem Jugendwachstum angebaut werden. Innerhalb von sieben Jahren hat sich aus einem bracheähnlichen Zustand mit 1–2m hohen Trieben ein Niederwald mit beträchtlichen Baumhöhen von im Mittel 12m nach der siebten Vegetationsperiode entwickelt. Entsprechend dynamisch verhält sich auch der Wasserhaushalt einer KUP. Dieser wird neben dem Bewirtschaftungsstadium auch von den Witterungsverhältnissen während des Jahres beeinflusst. Zur besseren Interpretierbarkeit sollen an dieser Stelle nochmals die Witterungsverhältnisse im Modellierungszeitraum in Erinnerung gerufen werden. 2010 und 2013 waren mit 1.000 bzw. 1.007mm relativ niederschlagsreiche Jahre wohingegen im warmen Jahr 2012 mit 884mm sowie im Jahr 2014 mit 776mm deutlich weniger Niederschlag als im langjährigen Mittel (970mm) zur Verfügung standen.

Auf Basis der oben beschriebenen Informationen zu Pflanzenparametern (Durchwurzelung, Blattfläche) sowie den gemessenen hydrologischen Größen (Niederschlag, Transpiration, Bodenwassergehalt) konnten mit dem so angepassten bodenhydrologischen Modell LWF-BROOK90 die Wasserbilanzen der KUP- sowie

der Ackerfläche für die hydrologischen Jahre (jeweils Oktober bis November) 2010 bis 2013 (Acker) bzw. bis 2014 (KUP) berechnet werden. Für die Jahre 2013 und 2014 wurden auf der KUP-Fläche zwei Varianten berechnet, einmal mit frisch geernteten Bestand (E) und einmal mit sechs- bzw. siebenjährigem Bestand (B). Diese Ergebnisse sowie die unterschiedlichen Einflüsse von Flächennutzung bzw. Bestandsalter sollen im Folgenden besprochen werden.

Einfluss der Flächennutzung auf die Wasserbilanz

Bevor auf die Wasserbilanzen der beiden Landnutzungsformen eingegangen wird, werden zunächst die Evapotranspiration als Summe aus Transpiration, Interzeption sowie die Bodenevaporation und anschließend die berechnete Grundwasserneubildung von Kurzumtriebsplantagen und Acker separat besprochen.

Der größte Unterschied zwischen den beiden Landnutzungsformen liegt erwartungsgemäß im Wasserbedarf der beiden Kulturen. Neben den Jahresniederschlägen, also dem Wasserdargebot spiegeln sich auch andere klimatische Gegebenheiten besonders während der Vegetationsperiode wie Sommertemperaturen und Sättigungsdefizit der Atmosphäre im Wasserbedarf aller Kulturen wider. In Abbildung 24 sind die berechneten Summen der Evapotranspiration in Litern pro Quadratmeter für Acker (orange) sowie Kurzumtriebsplantagen (grün) aufgetragen. Für die Ackerfläche wurden Summen der Evapotranspiration zwischen 530mm im Jahr 2010 und 610mm im Jahr 2011 berechnet. Sie liegen damit rund 200mm niedriger

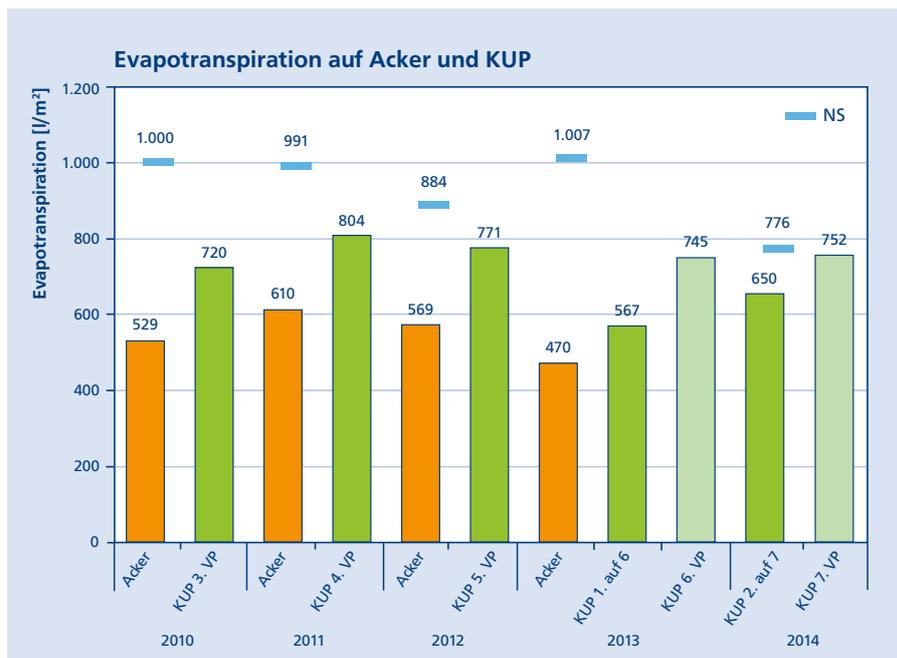


Abbildung 24: Evapotranspiration (Summe aus Transpiration, Interzeption, Bodenevaporation) [l/m²] unter Kurzumtriebsplantagen (grün) und Acker 2010–2014 (orange); Jahressumme Niederschlag [l/m²] (blau).

