

GEHÖLZSTRUKTUREN AN HOCHWASSERSCHUTZDÄMMEN

**AUSWIRKUNGEN VON WEIDEN- UND GRÄSER/KRÄUTER-BEWUCHS AUF DEN
BODENWASSERHAUSHALT ANHAND VON LYSIMETERVERSUCHEN**

WOODY PLANTS ON DYKES AND LEVEES

**EFFECTS OF WILLOW AND GRASS/HERB VEGETATION ON THE
SOIL WATER BALANCE BY MEANS OF LYSIMETER TESTS**

MASTERARBEIT DER STUDIENRICHTUNG
LANDSCHAFTSPLANUNG UND LANDSCHAFTSARCHITEKTUR

INSTITUT FÜR INGENIEURBIOLOGIE UND LANDSCHAFTSBAU
DEPARTMENT FÜR BAUTECHNIK UND NATURGEFAHREN
UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN



Eingereicht von:

Manuel Sokopp, Bakk. techn.

Wien, Jänner 2012

Betreuung:

O.Univ.Prof.Dr. Florin Florineth

DI Walter Lammeranner

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank an alle richten, die mich im Laufe des Studiums und besonders während der Erstellung der vorliegenden Masterarbeit unterstützt haben.

Ganz besonders aber möchte ich DI Walter Lammeranner für die Betreuung der vorliegenden Masterarbeit, seinen fachlichen Beistand und für zur Verfügung gestelltes Arbeitsmaterial bzw. diverse Literatur danken. Auch Prof.Dr. Florin Florineth gilt besonderer Dank für die ansteckende Begeisterung an der Ingenieurbiologie und für die Betreuung dieser Masterarbeit.

Für die Hilfe bei einigen Vegetationsaufnahmen möchte ich mich bei Agnes Kläring und Josef Schönleitner bedanken.

Desweiteren gilt den MitarbeiterInnen des Instituts für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau Dank für den fachlichen Rat und etliche warme Mahlzeiten.

Auch bei meiner Freundin Rebecca möchte ich mich ganz herzlich für ihre Motivation und Geduld während des Studiums und der Erstellung dieser Masterarbeit, sowie für das Korrekturlesen bedanken.

Meinen Eltern und meiner Patentante Veronika gilt ebenfalls besonderer Dank, da sie mir durch die liebevolle und finanzielle Unterstützung das Studium erheblich erleichtert haben.

Zu guter Letzt möchte ich mich ganz herzlich bei meinem im Dezember 2010 verstorbenen Großvater Rupert bedanken, der bei der Entscheidung meines Studiums einen wichtigen Anstoß gegeben hat.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	6
Abstract	7
1 Problemstellung	8
1.1 Einführung	8
1.2 Fragestellung.....	8
1.3 Ziele	8
1.4 Aufbau der Masterarbeit	9
2 Grundlagen	10
2.1 Geotechnische Parameter	10
2.1.1 Körnung	10
2.1.1.1 Kornfraktionen und Korngrößenverteilung	10
2.1.1.2 Methoden zur Trennung	12
2.1.1.3 Darstellung der Ergebnisse	13
2.1.2 Bodenporen.....	14
2.1.3 Bodendichte	16
2.1.4 Bodenwasser	18
2.1.4.1 Arten von Bodenwasser	19
2.1.4.2 Bodenwassergehalt	21
2.1.4.3 Potentialkonzept	22
2.1.4.4 Matrixpotential.....	23
2.1.4.5 Wasserbewegung im Boden.....	25
2.2 Vegetationsparameter	27
2.2.1 Wasseraufnahme	27
2.2.2 Evapotranspiration	28
2.2.3 Verfahren zur Bestimmung der Evapotranspiration.....	30
2.2.3.1 Lysimeter	30
2.2.3.2 Berechnung der Evapotranspiration	32
2.2.3.3 Wasserverbrauch der Pflanzen	35
2.2.4 Standsicherheit	36
2.2.5 Eigenschaften der Purpurweide (<i>Salix purpurea</i>)	37
3 Methodik	39
3.1 Versuchsanlage in Deutsch-Wagram	39
3.1.1 Errichtung der Versuchsanlage	39
3.1.2 Aufbau der Lysimeteranlage.....	39

3.1.2.1	Bodenaufbau und Bodenmaterial.....	41
3.1.2.2	Weidenspreitlage	41
3.1.2.3	Gräser/Kräuter-Ansaat.....	42
3.2	Messtechnik.....	44
3.2.1	TDR-Sonden	44
3.2.2	Tensiometer	45
3.2.3	Sickerwassermessung.....	46
3.2.4	Wiegeelektronik	46
3.2.5	Wetterstation.....	47
3.2.6	Datenlogger.....	48
3.3	Vegetationsaufnahmen	48
3.3.1	Durchmesser/Längen-Verhältnis der Sprosse	48
3.3.2	Oberirdische Biomasse.....	49
3.3.3	Blattflächenindex	50
3.3.4	Wurzelanalyse	50
4	Ergebnisse.....	53
4.1	Vegetationsentwicklung	53
4.1.1	Weidenspreitlage	53
4.1.1.1	Durchmesser/Längen-Verhältnis	54
4.1.1.2	Oberirdische Biomasse	56
4.1.1.3	Blattflächenindex	57
4.1.2	Gräser/Kräuter Ansaat	58
4.2	Wurzelanalyse	59
4.3	Meteorologische Daten	66
4.4	Bodenphysikalische Messergebnisse	68
4.4.1	Bodenwasserspannung	68
4.4.2	Bodenwassergehalt	72
4.4.3	Durchsickerung.....	74
4.4.4	Evapotranspiration und K _c -Werte.....	75
5	Diskussion.....	78
6	Literaturverzeichnis	80
7	Abbildungsverzeichnis	84
8	Tabellenverzeichnis.....	87
9	Anhang.....	88
9.1	Zeittabelle der durchgeführten Untersuchungen	88
9.2	Bewässerungsdaten	89

9.3 Sickerwassermengen der Lysimeter ohne Messgeräte	89
9.4 Durchmesser/Längen-Verhältnisse der Sprosse.....	90
9.5 Ergebnisse der Wurzelscans	94

Zusammenfassung

Gehölzbewuchs gilt für die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen als sehr umstritten und ist in der Literatur Großteils nur unter bestimmten Bedingungen zulässig, wobei sich diese Haltung meist auf Erfahrungen mit Damnbrüchen und nicht auf wissenschaftliche Untersuchungen stützt.

Daher wurde vom Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau ein Forschungsprojekt gestartet, im Zuge dessen 2009 in Deutsch-Wagram, Niederösterreich eine Lysimeteranlage mit 20 Versuchsbehältern errichtet wurde, welche sich speziell mit der Verdunstung einer Spreitlage aus Purpurweiden und einer Gräser/Kräuter-Begrünung, sowie dem Bodenwasserhaushalt des stark verdichteten Hochwasserschutz-Versuchsbodens auseinandersetzt.

Hierfür wurden einige der Lysimeter mit spezieller Messtechnik ausgestattet, welche die Wasserspannung über Tensiometer und den Wassergehalt über TDR-Sonden stetig aufnehmen. Desweiteren gab es Untersuchungen zur Durchsickerungsleistung der Versuchsböden und Vegetationsaufnahmen hinsichtlich Wuchsleistung der Sprosse, Biomasse, Blattflächenindex sowie der Durchwurzelung.

Die Ergebnisse stützen sich auf die Untersuchungen von April bis Oktober 2011. Diese zeigen, dass die Lysimeter mit Weidenbewuchs bzw. Gräser/Kräuter-Begrünung im Vergleich zu dem Versuchsbehälter ohne Bewuchs einen weitaus geringeren Bodenwassergehalt und eine sehr hohe durchschnittliche Bodenwasserspannung aufweisen. Die Berechnungen der Evapotranspiration ergaben ebenfalls sehr ähnliche Ergebnisse zwischen Weiden- und Gräser/Kräuter-Bewuchs. Die Durchsickerungsrate des unbewachsenen Lysimeters ergab durchschnittlich die 2,5 fache Menge an Sickerwasser pro Tag als die Weiden. Aufgrund von Fehlmessungen konnte für die Gräser und Kräuter keine signifikante mittlere Durchsickerungsrate erhoben werden. Die Durchwurzelung der Weiden verläuft gleichmäßiger auf die Bodenschichten verteilt, wohingegen die Gräser und Kräuter die oberste Schicht stark bewurzeln und ab der zweiten Schicht der Wurzelanteil fast exponentiell abnimmt.