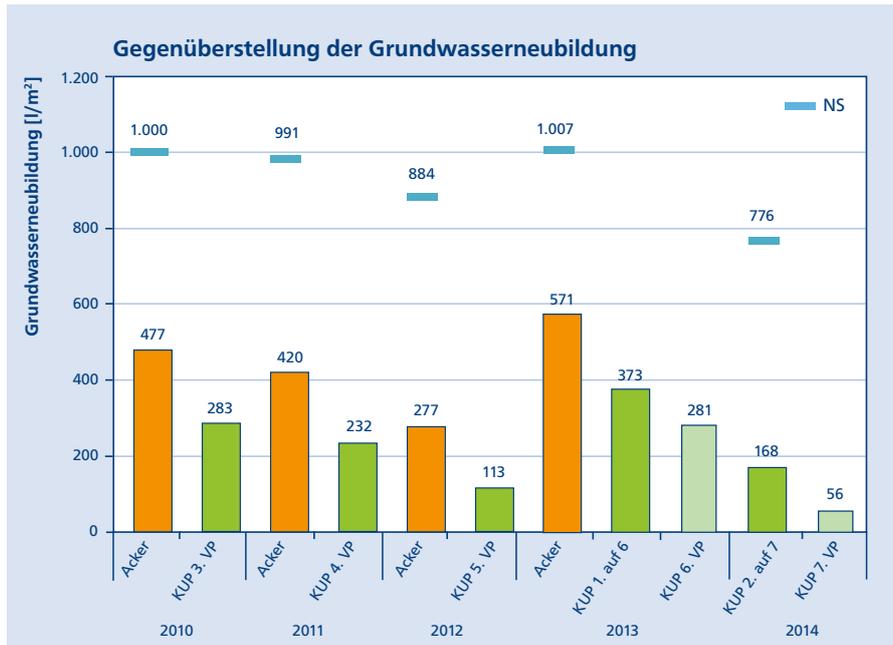


Abbildung 25: Grundwasserneubildung (GWN) [l/m²] unter KUP (grün) und Acker 2010–2013 (orange); Jahressumme Niederschlag [l/m²] (blau).

als die für die 3. bis 5. Vegetationsperiode der Pappeln (2010 bis 2012) berechneten Summen von 720 bis 804 mm. Etwas differenzierter sind hier die unterschiedlichen Bewirtschaftungsstadien der Kurzumtriebsplantagen ab dem Jahr 2013 zu betrachten. Liegt die Gesamtverdunstung der frisch geerntete KUP (E) nur knapp 100 mm über jener des Ackers so weist der sechsjährige Bestand (B) mit 745 mm einen um rund 275 mm höheren Wasserverlust auf als die Ackerfläche mit 470 mm.

Die Grundwasserneubildung wird maßgeblich durch die dargelegten Prozesse und damit einhergehend auch von den Witterungsverhältnissen bestimmt. Die berechnete Grundwasserneubildung (GWN) von Acker und Kurzumtriebsplantagen während des Untersuchungszeitraums sind in Abbildung 25 einander gegenübergestellt. Abhängig von den Witterungsbedingungen des Betrachtungszeitraums liegt die Grundwasserneubildung unter Acker zwischen 277 mm im trockenen Jahr 2012 und 571 mm im kühlen, niederschlagsreichen Jahr 2013. Die GWN unter Kurzumtriebsplantagen schwankt im gleichen Zeitraum zwischen 113 mm (2012) und 373 bzw. 281 mm unter dem geernteten bzw. dem sechsjährigen Bestand. Aus diesen Ergebnissen ergibt sich eine Reduktion der Grundwasserneubildung um 160 mm im fünfjährigen Bestand (2012) bis 290 mm im sechsjährigen Bestand 2013. Die KUP-Bewirtschaftung bewirkt je nach Bestandsalter und Witterungsverhältnissen eine Reduktion der Grundwasserneubildung von 35 bis 60 % gegenüber einjährigen Ackerkulturen. Im Mit-

tel liegt die Grundwasserneubildung unter dem Acker im Untersuchungszeitraum 2010 bis 2013 bei 436 mm, unter Kurzumtriebsplantagen beträgt sie 250 mm im fünfjährigen Umtrieb bzw. 216 mm unter dem 2013 sechsjährigen Bestand. Dies entspricht einer mittleren Abnahme der Grundwasserneubildung von 43 bzw. 51 % unter KUP.

Die Wasserbilanzen der Jahre 2010 bis 2013 sind für KUP in Abbildung 26, für Acker in Abbildung 27 dargestellt. Gezeigt werden jeweils Interzeption (Modellbezeichnung in LWF-BROOK90: INT), Transpiration (Modellbezeichnung TRAN), Bodenverdunstung (Modellbezeichnung SLVP), Grundwasserneubildung (GWN) sowie die Änderung im Bodenwasserspeicher (Modellbezeichnung BS) jeweils anteilig am Jahresniederschlag [%]. Mit Anteilen zwischen 23 und 50 % des Jahresniederschlags fällt die Transpiration (TRAN) als dominierende Größe des modellierten Wasserhaushalts der KUP auf (Abbildung 26). In allen Jahren liegen die transpirierten Wassermengen deutlich über jenen der Ackerfläche mit Werten zwischen 20 % (2013) und 32 % (2012). Die Interzeption (INT), also die Verdunstung des Niederschlagswassers von der Pflanzenoberfläche, auf dem Acker unterscheidet sich nicht deutlich zwischen den Jahren (Abbildung 27). Diejenige der KUP hingegen nimmt analog zur maximalen Blattfläche der Pappeln mit zunehmendem Alter zu und liegt mit Ausnahme des frisch geernteten Bestands 2013 durchgehend über jener der Ackerfläche. Durch die bewirtschaftungsbedingt längeren Phasen offenliegenden Bodens ist die Verdunstung



Abbildung 26: Wasserbilanzen unter KUP auf dem Löss-Standort; Interzeption (INT), Transpiration (TRAN), Bodenverdunstung (SLVP), Grundwasserneubildung (GWN) sowie die Änderung im Bodenwasserspeicher (BS) jeweils Anteil am Jahresniederschlag [%]



Abbildung 27: Wasserbilanzen unter Acker auf dem Löss-Standort; Interzeption (INT), Transpiration (TRAN), Bodenverdunstung (SLVP), Grundwasserneubildung (GWN) sowie die Änderung im Bodenwasserspeicher (BS) jeweils Anteil am Jahresniederschlag [%]

von der Bodenoberfläche (Modellbezeichnung SLVP) auf Acker gegenüber der KUP durchschnittlich etwas erhöht. Vor allem die mit zunehmendem Alter und maximalem LAI der KUP steigenden Transpirationsraten gehen deutlich zu Lasten der Sickerwassermengen (GWN). Werden auf dem Acker Anteile am Jahresniederschlag von 31% im Jahr 2012 bis 57% im Jahr 2013 dem Grundwasser zugeführt sind es unter den Pappeln nur 13% (2012) bis 37% im geernteten Bestand 2013. Auf die Unterschiede zwischen den beiden Bewirtschaftungsstadien der KUP soll im Folgenden genauer eingegangen werden.

Einfluss des Bestandsalters auf die Wasserbilanzen

Für die Jahre 2013 sowie 2014 wurden die Wasserbilanzen jeweils für den frisch geernteten Bestand auf sechsjährigen Wurzelstöcken (2013) (1. VP auf 6) bzw. den zweijährigen Bestand auf siebenjährigen Wurzelstöcken (2. VP auf 7) sowie den noch nicht geernteten Bestand mit sechs- (2013) bzw. siebenjährigen Bäumen (2014) berechnet. Die Unterschiede in den Wasserbilanzen, welche auf die Bestandsentwicklung zurückzuführen sind, sind in Abbildung 28 dargestellt. Die Interzeption (INT) des älteren Bestands liegt aufgrund der größeren Blattfläche etwas über jener des geernteten. Der höhere Beschirmungsgrad unter den älteren Pappeln spiegelt sich in einer geringeren Bodenver-

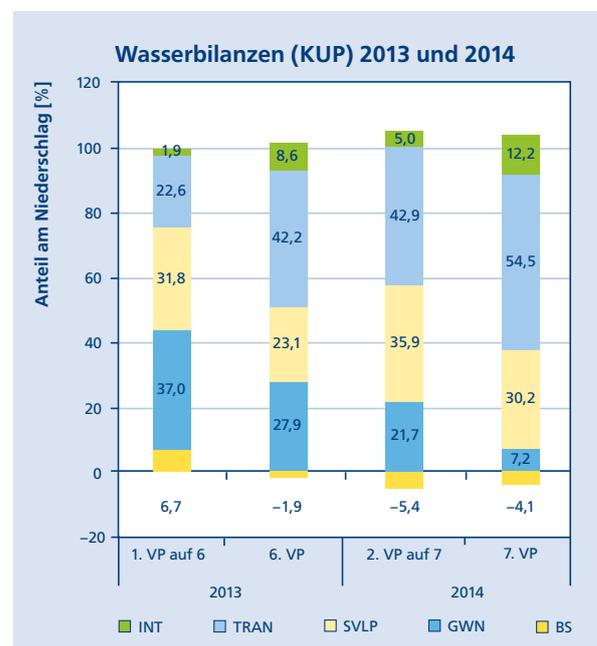


Abbildung 28: Wasserbilanzen für die hydrologischen Jahre (Nov.–Okt.) 2013 und 2014 für KUP 1. bzw. 2. Jahr nach der Ernte (jeweils links) sowie KUP 6- bzw. 7-jährig (jeweils rechts)

dunstung (SLVP) wider. Der markanteste Unterschied liegt jedoch im Wasserentzug (TRAN) der Bäume unterschiedlichen Alters. Besonders im Jahr nach der ersten Ernte, aber auch noch unter dem zweijährigen Bestand werden 19% bzw. 11% des Jahresniederschlags weniger transpiriert. Wie bereits aus Abbildung 24 ersichtlich beläuft sich die gesamte Evapotranspiration unter dem älteren Bestand auf rund 750 mm und liegt somit im Jahr 2013 um rund 180 mm, im Jahr 2014 um 100 mm über jener des geernteten Bestands. Dieser Unterschied macht sich auch in der Grundwasserneubildung bemerkbar, welche abhängig von der jeweiligen Witterung 9 bis 14% des Jahresniederschlags geringer ausfällt. Wie in Abbildung 25 dargestellt, beläuft sich die GWN unter dem sechs- bzw. siebenjährigen Bestand auf 281 mm im niederschlagsreichen Jahr 2013 bzw. auf 56 mm im relativ niederschlagsarmen Jahr 2014 und liegt somit um rund 90 mm (2013) bzw. 110 mm (2014) niedriger als jene unter dem geernteten Bestand. Ein fünfjähriger Umtrieb wirkt sich im Vergleich zu einem siebenjährigen Umtrieb somit positiv auf die Menge des dem Grundwasserkörper zugeführten Wassers aus.

Die aus der Modellparametrisierung erhaltenen Pflanzenparameter konnten verwendet werden um die Einflüsse des Bestandsalters unabhängig von der Witterung genauer zu untersuchen. Hierzu wurden Modellläufe für die Witterungsverhältnisse der Jahre 2008 bis 2014 verwendet, wobei jeweils die Pflanzenparameter, also die Informationen zur Bestandsentwicklung konstant gehalten wurden. So konnten für die Entwicklungsstadien 1. bis 7. Vegetationsperiode (VP) der KUP Evaporationsraten bzw. Grundwasserneubildungsraten für die Witterungsverhältnisse der Jahre 2008 bis 2014 berechnet werden. Die Spannweiten dieser Berechnungen sind in den Abbildungen 29 (EVAP) bzw. 30 (GWN) dargestellt. Für jedes Entwicklungsstadium kann mit diesem Modellansatz eine Aussage zur Abhängigkeit seines Wasserverbrauchs von der Witterungsvariabilität gemacht werden. Aus beiden Abbildungen ist deutlich zu erkennen, dass sich der Wasserhaushalt der KUP unabhängig von den Witterungsverhältnissen zu Beginn der Bewirtschaftung (1. bis 3. Vegetationsperiode) von jenem der späteren Stadien unterscheidet. Mit zunehmendem Alter nimmt die Evapotranspiration, besonders gesteuert durch die Transpiration der Bäume, von durchschnittlich etwas über 600 mm auf knapp 750 mm zu (Abbildung 29). Analog zu dieser Entwicklung nimmt die Grundwasserneubildung mit zunehmendem Bestandsalter von 250 mm im Jahr der Anlage auf etwas über 100 mm ab (Abbildung 30).