Abstract

Wooden vegetation for the stability of flood protection dams is considered very controversial and in most of the literature it is permitted only under certain conditions, but this attitude is mostly based on experiences with breaches in dykes and not on scientific examinations.

Therefore the Institute of Soil Bioengineering and Landscape Construction started a research project in which a lysimeter station with 20 test containers was built in Deutsch-Wagram, Lower Austria in 2009. The lysimeters grapple especially with the transpiration of a slope fortification made of purple willows and a grass-herb-planting as well as the water balance of the strongly compressed flood-protection-soil.

Accordingly some of the Lysimeters were equipped with a special measuring technique, which continuously take the water tension with tensiometers and the water content with TDR probes. Furthermore there were investigations for the water-leak-efficiency of the soil and a monitoring of the vegetation, regarding to the growth efficiency of the scions, the biomass, the leaf area index, as well as the rooting depth.

The results are based on the investigations from April to October 2011. These show that the lysimeters with willow and grass/herb vegetation compared to the test container without vegetation have much lower soil water contents and reach a very high average of the soil water tension. The calculations of evapotranspiration also gave very similar results between willows and grass/herb vegetation. The seepage rate of the unplanted lysimeter showed an average of 2.5 times the amount of the leachate per day than the willows. Due to measurement errors, no significant average seepage rate could be ascertained for the grasses and herbs. The root systems of willow is more evenly distributed in the different soil layers, while the grasses and herbs are rooting the top layer heavily and from the second layer the root proportion is almost exponentially decreasing.

1 Problemstellung

1.1 Einführung

Durch die teils folgenschweren Auswirkungen von Hochwässern der letzten Jahre stieg das Interesse an konstruktivem Hochwasserschutz in Österreich an.

Gehölzbewuchs auf Hochwasserschutzdämmen ist für deren Standsicherheit ein sehr umstrittenes Thema. Da es dafür aber keine wissenschaftlichen Versuche bzw. Untersuchungen gibt, haben das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und das Land Niederösterreich am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau ein Forschungsprojekt in Auftrag gegeben, welches die Auswirkungen von Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen untersuchen soll.

Im Zuge dieses Projektes wurde 2007 eine Versuchsanlage mit zwei überströmbaren Dämmen in Deutsch-Wagram, Niederösterreich errichtet. 2009 kam eine Lysimeteranlage hinzu, welche sich speziell mit der Verdunstung von Purpurweiden und dem Bodenwasserhaushalt des stark verdichteten Bodens auseinandersetzt.

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit den Untersuchungen der Lysimeteranlage und dient somit der Weiterführung der Beobachtungsergebnisse von OBRIEJETAN [2010] und LUKAS [2011].

Die bisherigen Ergebnisse der Versuchsdämme sind in EBNER [2008], HOLZAPFEL [2008], KRAYCHNIKOVA [2009], RAJIC [2009] und LESZCZYNSKI [2011] beschrieben.

1.2 Fragestellung

Wie wirkt sich der Bewuchs von Purpurweiden auf den Bodenwasserhaushalt eines stark verdichteten Hochwasserschutz-Versuchsbodens aus?

1.3 Ziele

Der Bewuchs von Purpurweiden, in Form einer Spreitlage, und die Begrünung mit einer Gräser/Kräuter-Mischung sollen hinsichtlich der Evapotranspiration und den Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt mit Hilfe der Lysimeteranlage untersucht werden.

Durch den Vergleich der Ergebnisse können Rückschlüsse auf die entwässernde Wirkung von Weiden auf den stark verdichteten Dammböden und in weiterer Folge auf die Standsicherheit des Hochwasserschutzdammes gezogen werden.

1.4 Aufbau der Masterarbeit

Nach der Einführung in das Thema werden in Kapitel 2 die Grundlagen der für die Fragestellung und Ziele dieser Masterarbeit relevanten Themen beschrieben. Diese beinhalten sowohl geotechnische Parameter und Vegetationsparameter hinsichtlich des Bodenwasserhaushaltes als auch den Aufbau und die Anordnung der Versuchsanlage in Deutsch-Wagram inkl. dem Aufbau und der Funktionsweise von Lysimetern allgemein sowie der angewandten Messtechnik.

In Kapitel 3 wird auf die Methodik der Vegetationsaufnahmen, der Bodenmessungen und dem Festhalten der Klimadaten eingegangen. Die Vegetationsaufnahmen beinhalten das Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse, die Ermittlung der oberirdischen Biomasse und des Blattflächenindex, sowie eine Wurzelanalyse. Bei den Bodenmessungen wird speziell auf den Bodenwasserhaushalt, also den Wassergehalt, die Wasserspannung und die Durchsickerungsleistung des Versuchsbodens, eingegangen.

In Kapitel 4 werden die durch die Anwendung der Methoden gewonnenen Ergebnisse zusammengefasst, analysiert und interpretiert.

In der Diskussion wird anhand der gesammelten Ergebnisse versucht die Forschungsfrage zu beantworten und einen Ausblick für zukünftige Untersuchungen zu diesem Thema zu schaffen.

Dem Anhang sind die Bewässerungsdaten, die Sickerwassermengen der Lysimeter ohne Messinstrumente, die Durchmesser/Längen-Verhältnisse der Sprosse von Lysimeter 14 und 20 und die Daten der Wurzeluntersuchungen beigefügt.

2 Grundlagen

2.1 Geotechnische Parameter

Der Boden ist ein selbstregulierendes Ökosystem, bestehend aus mineralischen und organischen (Pflanzenwurzeln, Mikroorganismen, etc.) Anteilen, sowie Wasser und Luft. Diese Bestandteile sind je nach Bodenart in unterschiedlicher Zusammensetzung vorhanden und unterliegen aufgrund von äußeren Einflüssen (Klima, Organismen, etc.) ständigen Veränderungen. Sie bilden somit ein dynamisches Gleichgewicht [KUNTZE et al., 1994, S. 185; BLUM, 2007, S. 4].

Da die Bodenbestandteile in festem (mineralische und organische Teile), flüssigem (Wasser) und gasförmigem (Luft) Aggregatzustand vorhanden sind, werden Böden bzw. deren Zusammensetzung auch als Drei-Phasen-System bezeichnet. Dieses bestimmt, zusammen mit dessen Veränderung durch äußere Einflüsse, die physikalischen Eigenschaften eines Bodens [SCHRÖDER, 1992, S. 12; HELLBERG-RODE, 2004].

Die für die Fragestellung dieser Masterarbeit wichtigsten Bodeneigenschaften (Körnung, Bodenporen, Bodendichte und Bodenwasser) sind stark miteinander verknüpft und werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

2.1.1 Körnung

Je nach mineralischem Ausgangsmaterial entsteht durch Verwitterung und Verlagerung eine Korngrößenverteilung mit mehr oder weniger unregelmäßig geformten Teilchen. Weist die Korngrößenverteilung charakteristische Züge auf, spricht man von einer Bodenart, welche synonym auch als Bodentextur, Korngrößenzusammensetzung oder Körnung bezeichnet werden kann. Die Korngrößenverteilung ist, trotz der weiten Spanne, bei Betrachtung eines Bodens mit freiem Auge relativ leicht erkennbar. Sie gilt als konstantes Kriterium der Bodenbewertung und ist mit vielen Bodeneigenschaften verknüpft [BLUM, 2007, S. 48; KUNTZE et al., 1994, S. 89; HARTGE & HORN, 2009, S. 28].

Die durch die Lagerung entstandenen Zwischenräume, welche mit Wasser, Luft, Pflanzwurzeln oder Mikroorganismen gefüllt sein können, bilden die Bodenporen (siehe Kapitel 2.1.2) [SCHEFFER et al., 2010, S. 171].