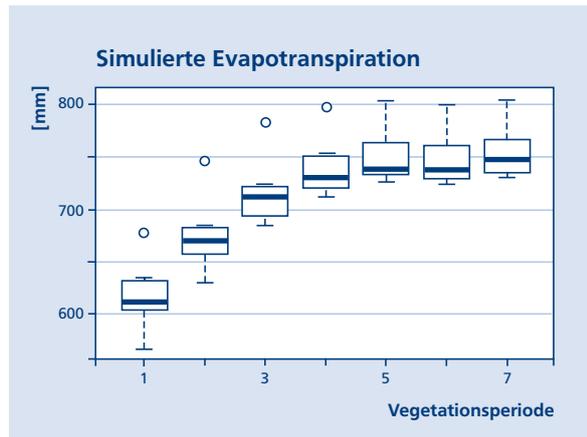


Abbildung 29: simulierte Evapotranspiration [mm] für die Witterungsverhältnisse 2008 – 2014 für unterschiedliche Entwicklungsstadien einer KUP 1. bis 7. Vegetationsperiode

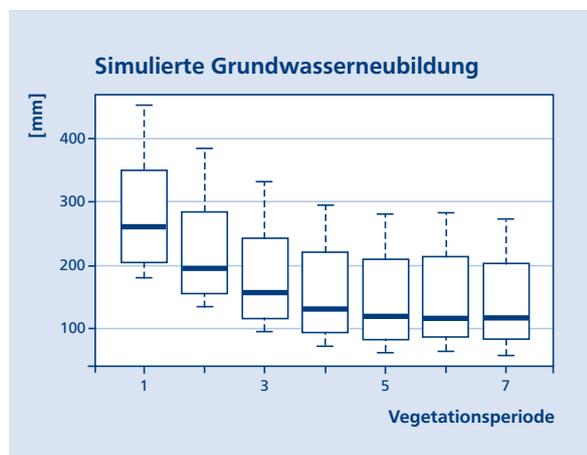


Abbildung 30: simulierte Grundwasserneubildung in mm für die Witterungsverhältnisse 2008 – 2014 für unterschiedliche Entwicklungsstadien einer KUP 1. bis 7. Vegetationsperiode

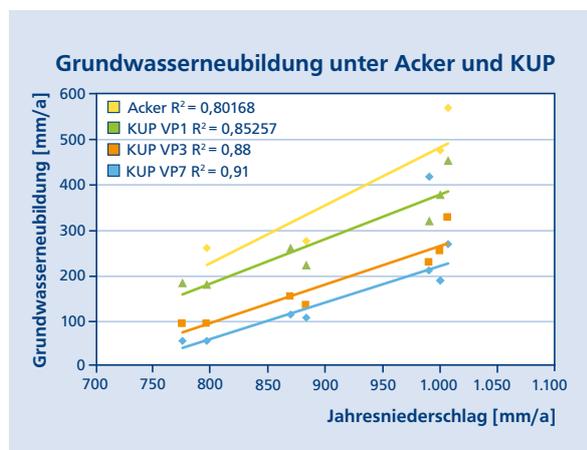


Abbildung 31: Grundwasserneubildung (GWN) in mm unter Acker sowie KUP unterschiedlichen Alters 1. bis 7. Vegetationsperiode in Abhängigkeit zur Jahresniederschlagssumme [mm].

Die aus den dargestellten Berechnungen hervorgegangenen Grundwasserneubildungsraten sind in Abbildung 31 in Abhängigkeit zum jeweiligen Jahresniederschlag jenen der für die Ackerfläche berechneten gegenübergestellt. Aus dieser Abbildung lassen sich nun deutlich die drei die Grundwasserneubildung bestimmenden Faktoren ablesen. Allen Varianten gemeinsam ist die direkte Abhängigkeit vom Jahresniederschlag. Je mehr Wasser dargeboten wird, umso mehr Überschuss, also Grundwasserneubildung, kann versickern. Der Zusammenhang zwischen GWN und dem Niederschlag nimmt mit zunehmendem Wasserbedarf der Kulturen zu. Darüber hinaus weist der Acker im Vergleich zur KUP auch in diesem Vergleich durchgehend höhere Sickerwassermengen auf. Nachdem es mit dieser Methode möglich geworden ist, bestätigt sich aus den in Abbildung 31 dargestellten Berechnungen auch allgemein die Einflüsse des Bestandsalters auf die GWN. Während die Reduktion der GWN gegenüber dem Acker für die erste Vegetationsperiode noch eher gering ausfällt, macht sich der erhöhte Wasserbedarf der Bäume spätestens ab der

dritten Vegetationsperiode deutlich bemerkbar. Dieser Effekt verstärkt sich mit zunehmendem Alter der Bäume noch, die Abhängigkeit vom Jahresniederschlag nimmt weiter zu.

Stoffkonzentrationen im Sickerwasser

Besonderes Interesse galt im Rahmen des Projekts den Stoffeinträgen und hier insbesondere des Nitrats in den Grundwasserkörper des Trinkwassereinzugsgebiets der Gemeinde Kaufering. Untersucht wurden diesbezüglich die Unterschiede zwischen der KUP und der landwirtschaftlichen Referenzfläche. Zur Ermittlung der Stoffeinträge ins Grundwasser eines Standorts sind neben Kenntnissen über den Bodenwasserhaushalt auch umfangreiche Kenntnisse über die Mengen der im Sickerwasser transportierten Stoffe sowie die dazugehörige zeitliche Dynamik erforderlich.