2.1.1.1 Kornfraktionen und Korngrößenverteilung

Die erste Einteilung eines Bodens erfolgt nach Kornfraktionen. Da die Körner in der Regel nicht kugelförmig sind, wird ein Äquivalentdurchmesser herangezogen. Dieser beschreibt bei

der Siebanalyse den Maschenabstand der Siebe bzw. entspricht er bei der Sedimentation dem doppelten Radius einer Kugel, welche mit gleicher Geschwindigkeit sinkt. Die beiden genannten Methoden zur Trennung der Korngrößen werden im nächsten Kapitel 2.1.1.2 näher beschrieben.

Die Einteilung erfolgt nach Intervallen von Zehnerpotenzen (logarithmischer Maßstab) in Zweierklassen mit dessen logarithmischer Mitte 6,3. Diese Einteilung ist notwendig um den breiten Korngrößenbereich von $<0,002$ mm bis >200 mm abdecken zu können.

Bei der Trennung der Korngrößen wird zunächst der Grobboden (Partikeldurchmesser >2 mm), auch Bodenskelett genannt, vom Feinboden (Partikeldurchmesser ≤ 2 mm) getrennt.

Der Feinboden ist für die Fragestellung dieser Arbeit von großer Bedeutung, da die Zwischenräume der Partikel ≤ 2 mm große Wassermengen, in Form von Adsorptions- und Kapillarwasser, gegen die Gravitation festhalten.

Die weitere Unterteilung des Feinbodens (siehe Tab. 2.1) erfolgt nach den Korngrößenfraktionen Sand (S; 2-0,063 mm), Schluff (U; 0,063-0,002 mm) und Ton (T; 2-0,2 μm). Im deutschsprachigen Raum hat sich für die Korngrößenverteilung des Feinbodens, das Synonym Bodenart durchgesetzt. Sind die drei Kornfraktionen Sand, Schluff und Ton in einem ausgewogenen Verhältnis vorhanden, wird der Boden als Dreikornngemenge oder Lehm (L) bezeichnet. Ein Zweikornngemenge hat hingegen eine dominierende Hauptfraktion und eine geringer vertretene Nebenfraktion. Die Bezeichnung erfolgt dann nach Hauptfraktion mit der Nebenfraktion als Beiwort (abgekürzt mit kleinem Buchstaben), z.B. sandiger Ton (sT) [SCHEFFER et al., 2010, S. 171ff; BLUM, 2007, S. 48f; KUNTZE et al., 1994, S. 89].

Äquivalentdurchmesser		Bezeichnung der Kornfraktionen		Symbol	
mm	μm	gerundet	eckig-kantig		
>200		Blöcke, Geschiebe			Grobboden (Bodenskelett)
200-63		Gerölle	Grobsteine	Kiese: G	
63-20		Grobkies	Mittelsteine	Steine: X	
20-6,3		Mittelkies	Feinsteine		
6,3-2		Feinkies	Grus		
2-0,063	2000-630	Grobsand	Sand	S	Feinboden
	630-200	Mittelsand			
	200-63	Feinsand			
0,063-0,002	63-20	Grobschluff	Schluff	U	
	20-6,3	Mittelschluff			
	6,3-2,0	Feinschluff			
$<0,002$	2,0-0,63	Grobton	Ton	T	
	0,63-0,2	Mittelton			
	$>0,2$	Feinton			

Tab. 2.1: Einteilung und Bezeichnung der Kornfraktionen
[verändert nach BLUM, 2007, S. 48]

Partikelzahl und Oberfläche je Gewichtseinheit (spezifische Oberfläche) stehen mit dem Korndurchmesser und der Fähigkeit Wasser zu binden in engem Zusammenhang. Beide verhalten sich zur Kornfraktion indirekt proportional (siehe Tab. 2.2).

Korn-Fraktion μm	Ungefähre Partikelzahl je g	Ungefähre spez. Oberfläche cm^2 je g
2000-200	$5 \cdot 10^2$	20
200-20	$5 \cdot 10^5$	200
20-2	$5 \cdot 10^8$	2000
2-0,2	$5 \cdot 10^{11}$	20000 = 2 m^2

Tab. 2.2: Beziehung zwischen Kornfraktion, Partikelzahl und spezifischer Oberfläche [verändert nach BLUM, 2007, S. 49]

Ein Feinboden mit hohem Sandanteil (großer Korndurchmesser) weist also eine gute Wasserführung und ein geringes Wasserhaltevermögen auf, wohingegen ein hoher Tonanteil (kleiner Korndurchmesser) eine schlechte Wasserführung, aber ein hohes Wasserhaltevermögen zur Folge hat [BLUM, 2007, S. 49f].

2.1.1.2 Methoden zur Trennung

Die gängigste Methode um die Korngrößenfraktionen zu trennen besteht aus zwei Verfahren, der Siebanalyse (Teilchen $>0,063$ mm) und der Sedimentation (Teilchen $\leq 0,063$ mm).

Beim Sieben wird der Anteil der Sandfraktionen einer Bodenprobe durch hin und her bewegen auf einem Rundloch- oder Maschendrahtsieb ermittelt. Dieses Verfahren ist aufgrund der, von einer Kugel abweichenden Formen, nicht immer leicht. Je größer der Äquivalentdurchmesser der Partikel, desto eher nähern sie sich der Form einer Kugel an.

Die Sedimentation oder Schlämmanalyse (zur Messung des Schluff- und Tonanteils) misst die gleichbleibende Sinkgeschwindigkeit der Partikel in einem sie umgebenden Medium. Die Geschwindigkeit ist abhängig von der Teilchengröße (je größer, desto schneller), der Dichtedifferenz zwischen den Teilchen und dem Medium, sowie dessen temperaturabhängiger Viskosität und Beschleunigung. Probleme können bei kleineren Körnern durch Brown'sche Bewegungen oder Konvektionsströmungen entstehen bzw. können größere Teilchen Turbulenzen verursachen [HARTGE & HORN, 2009, S. 30ff; SCHEFFER et al., 2010, S. 175; KUNTZE et al., 1994, S. 89].

2.1.1.3 Darstellung der Ergebnisse

Die Darstellung der Kornfraktionen erfolgt, da nicht als einzelne Zahl oder Bezeichnung möglich, als relativer Anteil, meistens in einer Körnungssummenkurve oder als Dreiecksdiagramm.

Die Körnungssummenkurve (siehe Abb. 2.1) liegt in einem Koordinatensystem, dessen y-Achse den Anteil der Fraktion in Prozent und dessen x-Achse die logarithmische Einteilung der Korngrößen beschreibt. Eingezeichnet wird, beginnend mit der größten Fraktion, nacheinander die jeweils nächst feinere Fraktion als Anteil des verbleibenden Restes. Die Kurve beginnt oben rechts (je nach maximal vorkommender Korngröße) und endet in der Regel bei der Korngröße von Mittelton, da das noch feinere Material sehr schwer feststellbar ist [HARTGE & HORN, 2009, S. 37f; KUNTZE et al., 1994, S. 89].

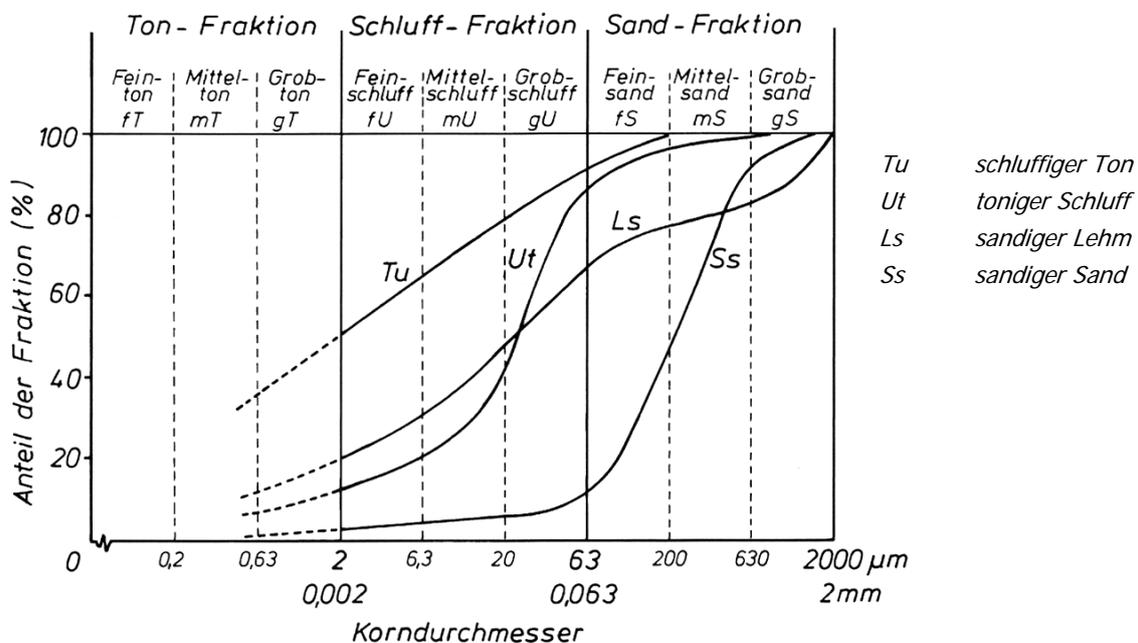


Abb. 2.1: Körnungssummenkurven von Feinböden
[SCHEFFER et al., 2010, S. 173]

Das Dreiecksdiagramm (siehe Abb. 2.2) hält sich an die Ober- und Untergrenzen der drei Kornfraktionen, welche in Tabelle 2.1 gezeigt werden. Die Unterteilung innerhalb der Fraktionen stimmt allerdings nicht überein. Die klar definierten Flächen ergeben gegenüber der Körnungssummenkurve zwar eine relative Ungenauigkeit, es wird jedoch, wegen deren Namensgebung durch das Dreiecksdiagramm, eine schnelle und einfache Bestimmung der Bodenart ermöglicht. In dem Diagramm wird auch Lehm (siehe auch 2.1.1.1) angeführt, obwohl er korrekterweise nicht als eigene Korngrößenfraktion gilt [SCHEFFER et al., 2010, S. 174; HARTGE & HORN, 2009, S. 38].

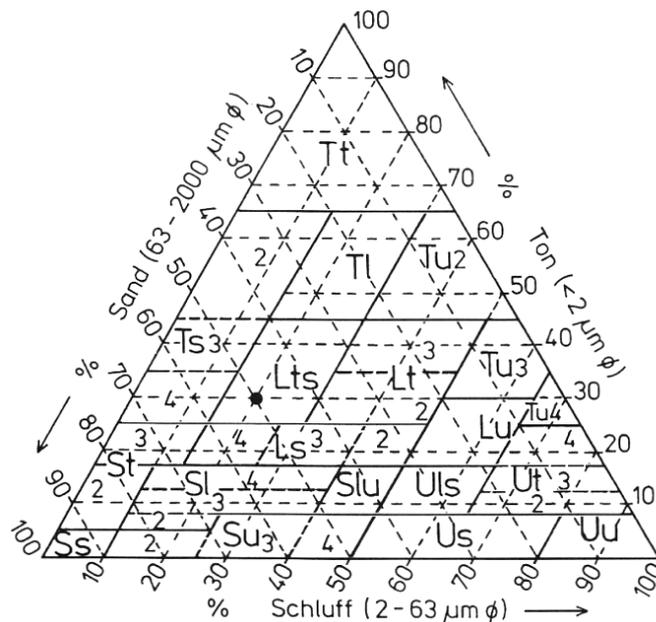


Abb. 2.2: Feinböden im Dreiecksdiagramm
[SCHEFFER et al., 2010, S. 174]

2.1.2 Bodemporen

Durch die Formenvielfalt der Einzelkörner und aufgrund physikalischer Kräfte ist es selbst bei dichtester Lagerung nicht möglich, den Bodenraum vollständig mit festem Material auszufüllen. Die dadurch entstehenden Zwischenräume bilden die Bodemporen. Da diese mit Wasser, Luft, Pflanzwurzeln oder Mikroorganismen gefüllt sind, beeinflussen sie Lebensvorgänge, Wechselwirkungen zwischen fester, flüssiger und gasförmiger Phase, sowie Transporte bzw. Verlagerungen im Boden [HASELSTEINER, 2007, S. 19f; SCHEFFER et al., 2010, S. 171].

Der Hohlraumanteil des gesamten Bodenvolumens wird als Porenanteil n oder Porenvolumen PV bezeichnet und entweder mit Hilfe der Volumina oder der Dichtewerte (siehe Kapitel 2.1.3) wie folgt berechnet [HASELSTEINER, 2007, S. 20; SCHEFFER et al., 2010, S. 179]:

$$PV = n = \frac{V_p}{V_p + V_{\text{fest}}} = \frac{V_p}{V_{\text{ges}}} = 1 - \frac{\rho_B}{\rho_F} \quad [\%]$$

V_p Porenvolumen [m^3]

V_{fest} Feststoffvolumen [m^3]

V_{ges} Gesamtvolumen [m^3]

ρ_F Feststoffdichte [g/cm^3]

ρ_B Dichte des Gesamtvolumens [g/cm^3]

Für die Durchlässigkeit eines Bodens bzw. bei Veränderungen des Gefüges ist die Porenziffer PZ bzw. ε dem Porenvolumen vorzuziehen. Sie kann mit Hilfe der Porosität n , dem Verhältnis von Porenvolumen zu Feststoffvolumen oder über die Feststoffdichte ρ_F und die Dichte des Gesamtvolums ρ_B (siehe Kapitel 2.1.3) ermittelt werden [HASELSTEINER, 2007, S. 20; HARTGE & HORN, 2009, S. 57; SCHEFFER et al., 2010, S. 179].

$$PZ = \varepsilon = \frac{n}{(1 - n)} = \frac{V_P}{V_{fest}} = \frac{\rho_F}{\rho_B} - 1 \quad [-]$$

n	<i>Porenanteil [%]</i>
V_P	<i>Porenvolumen [m^3]</i>
V_{fest}	<i>Feststoffvolumen [m^3]</i>
ρ_F	<i>Feststoffdichte [g/cm^3]</i>
ρ_B	<i>Dichte des Gesamtvolumens [g/cm^3]</i>

In Tabelle 2.3 sind die jeweiligen Schwankungsbereiche der Lagerungsdichte (siehe Kapitel 2.1.3), des Porenvolumens und der Porenziffer in Bezug auf die Bodenart ersichtlich. Hierbei ist zu erkennen, dass sich das Porenvolumen indirekt proportional zur Korngröße verhält. PV-Werte <30% werden nur sehr selten festgestellt, bei Mineralböden gelten schon PV-Werte <40% als absolut verdichtet und Tonböden können PV-Werte bis 70% aufweisen, wegen dem hohen Feinporenanteil aber nur schlecht Wasser und Luft transportieren. Deshalb ist das Porenvolumen alleine nicht dazu geeignet auf bodenphysikalische Eigenschaften zu schließen [KUNTZE et al., 1994, S. 161f].

Bodenart	Lagerungsdichte [$g\ cm^{-3}$]	Porenvolumen [%]	Porenziffer [-]
Sand	1,16 - 1,70	36 - 56	0,56 - 1,27
Schluff	1,17 - 1,63	38 - 56	0,62 - 1,27
Ton	0,93 - 1,72	35 - 65	0,54 - 1,85
Lehm	1,20 - 2,00	30 - 55	0,43 - 1,22

Tab. 2.3: Schwankungsbereiche von Lagerungsdichte, Porenvolumen und Porenziffer [verändert nach SCHEFFER, 2010, S. 180]

Für hydrogeologische Untersuchungen spielen die Porengrößen und deren Verteilung eine wichtige Rolle. Die Grenzen der Porengrößenbereiche richten sich nach hydrogeologischen Funktionen, sodass den unterschiedlichen Porengrößenbereichen auch unterschiedliche Eigenschaften anhaften (siehe Tab. 2.4). Diese werden im Kapitel 2.1.4 näher erläutert.