Der bestimmende Unterschied im Stoffhaushalt der beiden verglichenen Landnutzungen ist das Ausbleiben der Düngung auf der Kurzumtriebsplantage. Der Effekt der Düngung spiegelt sich deutlich in den seit Mai 2011 auf der Ackerfläche gewonnenen Stoffkonzentrationen wider. Sowohl bezüglich der Nitrat- aber auch bspw. der Sulfatwerte liegen diese auf der Ackerfläche deutlich über jenen der KUP (Abbildung 32). Die Mediane der Nitratkonzentrationen belaufen sich unter Acker auf 16,7 mg/l unter Kurzumtriebsplantagen inklusive der 2010 noch gemessenen erhöhten Konzentrationen aufgrund des Grünlandumbruchs hingegen bei 5,7 mg/l, im weiteren Verlauf reduzieren sich diese ab November 2010 auf 3,7 mg/l. Sie liegen demzufolge deutlich unter jenen des Ackers, was sich auch in den berechneten Stoffausträgen bemerkbar macht.

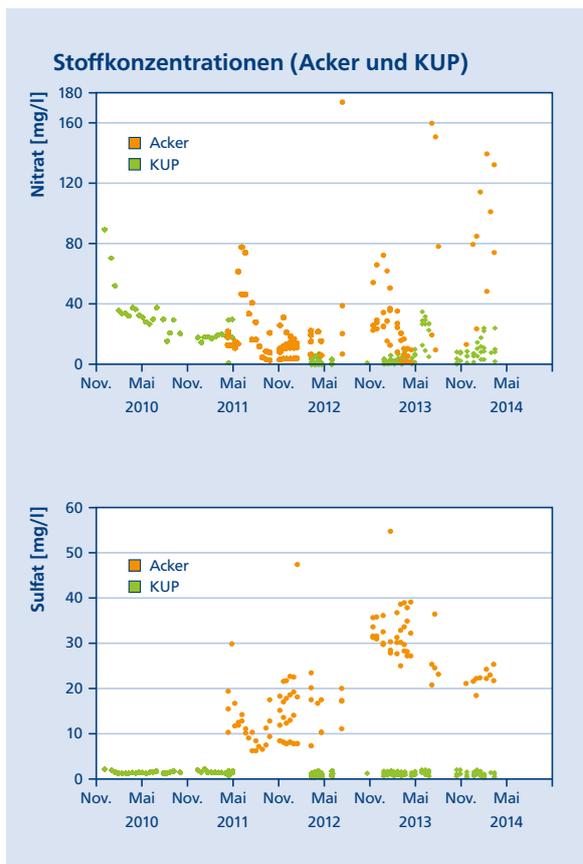


Abbildung 32: Nitratkonzentrationen [mg/l] (oben) sowie Sulfatkonzentrationen [mg/l] (unten) im Sickerwasser unterhalb des Wurzeleinflussbereichs unter Acker (85 cm) sowie KUP (185 cm)

Stoffausträge

Für die Jahre 2010 bis 2014 (KUP) bzw. 2012 und 2013 (Acker) wurden auf Basis der dort gemessenen Stoffkonzentrationen im Bodensickerwasser sowie den aus der Wasserhaushaltsmodellierung ermittelten Raten der Grundwasserneubildung die Stoffausträge unter den beiden Flächen ermittelt. Die Stofffrachten wurden für beiden Flächen unterhalb des Wurzeinflussbereichs berechnet. Auf der Acker-Referenzfläche entspricht dieser der Bodentiefe von 85 cm, für KUP wurde eine Tiefe von 185 cm gewählt. Die Stoffausträge unter den beiden Flächen wurden aus den modellierten Sickerwasserraten und den in der Regel 14-tägig vorhandenen Stoffkonzentrationen berechnet. Lücken in den Stoffkonzentrationen wurden mit dem Median der gesamten gemessenen Werte gefüllt. Im Hinblick auf den Trinkwasserschutz sind die Stoffeinträge von Nitrat in den Grundwasserkörper wesentlich von Interesse.

Bedingt durch den hohen Wasserverbrauch der Pappeln wurde unter Kurzumtriebsplantagen erheblich weniger Wasser dem Grundwasserkörper zugeführt als unter Acker, was sich wiederum senkend auf die Stoffausträge (Stofffrachten) unter Kurzumtriebsplantagen auswirkte.

Der für Trinkwassereinzugsgebiete relevante Schwellenwert für die Stofffrachten, um die Qualität des Trinkwassers nicht zu gefährden, ergibt sich einzugsgebietsspezifisch über die Multiplikation der Grundwasserneubildung (in mm) mit der Nitratkonzentration von 50 mg/l, bezogen auf Nitrat-Stickstoff (vgl. Auth et al. 2005). Der für das Kauferinger Trinkwassereinzugsgebiet so ermittelte Schwellenwert der Nitrat-Stickstoff-Frachten liegt, für eine durchschnittlich angenommene Sickerwasserspende von 300 mm/Jahr, bei 33,8 kg/(ha*a). Die erfassten Frachten auf der Acker-Fläche übersteigen im niederschlagsreichen Jahr 2013 diesen Schwellenwert, im relativ trockenen Jahr 2012 mit geringer Grundwasserneubildung auf beiden Bewirtschaftungsvarianten sowie den übrigen Jahren unter KUP liegen die Stoffausträge darunter.

Punktuell können auf Ackerflächen jedoch noch deutlich höhere Nitrat-Stickstoff-Frachten verzeichnet werden (bspw. im Vorgewende). Der Eintrag an Nitrat in den Grundwasserkörper ist unter der KUP im Jahr 2012 knapp 70%, im Jahr 2013 76% geringer als unter dem konventionell bewirtschafteten Referenz-Acker. Ähnlich verhält es sich auch mit Verlusten weiterer Nährelemente wie Calcium, Magnesium und Sulfat.