Porenbereich	Poren Ø (µm)	Porenfunktion		Anteil in Sanden (%)	Anteil in Schluffen (%)	Anteil in Tonen (%)
Feinporen	< 0,2	Totwasser	PWP ¹	2 - 8	10 - 20	25 - 45
Mittelporen	0,2 - 10	pflanzenverfügbar	} nFK ²	2 - 12	8 - 22	5 - 15
Grobporen	eng 10 - 50	langsam dränend				
	weit > 50	schnell dränend	LK ³	20 - 40	5 - 25	3 - 13

Tab. 2.4: Funktionen und Anteile in Bodenarten der Porenbereiche
[verändert nach KUNTZE et al., 1994, S. 168f und SCHEFFER et al., 2010, S. 181]
¹ permanenter Welkepunkt, ² nutzbare Feldkapazität, ³ Luftkapazität

In der Tabelle ist zu erkennen, dass Tone den größten Feinporen- und geringsten Grobporenanteil aufweisen, während bei Sanden das Gegenteil der Fall ist. Schluffe weisen eine relativ gleichmäßige Verteilung der Porenbereiche auf.

Da Pflanzwurzeln nicht in Feinporen eindringen können und somit das darin befindliche Wasser der Aufnahme nur unter bestimmten Bedingungen zur Verfügung steht, wird es als Totwasser bezeichnet. In Grobporen ist Wasser in der Regel nur kurz vorhanden, weshalb sie für die Belüftung des Bodens eine entscheidende Rolle spielen. Die Wasseraufnahme durch Pflanzwurzeln findet demnach hauptsächlich in Mittelporen statt [HASELSTEINER, 2007, S. 98; SCHEFFER et al., 2010, S. 181].

2.1.3 Bodendichte

Die Dichte gibt das Verhältnis von Masse zum Volumen an. Bei Bodenuntersuchungen bzw. -beurteilungen gibt es aufgrund der Hohlräume und deren Wassersättigungsgrad keine allgemein gültige Bodendichte, sondern unterschiedliche Dichtewerte, welche einen variablen Gefügestand beschreiben [HARTGE & HORN, 2009, S. 43].

- Feststoffdichte ρ_f (spezifisches Gewicht, Korndichte):

Die Feststoffdichte lässt sich aus dem Verhältnis von Feststoffmasse zu Feststoffvolumen berechnen. Die Hohlräume werden hierbei nicht berücksichtigt.

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} \quad [\text{g/cm}^3]$$

m_f Feststoffmasse [g]

V_f Feststoffvolumen [cm³]

Für mineralische Bodensubstanz gelten Werte von 2,60 bis 2,75 g/cm³. Als Mittelwert wird mit 2,65 g/cm³ die Feststoffdichte von Quarz herangezogen [BLUM, 2007, S. 58].

- Lagerungsdichte ρ_d (Trockendichte, Volumengewicht):

Bei der Lagerungsdichte werden die Hohlräume in der Berechnung berücksichtigt. Hierfür wird das Verhältnis der getrockneten Feststoffmasse zum Gesamtvolumen herangezogen. Bei mineralischen Böden sind Werte von 1,1 bis 1,8 g/cm³ üblich [BLUM, 2007, S. 58].

$$\rho_d = \frac{m_f}{V_g} \quad [\text{g/cm}^3]$$

m_f Feststoffmasse [g]

V_g Gesamtvolumen [cm³]

Die Lagerungsdichte hat auch Auswirkungen auf die durchwurzelbarkeit eines Bodens. So begünstigt eine hohe Lagerungsdichte bei Sanden das Wurzelwachstum, im Gegensatz dazu kann sie bei Schluffen zu Wachstumsschäden führen [KUNTZE et al., 1994, S. 160].

- Proctordichte ρ_{Pr} :

Die Proctordichte beschreibt die, durch einen bestimmten Wassergehalt beeinflusste, größtmögliche Lagerungsdichte eines Bodens. Um diese zu erreichen wird der Boden in mindestens fünf Einzelversuchen, deren Proben sich durch den Wassergehalt unterscheiden, in einem Versuchszylinder mit einem Fallgewicht verdichtet.

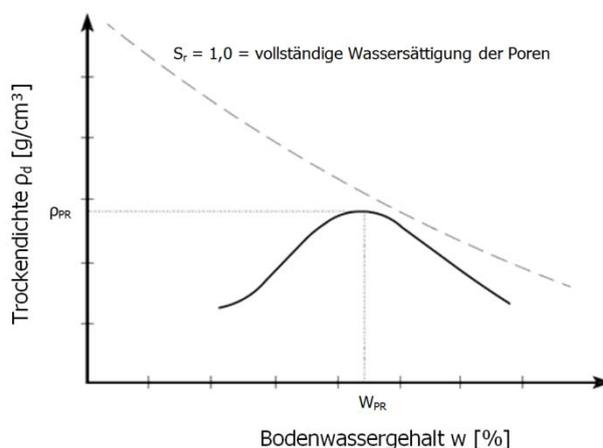


Abb. 2.3: Proctorkurve und Sättigungskurve
[verändert nach SOOS, 2001, S. 142]

Die Ergebnisse dieser Proctorversuche werden als Punkte in ein Diagramm mit Bodenwassergehalt als x-Achse und Lagerungsdichte als y-Achse eingetragen und miteinander verbunden (siehe Abb. 2.3). Die dadurch entstehende Kurve ist eine Annäherung an die maximal mögliche Lagerungsdichte (= Proctordichte ρ_{Pr}) und an die vollständige Wassersättigung der Poren, bei dem dafür optimalen Wassergehalt. S_r gibt den Anteil an wassergesättigten Poren an, wobei ein S_r -Wert von 1,0 eine Porensättigung von 100% ergibt.

Wie in der Abbildung zu erkennen, wirkt sich der Wassergehalt stark auf die Verdichtbarkeit bindiger Böden aus. So lassen sich weder zu trockene, noch wassergesättigte Böden vollkommen verdichten. Während ein zu niedriger Wassergehalt den verdichteten Boden nachträglich Wasser aufnehmen lassen kann, verhindert ein zu hoher Wassergehalt eine Verlagerung der Bodenpartikel. Dies macht eine weitere Komprimierung des Porenraums, also Verdichtung, unmöglich. Die Proctorversuche sind eine Annäherung an die maximal mögliche Lagerungsdichte [DIN 18127/1997; SOOS, 2001, S. 142f].

- Verdichtungsgrad D_{Pr} :

Der Verdichtungsgrad D_{Pr} gibt das Verhältnis von Lagerungsdichte ρ_d zu Proctordichte ρ_{Pr} an.

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \quad [\%]$$

ρ_d Lagerungsdichte [g/cm^3]

ρ_{Pr} Proctordichte [g/cm^3]

Dieser Wert ist besonders für Arbeiten im Erdbau von Relevanz, da hier häufig Verdichtungsgrade $\geq 95\%$ benötigt werden. Da die Proctordichte nur eine Annäherung an einen Maximalwert ist und diese im Labor stattfindet, sind bei Erdarbeiten Werte über 100% möglich [DACHROTH, 2002, S. 108; SIMMER, 1994, S. 119].

2.1.4 Bodenwasser

Wasser spielt für den Boden eine sehr wichtige Rolle. Schon bei der Bodenentwicklung beschleunigt Wasser sowohl physikalische (z.B. durch Frostsprengung) als auch chemische Verwitterungsprozesse (Reaktion mit anorganischen und organischen Säurebildnern, etc.). Desweiteren werden mit dem Bodenwasser Stoffe transportiert (Eintrag, Verlagerung, Auswaschung), was sowohl Auswirkungen auf die Bodenmatrix und deren Eigenschaften, als auch auf Mikroorganismen und Pflanzen hat [EHLERS, 1996, S. 22].

Der Kreislauf der Wassergehaltsänderungen, bestehend aus Niederschlag, Oberflächenabfluss und Verdunstung, wird als Bodenwasserhaushalt bezeichnet. Dieser Kreislauf wird nach KUNTZE et al. [1994, S. 185f] und EHLERS [1996, S. 28] in folgender Gleichung beschrieben:

$$N = E + I + T + A + \Delta R = ET + A + \Delta R$$

<i>N</i>	<i>Niederschlag</i>
<i>E</i>	<i>Evaporation</i>
<i>I</i>	<i>Interzeption</i>
<i>T</i>	<i>Transpiration</i>
<i>ET</i>	<i>Evapotranspiration (Gebietsverdunstung)</i>
<i>A</i>	<i>Abfluss</i>
<i>ΔR</i>	<i>Änderung des Wasserspeichers</i>

Da Interzeptionsverdunstung, Evaporation und Transpiration sehr schwer separat messbar sind, werden sie meistens als Evapotranspiration zusammengefasst (siehe Kapitel 2.2.1).

2.1.4.1 Arten von Bodenwasser

Wie in Abbildung 2.4 zu erkennen, kann Niederschlagswasser oberflächlich abfließen bzw. verdunsten oder in den Boden sickern. Dieses infiltrierte Wasser wird als Haftwasser (Adsorptions- und Kapillarwasser) vom Boden aufgenommen oder fließt als Sickerwasser ins Grund- oder Stauwasser.

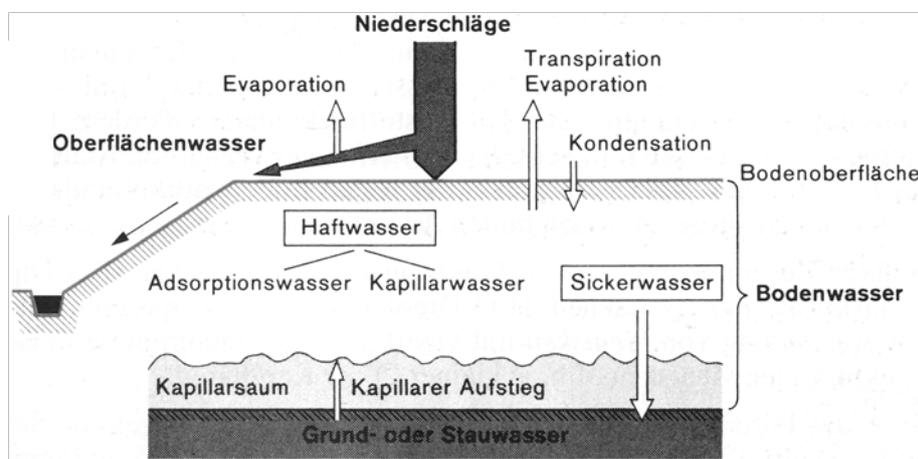


Abb. 2.4: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser
[BLUM, 2007, S. 41]

Haftwasser wird gegen die Gravitation im Boden festgehalten, als Adsorptionswasser an festen Bodenpartikeln (durch Adsorptionskräfte) oder als Kapillarwasser in Bodenporen bzw. Kapillaren (durch Kohäsions- und Adhäsionskräfte).

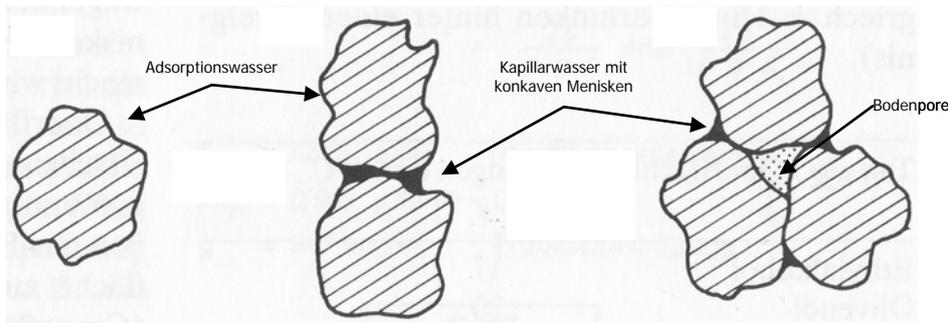


Abb. 2.5: Bindungsformen des Haftwassers
[verändert nach KUNTZE et al., 1994, S. 163 und EHLERS, 1996, S. 26]

In Abbildung 2.6 wird das Auftreten von Kapillarwasser in Bodenporen mit Hilfe eines Rohres im Wasserbad simuliert. Beim Eintauchen wird das Wasser durch die wirkenden Adhäsionskräfte, dem kapillaren Aufstieg im Boden entsprechend, nach oben gezogen und haftet an der Innenwand des Rohres, wie Adsorptionswasser an Bodenpartikeln. Durch die Kohäsionskräfte werden die Wassermoleküle zusammengehalten, wobei der Unterdruck in der Säule, hervorgerufen durch die Schwerkraft, zu einer konkaven Krümmung der Wasseroberfläche führt.

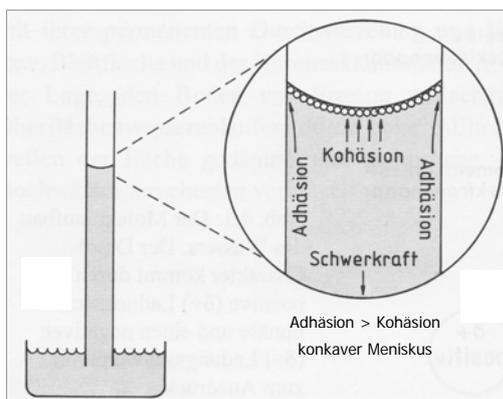


Abb. 2.6: Erscheinung der Kapillarität eines Rohres im Wasserbad
[verändert nach EHLERS, 1996, S. 32 und KUNTZE et al., 1994, S. 162]

Stauwasser ist eine Sonderform des Grundwassers. Es entsteht oberhalb der Stauwassersohle im Stauwasserleiter, wenn die Niederschläge höher als die Gebietsverdunstung sind [BLUM, 2007, S. 40; KUNTZE et al., 1994, S. 188ff; EHLERS, 1996, S. 32].

2.1.4.2 Bodenwassergehalt

Die Bestimmung des Bodenwassergehalts ist für diverse Bodenuntersuchungen, wie z.B. Wasserbewegungen (Infiltration, Kapillaraufstieg, etc.), pflanzenverfügbare Wassermengen, von Klima und Pflanzen abhängiger Wasserhaushalt, sowie für zahlreiche Berechnungen (Lagerungsdichte, Porenvolumen, Porenziffer, etc.) von großer Bedeutung.

Die gängigste Methode zur Wassergehaltsbestimmung eines Bodens ist die gravimetrische Bestimmung. Hierbei wird die feuchte Bodenprobe gewogen und danach der Gewichtsverlust durch Trocknen im Trockenschrank bei 105° C mit einer Genauigkeit von 0,1% (i.d.R. 0,01 g) der Gesamtprobe gemessen.

Das Ergebnis wird, um verschiedene Proben vergleichen zu können, in Bezug auf die Bodenmenge als Gewichtseinheit (Massenwassergehalt w_{gw}) oder als Volumeneinheit (Gewichts- bzw. Volumenprozent) angegeben und wie folgt berechnet [HARTGE & HORN, 2009, S. 21ff, HASELSTEINER, 2007, S. 21f]:

$$w_{gw} = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m - m_d}{m_d}$$

w_{gw} *Massenwassergehalt*

m_w *Masse des Wassers [g]*

m_d *Masse der trockenen Probe [g]*

m *Masse der feuchten Probe [g]*

Gewichtsprozent:

$$\text{Gew\%} = w_{gw} \cdot 100 = \frac{m - m_d}{m_d} \cdot 100 \quad [\%]$$

Volumenprozent:

$$\text{Vol\%} = \text{Gew\%} \cdot \rho_d \quad [\%]$$

ρ_d *Lagerungsdichte*

Da diese Methode auf das Labor beschränkt ist, gibt es mehrere Verfahren ohne Trocknung. Eine dieser Methoden misst die Dielektrizitätskonstante mit Hilfe von im Boden eingebauten TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry). Hierbei wird stetig der Bodenwassergehalt gemessen und an einen Datenlogger gesendet (siehe Abschnitt 3.2.1) [HARTGE & HORN, 2009, S. 26].