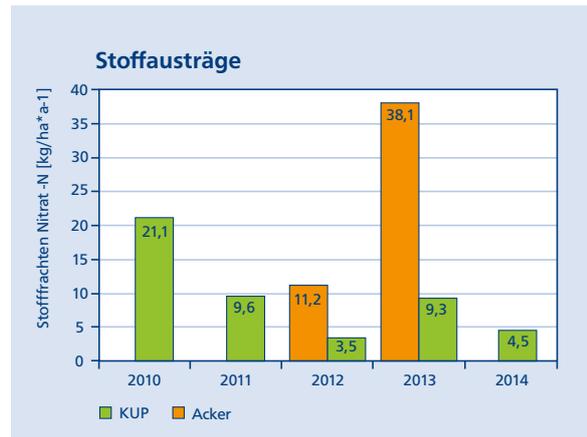


Abbildung 33: Stofffrachten Nitrat-N [kg/ha*a] unter KUP für die Jahre 2010 bis 2014 (grün) sowie unter Acker 2012 und 2013 (orange).

Die Erntemaßnahme der KUP im Januar 2013 zeigte keine nennenswerten zusätzlichen Stoffverlagerungen in die Tiefe. Die deutlich erhöhten Austräge unter KUP im Jahr 2010 von 21 kg pro Hektar erklären sich zum einen durch die relativ hohen Sickerwasserraten bedingt durch hohe Sommerniederschläge, zum anderen jedoch auch durch die erhöhte Stoffmobilisierung nach dem im Jahr 2008 durchgeführten Grünlandumbruch. Dieser Effekt klingt aber ab dem Jahr 2011 wieder deutlich ab.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Wasserhaushalt

Während der Kalibrierungsphase der Wasserhaushaltsmodellierung konnten die gemessenen Bodenwassergehalte in den verschiedenen Tiefenstufen der beiden Landnutzungen sehr gut bis gut nachvollzogen werden. Die Bodenwasserdynamik innerhalb des Bodenprofils wird im Modell gut abgebildet. Auch die berechnete Interzeption zeigte zufriedenstellende Übereinstimmungen mit der aus den Messungen des Bestandsniederschlags abgeleiteten Interzeption im Gelände. Ebenso zeigen die ersten Ergebnisse der Transpirationmessungen, dass die berechnete Transpiration im Modell LWF-BROOK90 plausibel abgebildet wird.

Im Vergleich zu anderen Studien wird die Interzeption mit im Mittel 9,5% des Jahresniederschlags oder knapp 95 mm in Kaufering eher niedriger eingeschätzt. Petzold et al. (2010) geben durchschnittliche Interzeptionsraten von 176 mm bzw. knapp 25% des Jahresniederschlags an, ähnliche Werte ermittelte auch Schmidt-Walter et al. (2012) mit 168 mm bzw. 25% des

Niederschlags. Murach et al. (2008) beschreiben auf den im Rahmen des DENDROM-Projekts untersuchten Pappel-Kurzumtriebsplantagen höhere Interzeptionsraten mit 171 mm (27%) im neun- bzw. 118 mm (20%) im dreijährigen Bestand. Da die Interzeption in Kaufering über den gemessenen Bestandsniederschlag zufriedenstellend validiert worden ist, kann diese dennoch als gegeben erachtet werden. Möglicherweise hat das Niederschlagsregime, das heißt der Unterschied zwischen der Art der Niederschläge einen Einfluss auf die Interzeption. Großtropfige Gewitterniederschläge im Alpenvorland stehen kleinertropfigen Niederschlägen im mittelsächsischen Lösshügelland gegenüber. Letztere führen zu einer erhöhten Interzeption in Sachsen. Dem gegenüber stehen die für Kaufering wiederum höher berechneten Bodenevaporationswerte von 250 mm oder 27,7%. Auf den sächsischen Standorten von Petzold et al. nehmen diese im Mittel Werte von 115,5 mm an, mit 76 mm liegen Schmidt-Walter et al. (2013) sogar noch darunter. Mit knapp über 100 mm (16,5%) bzw. 120 mm (21%) im neun- bzw. dreijährigen Bestand weisen die KUP bei Murach et al. (2008) ähnliche Werte auf. Die Unterschiede in der Bodenevaporation lassen sich über die größere Wasserverfügbarkeit auf den Kauferinger Standorten erklären, welche die höheren Verdunstungsraten ermöglicht. In der Summe gleichen sich diese beiden Wasserhaushaltskomponenten wieder einander an. In Kaufering ergeben sich Summen von Interzeption und Bodenevaporation von im Mittel 330 mm. Gegenüber 240 mm auf dem Weidenbestand bei Schmidt-Walter et al. (2013), 323 mm bis 254 mm auf von Petzold et al. (2010) beschriebenen sächsischen KUP-Standorten und den 270 bzw. 240 mm der Untersuchungen von Murach et al. (2008) sind die Unterschiede, besonders wenn das deutlich höhere Wasserangebot auf den Kauferinger Flächen berücksichtigt wird, als vernachlässigbar zu bezeichnen.

Die für die Kauferinger Flächen berechnete Transpiration von im Mittel 370 mm pro Jahr im fünfjährigen Umtrieb und 430 mm bis zur siebten Vegetationsperiode kann durch die Modellergebnisse für den Tharandter Standort mit einer ähnlichen Jahresniederschlagssumme von 957 mm gegenüber 932 mm in Kaufering bestätigt werden. Petzold et al. (2010) berechneten dort eine jährliche Transpiration von im Mittel 453 mm. Zum Teil deutlich niedrigere Werte weisen die Studien von Schmidt-Walter et al. (2013) und Murach et al. (2008) mit im Mittel 256 bzw. 222 mm auf. Das Angebot an Niederschlag bestimmt also maßgeblich die Menge transpirierten Wassers.

Die aus den Wasserhaushaltsberechnungen ermittelten Raten der Grundwasserneubildung können sehr gut mit jenen in Tharandt bei ähnlichen Niederschlagsverhältnissen verglichen werden. Bei Petzold et al. (2010) ergibt sich demzufolge im langjährigen Mittel eine Grundwasserneubildung von 204 mm gegenüber den in Kaufering für die Jahre 2010 bis 2014 unter beiden Bewirtschaftungsvarianten ermittelten mittleren Grundwasserneubildungsraten von 209 mm.