2.1.4.3 Potentialkonzept

In einem Boden herrschen viele Kräfte, die Einfluss auf die Wasserbewegungen im Boden haben (siehe Kapitel 2.1.4.1). Da deren Größe, Richtung und Ansatzpunkte in einem heterogenen System schwer definierbar sind, wird anstelle der Kräfte in der Regel die Arbeitsfähigkeit (das Potential) herangezogen.

Das Potential entspricht also der Arbeit, welche notwendig ist um Wasser zu bewegen (Dränung, Infiltration, kapillarer Aufstieg). Diese Bewegung findet aufgrund des entstandenen Energiegefälles stets von Punkten höheren zu denen niedrigen Potentials statt und endet, wenn das Gesamtpotential an allen Stellen ausgeglichen ist (energetisches Gleichgewicht). Die folgende Formel beschreibt das Potential des Bodenwassers:

$$\psi = m \cdot g \cdot h$$

ψ	<i>Potential des Bodenwassers</i>
m	<i>Masse des Wassers</i>
g	<i>Erdbeschleunigung</i>
h	<i>Höhe über Grundwasserspiegel</i>

Da die meisten Messgeräte nur Teilpotentiale erfassen können, wird eine Annäherung an das Gesamtpotential, wie in folgender Gleichung zu erkennen, als Summe der vorkommenden Teilpotentiale berechnet [SCHEFFER et al., 2010, S. 223f; KUNTZE et al., 1994, S. 173f]:

$$\Psi_g = \Psi_z + \Psi_m + \Psi_o$$

Ψ_g	<i>Gesamtpotential</i>
Ψ_z	<i>Gravitationspotential</i>
Ψ_m	<i>Matrixpotential</i>
Ψ_o	<i>osmotisches Potential (nur in salzhaltigen Böden relevant)</i>

Da für die Aufgabenstellung dieser Masterarbeit das Matrixpotential von besonderer Bedeutung ist, wird im folgenden Abschnitt näher darauf eingegangen.

2.1.4.4 Matrixpotential

Das Matrixpotential umfasst alle Einflüsse auf das Wasser in ungesättigten Böden, welche auf die Oberflächen der anorganischen und organischen Bodenteilchen (die Bodenmatrix) zurückzuführen sind. So ist in einem relativ trockenen Boden das Matrixpotential, also die Kraft, die das Wasser bindet, aufgrund der Saugspannung höher als in feuchteren Böden. Abbildung 2.7 zeigt die Potentialverteilung von Bodenwasser im Gleichgewicht (anhand einer Bodensäule). Dieses Gleichgewicht ist erreicht, wenn kapillar aufsteigendes Wasser zum Stillstand kommt und das Gesamtpotential ψ_g überall in der Bodensäule gleich hoch ist. Da das Matrixpotential ψ_m gegen die Schwerkraft ψ_z wirkt und Energie zugeführt werden muss um Wasser zu bewegen, wird das Matrixpotential stets als negativer Wert angegeben. Soll hingegen der Betrag des Matrixpotentials hervorgehoben werden, wird er als Wasserspannung oder Tension bezeichnet und nimmt einen positiven Wert (pF-Wert, hPa, cm WS) an. Die Kurve in der Mitte der Abbildung stellt den volumetrischen Wassergehalt Θ dar [EHLERS, 1996, S. 36ff; KUNTZE, 1994, S. 166-175; SCHEFFER et al., 2010; S. 224].

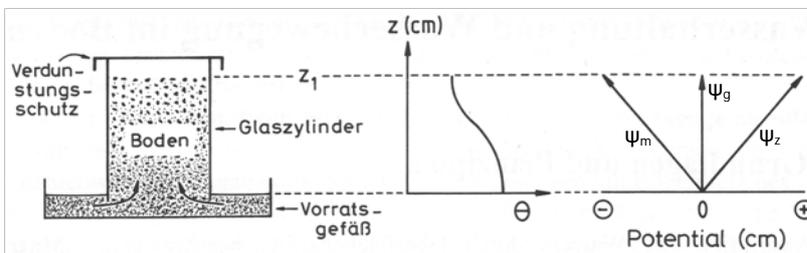


Abb. 2.7: Potentialverteilung
[verändert nach EHLERS, 1996, S. 37]

Da die vorkommenden Saugspannungen im Boden, Werte von 0 bis 10^7 hPa (pF $-\infty$ bis 7) annehmen können, wird der pF-Wert (pF = Potential freier Energie) als dekadischer Logarithmus der Saug- bzw. Wasserspannung (in hPa bzw. cm Wassersäule), wie folgt angegeben [KUNTZE et al., 1994, S. 166; BLUM, 2007, S. 43]:

$$\text{pF} = \log \quad [\text{hPa, cm WS}]$$

Die nachstehende Tabelle zeigt die in der Formel beschriebene Relation zwischen pF-Wert, Saugspannung und Wassersäule und umfasst deren gebräuchliche Mittelwerte.

pF-Wert	Saugspannung in hPa	cm Wassersäule
pF 1	10	10
pF 2	100	100
pF 3	1000	1000
pF 4	10000	10000
...

Tab. 2.5: Umrechnungstabelle von pF-Wert, Saugspannung und Wassersäule
[verändert nach Kuntze, 1994, S. 166]

Abbildung 2.8 zeigt sowohl die Beziehung des Matrixpotentials bzw. der Wasserspannung zum Wassergehalt, als auch zu Körnung und Porengrößenverteilung (Bodenart).

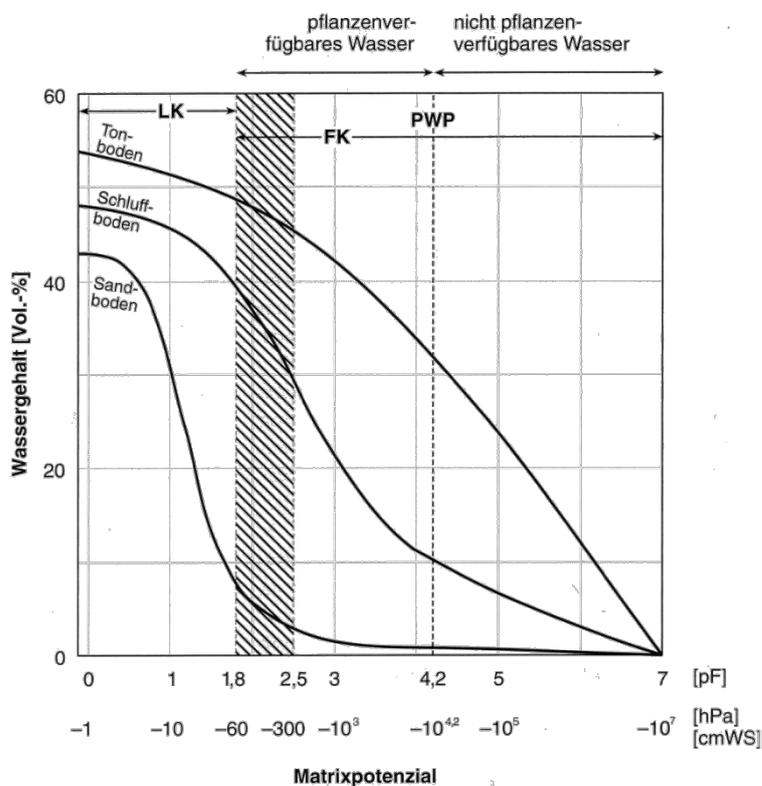


Abb. 2.8: Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt
[SCHEFFER et al., 2010, S. 228]

Die Wasserspannung wird also nicht nur vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst, sondern auch von dessen Korngrößen- und Porenverteilung. So bewirkt ein zunehmender Tonanteil bei gleich bleibendem Wassergehalt eine erhöhte Saugspannung, da sich die Bindungskräfte indirekt proportional zu Wassergehalt und Porendurchmesser verhalten [SCHEFFER et al., 2010, S. 224].