Zwar haben KUP erst bei größeren Flächenanteilen messbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt eines Gebiets, vor einem großflächigen Anbau, besonders in Bereichen mit geringer Grundwasserneubildung sollten daher wasserwirtschaftliche Aspekte berücksichtigt werden. Andersherum betrachtet kann die größere Ausschöpfung des Bodenwasserspeichers durch die KUP-Bäume auch durchaus gewünschte Effekte fördern. Bei Hochwasser oder erosionswirksamen Starkregenereignisse in den Sommer- und Herbstmonaten kann der Boden viel Wasser aufnehmen und in der Fläche zurückhalten. Auch Flächen, die zur Vernässung neigen und dadurch oftmals schlecht zu befahren sind, bieten sich für eine KUP-Nutzung an. Pappeln als klassische Auen-Bewohner können mit einem gewissen Grad an Feuchtigkeit gut umgehen und kommen auch mit einer kurzfristigen Überschwemmung gut zurecht.

Stoffausträge

Die Unterschiede der Stoffausträge unter den Kauferinger Flächen KUP und Referenzacker sind maßgeblich gesteuert von der ausbleibenden Düngung auf der KUP. Die Unterschiede zwischen den Jahren sind auf die sehr unterschiedlichen Witterungsverhältnisse, besonders auf die unterschiedlichen Jahresniederschlagssummen, zurückzuführen. Die aus den berechneten Sickerwasserraten sowie den gemessenen 14-tägigen Nitratkonzentrationen abgeleiteten Stoffausträge unter KUP zwischen 3,5 und 9,6 kg/ha in den Jahren 2011 bis 2014 liegen niedriger als die von Schmidt-Walter et al. (2013) berechneten Werte von im Mittel 16,5 kg/ha für das Jahr 2010, wohingegen der noch vom Grünlandumbruch im Jahr der Anlage geprägte N-Austrag im Jahr 2010 demgegenüber erhöhte Werte aufweist. Mortensen et al. (1998) fanden lediglich einen N-Austrag 2 kg/ha auf einer gedüngten Weiden-KUP. Aronsson und Bergström (2001) berechneten dagegen 150 kg/(ha*Jahr) im ersten Jahr nach der Anlage einer Weiden-KUP. Untersuchungen von Dimitriou und Aronsson (2005) auf einer ebenfalls gedüngten Weiden-KUP ergaben einen Austrag von 90 kg/(ha*Jahr) auf sandigen Böden. Auf eine deutliche Reduktion der Stoffaus-

träge bei ausbleibender Düngung der KUP kann auf Grundlage der Kauferinger Erhebungen ohne Zweifel geschlossen werden.

Ackerbauliche Nutzung am Uferstrand oder im Überschwemmungsbereich auch kleinerer Fließgewässer birgt besonders während Hochwasserereignissen die Gefahr von erhöhten Stoffeinträgen in den Bach- oder Flusslauf. Die oben beschriebenen positiven Effekte bezüglich der Einträge gelöster oder erodierter Stoffe in Gewässer können im Uferbereich von Oberflächengewässern genutzt werden. Bei fehlender natürlicher Ufervegetation können Kurzumtriebsplantagen in Gewässerrandstreifen, erodiertes Bodenmaterial zurückhalten und somit den oberflächigen Eintrag von Sedimenten und daran gebundener Nährstoffe in das Fließgewässer abpuffern (Bärwolff et al. 2013; Fürstenau 2014). Wie oben beschrieben, wirkt sich das Ausbleiben der Düngung auch und insbesondere in unmittelbarer Gewässernähe positiv auf die Stoffeinträge in das Fließgewässer aus. Darüber hinaus fördert die langjährige Bodenruhe eine gesteigerte Wasser- und Stoffhaltefähigkeit des Bodens. Angereicherte Stoffe können durch das ausgeprägte Wurzelsystem der Bäume auch aus tieferen Regionen des Bodens entzogen werden. Diffuse Stoffeinträge durch Uferinfiltration können so ebenfalls deutlich reduziert werden.

Literatur

- AG Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hannover.
- Aronson, P.G.; Bergström L.F. (2001): Nitrate leaching from lysimeter-grown short-rotation willow coppice in relation to N-application, irrigation and soil type. *Biomass Bioenergy* 21 (3).
- Auth, S.; Forstner, S.; Rintelen, P.-M.; Halama, M.; Auerswald, K. (2005): Nährstoffbelastungen der Gewässer durch die Landwirtschaft; Methoden zur Abschätzung – Möglichkeiten zur Reduzierung. Landesamt für Wasserwirtschaft [Hrsg.].
- Bärwolff, M.; Reinhold, G.; Fürstenau, C.; Graf, T.; Jung, L.; Vetter, A. (2013): Gewässerrandstreifen als Kurzumtriebsplantagen oder Agroforstsysteme. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamts, Text 93/2013.
- Bay. LfU (Bayerisches Landesamt für Umwelt) (Hrsg.) (2014): Grundwasser für die öffentliche Wasserversorgung: Nitrat und Pflanzenschutzmittel; Berichtsjahre 2008 bis 2012. Umwelt Spezial
- Breuer, L.; Eckhardt, K.; Frede, H.-G. (2003): Plant parameter values for models in temperate climates. In: *Ecological Modelling*, 139: 237–293. Elsevier.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit [BMU, Hrsg.] (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland, 3. Lieferung. Projektleitung Bundesanstalt für Gewässerkunde, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg i.Br. Textred. Ingeborg Vonderstraß
- Burgess, S.S.O.; Adams, M.; Turner, N.C.; Beverly, C.R.; Ong, C.K.; Khan, A.A.H.; Bleby, T.M. (2001): An improved heat pulse method to measure low and reverse rates of sap flow in woody plants. In: *Tree Physiol.* 21: 1157–1157.
- DBU (2010): Handlungsempfehlungen zur naturverträglichen Produktion von Energieholz in der Landwirtschaft; Ergebnisse aus dem Projekt Novalis. Online: <https://www.dbu.de/phpTemplates/publikationen/pdf/120410114219pelp.pdf>. Stand: Dezember 2015
- Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2010): Kurzumtriebsplantagen – Ergebnisse aus dem Projekt Novalis. Deutsche Bundesstiftung Umwelt [Hrsg.].
- Dimitriou, I.; Aronson, P. (2005): Willows for energy and phytoremediation in Sweden. *Unasylva* 221 (56).
- DVWK (1986): DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 211/1986: Ermittlung des Interzeptionsverlustes in Waldbeständen bei Regen; Verlag Paul Parey, Hamburg.
- DVWK (1990): DVWK Merkblätter zur Wasserwirtschaft 217/1990: Gewinnung von Bodenwasserproben mithilfe der Saugkerzen-Methode; Verlag Paul Parey, Hamburg.
- Federer, C. A (1995): BROOK90 – A simulation model for evaporation, soil water and stream flow. Version 3.24, Documentation, USDA Durham, USA.
- Fürstenau, C. (2014): Agrarholz ein natürlicher Biofilter entlang von Fließgewässern – Chancen und Risiken. 4. Forum Agroforstsysteme am 3./4.12.2014 in Dornburg
- Gemeinde Kaufering (2009): Nachhaltigkeitskonzept Kaufering. Online: <http://www.kaufering.de/?language=de&kat=Nachhaltigkeit>. Stand: Dezember 2015.
- Hammel, K.; Kennel, M. (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushaltes von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell Brook90. In: *Forst. Forschungsberichte München*, Bd. 185.
- Kennel, M. (1998): Modellierung des Wasser- und Stoffhaushaltes von Waldökosystemen – Fallstudien: Forsthydrologisches Forschungsgebiet Krofdorf und Referenzeinzugsgebiet Große Ohe. In: *Forst. Forschungsberichte München*, Bd. 168.
- Lamersdorf, N.; Schmidt-Walter, P. (2011): Weniger Nitratströme durch Kurzumtriebsplantagen. In: *ACKERplus*, Bd. 3.11, S. 78–82.
- Mortensen, J.; Nielsen, K.H.; Jorgensen, U. (1998): Nitrate leaching during establishment of willow (*Salix viminalis*) on two soil types and at two fertilization levels. *Biomass and Bioenergy* 15 (6).

Murach, D.; Knur, L.; Schultze, M. (Hrsg.) (2008): DENDROM – Zukunftsrohstoff Dendromasse – Endbericht. Eberswalde.

Niederberger, J.; Zacios, M.; Burger, F.; Grimmeisen, W.; Pertl, L.; Schubert, A.; Schulz, C.; Strebelow J.; Zimmermann, L. (2010): Energiewälder zum Trinkwasserschutz. In: LWF aktuell 75.

Petzold, R.; Wahren, A.; Feger, K.-H. (2010): Steuerungsoptionen des Wasser- und Stoffhaushalts auf Landschaftsebene durch den Anbau von Kurzumtriebsplantagen – ein Forschungsansatz. In: Stadt Marktredwitz [Hrsg.] »Marktredwitzer Bodenschutztag« Tagungsband 6, Bodenschutz in Europa – Ziele und Umsetzung«, S. 91–96.

Schmidt-Walter, P.; Lamersdorf, N. (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 Hanover, Germany. Bioenergy Research 5.

Schwarze, H.; Röhrich C. (2006): Untersuchungen zum Pappel- und Weidenanbau im Kurzumtrieb auf landwirtschaftlichen Flächen. Vortrag zur 1. Fachtagung der BMBF-Projekte DENDROM, AGROWOOD und AGROFORST (2006) »Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen« 6.–7.11.06 in Tharandt.

Shuttleworth, E.; Wallace, W. (1985): Evaporation from sparse crops – an energy combination theory. In: Quart. J.R. Met. Soc. 111, 839–855.

Siemens, K. (1998): Sensitivitätsanalysen mit dem Wasserhaushaltsmodell BROOK90. Diplomarbeit TU Dresden, IHM-Lehrstuhl für Meteorologie (unveröffentlicht).

Zacios, M.; Niederberger, J. (2011): Energiewald unter Dauerbeobachtung – Seit zwei Jahren werden in Kaufering die Auswirkungen einer Kurzumtriebsplantage auf die Grundwasserneubildung und die Trinkwasserqualität untersucht. LWF aktuell 85, S. 34–36.

Zimmermann, L.; Moritz, K.; Kennel, M.; Bittersohl, J. (2000): Influence of bark beetle infestation on water quantity and quality in the catchment Grosse Ohe/Bavarian Forest National Park. In: Silva Gabreta 4, 51–62.

Keywords: poplar, short rotation coppice, energy forestry, water budget, measurement, modelling, LWF-BROOK90, transpiration, sap flow, interception, ground water recharge, element budget, nitrate, drinking water protection area

Summary: Short rotation coppice (SRC) grows much faster than a forest because tree species with high juvenile growth are preferably used. Exemplary on a drinking water protection area in the Bavarian Alpine foothills water and element budgets for a poplar SRC during a four year study period are shown. Water budget regime was deduced partly through measurable quantities (precipitation, transpiration, soil water budget) as well as other water quantities (e.g. ground water recharge, soil water fluxes) from the soil hydrologic model LWF-BROOK90. A reduction of ground water recharge below poplar compared to agricultural crops by 35 to 60% is effected through SRC development dependent on stand age and weather conditions. Evapotranspiration increases with age of trees, so that if applying short rotation periods of maximum four to five years this effect can be antagonized to a certain degree. Nitrate input to ground water is significantly reduced through extensification of land use by setting up a SRC compared to fertilized agricultural areas, crops and intensive managed grassland likewise. According to specific site conditions SRC needs no or little fertilization. Nitrate input to ground water is reduced by 70 to 76%. Higher nitrate loads from poplar in the first year of the study are explained by longer-lasting effects of the ploughing up of grassland prior to setting up poplar SRC there. The harvest of SRC in January 2013 showed no noteworthy additional element fluxes to deeper depth. Setting up SRC in agricultural areas are beneficial not only for ground water protection but as well as for protection of waters in general besides flood protection and erosion control.