Desweiteren befindet sich das pflanzenverfügbare Wasser zwischen zwei statischen Werten, der Feldkapazität (FK) und dem permanenten Welkepunkt (PWP).

Die Feldkapazität beschreibt den Wassergehalt, welcher nach einem Starkregenereignis gegen die Schwerkraft mit Hilfe der Adhäsionskräfte gehalten werden kann (= maximale Haftwassermenge). Dieser Wert wird in der Regel zwei Tage nach dem Ereignis gemessen, um überschüssiges Gravitationswasser aus der Messung auszuschließen. Der FK-Wert schwankt je nach Bodenart zwischen pF 1,8 und 2,5 bzw. 60 und 300 hPa, wobei Sandböden niedrigere FK-Werte aufweisen als Schluff- und Tonböden.

Der permanente Welkepunkt liegt bei pF 4,2 bzw. 15000 hPa. Werte über dem permanenten Welkepunkt binden das Restwasser so stark an die Oberflächen der Bodenteilchen, dass es von Pflanzenwurzeln nicht mehr aufgenommen werden kann, weshalb es auch als Totwasser bezeichnet wird [EHLERS, 1996, S. 39].

Das zwischen Feldkapazität und permanentem Welkepunkt im Boden gespeicherte Wasser, wird nutzbare Feldkapazität (nFK) genannt, da nur dieser Anteil des Wassers pflanzenverfügbar ist [KUNTZE et al., 1994, S. 168 und 188].

Die Luftkapazität (LK) schwankt in Abhängigkeit von Porenvolumen und Wassergehalt der Feldkapazität sehr stark. Hierbei wird Wasser nur für kurze Dauer gehalten und sickert relativ schnell ab [BLUM, 2007, S. 47].

Das Matrixpotential kann mit Hilfe von Tensiometern bestimmt werden. Diese messen über eine mit destilliertem Wasser gefüllte, poröse Zelle und einem daran angeschlossenen Manometer den Druck (positiv oder negativ), welcher beim Ausgleich der Feuchteunterschiede zwischen Tensiometerzelle und Boden zustande kommt (siehe 3.2.2) [KUNTZE et al., 1994, S. 169].

2.1.4.5 Wasserbewegung im Boden

Wie bereits in Abschnitt 2.1.4.3 beschrieben, bewegt sich Wasser im Boden stets von Punkten hohen zu Punkten niedrigen Potentials. Geschwindigkeit und Wassermenge werden durch das Potentialgefälle zweier Punkte und durch die Permeabilität (Wasserdurchlässigkeit bzw. -leitfähigkeit) des Bodens beeinflusst. Diese Bewegung wird in der Gleichung von Henry Darcy [HÖLL & NIESSNER, 2010, S. 22] beschrieben:

$$Q = k_f \cdot F \cdot i \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Q	Durchflussmenge
k_f	Durchlässigkeitskoeffizient
F	durchströmte Fläche
i	hydraulischer Gradient (Potentialgefälle)

Die Durchflussmenge Q bewegt sich aufgrund des Potentialgefälles i pro Zeiteinheit durch eine Fläche F . Die Permeabilität des Bodens wird durch den Durchlässigkeitskoeffizienten k_f ausgedrückt, welcher der Geschwindigkeit der Wasserbewegung bei einem Potentialgefälle von 1 entspricht [SCHEFFER et al., 2010, S. 229; BLUM, 2007, S.45].

Den unterschiedlichen Bodenarten können bestimmte k_f -Werte zugeordnet werden. Diese sind in folgender Abbildung ersichtlich:

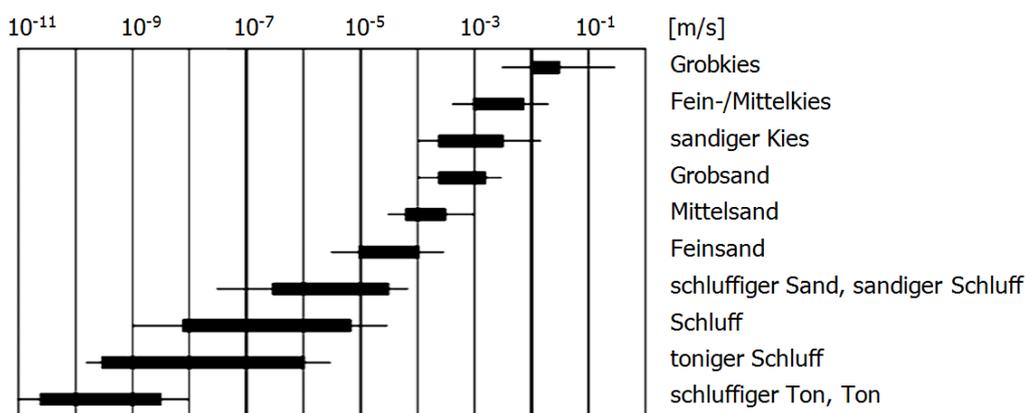


Abb. 2.9: k_f -Werte nach Bodenarten
[verändert nach ABW OIKOARTEC GMBH, 2011, S. 1]

Bei wassergesättigten Böden wird die Permeabilität durch die Menge, Größenverteilung und Kontinuität der Poren und folglich auch durch Körnung und Gefüge des Bodens bestimmt. Je größer der Anteil an Grobporen guter Kontinuität, desto stärker ist die Wasserleitfähigkeit. Sande haben mit Werten über 5 cm/h die beste und Tone mit Werten unter 0,5 cm/h die schlechteste Durchlässigkeit. Als Richtwert wird häufig die Permeabilität eines Lehmbodens mit ca. 2 cm/h herangezogen.

In ungesättigtem Zustand ist die Permeabilität vom Wassergehalt und der entsprechenden Saugspannung abhängig. Da mit steigender Saugspannung der Einfluss des Potentialgefälles abnimmt, sinkt mit dem Wassergehalt auch die Geschwindigkeit der Permeabilität. Zunächst entleeren sich die Grobporen relativ rasch, bis sich die Durchlässigkeit schließlich auf immer kleinere Poren und letztendlich auf Adsorptionswasser reduziert.

2.2 Vegetationsparameter

2.2.1 Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Pflanze aus dem Boden erfolgt über ein Wasserpotentialgefälle (hervorgerufen durch Transpiration), welches zwischen der Wurzeloberfläche und dem umgebenden Boden vorherrscht. Das Wasser gelangt nun von der Wurzeloberfläche über die jungen Wurzelspitzen, insbesondere über die Wurzelhaare der Feinwurzeln (Durchmesser <2 mm), oder durch die Exodermiszellen älterer Wurzelabschnitte in die Wurzel und in weiterer Folge über die Wasserleitungsbahnen des Xylems in die Blätter. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass fast ausschließlich das Wasser der kapillaren Bodenhohlräume für die Pflanze verfügbar ist, da die maximale Saugspannung der Wurzeln ca. 1500 kPa (15 bar) beträgt, das Haftwasser aber mit mehr als 4900 kPa an die Bodenkolloide gebunden ist und das Sickerwasser häufig zu schnell absinkt um es aufnehmen zu können [EHLERS, 1996, S. 77ff; LYR et al., 1992, S. 147ff; STAHR et al., 2008, S. 247].

Nach EHLERS [1996, S. 109ff] wird die Wasseraufnahmerate durch die potentielle Evapotranspiration ET_p , den Blattflächenindex, den Bodenwassergehalt, das Matrixpotential des Bodens, die Bodenleitfähigkeit und die Wurzellängendichte bzw. die relative Verteilung der Wurzeln bestimmt. Daraus ergibt sich für die Berechnung der maximalen Wasseraufnahmerate WAS_{max} einer Bodenschicht folgende Gleichung:

$$WAS_{max} = b \cdot ET_p \cdot \left(\frac{WL}{SWL}\right)^2$$

WAS_{max}	<i>maximale Wasseraufnahmerate</i>
b	<i>Regressionskoeffizient</i>
ET_p	<i>potentielle Evapotranspiration [mm/Tag]</i>
WL	<i>Wurzellänge der Bodenschicht [cm/cm² Bodenoberfläche]</i>
SWL	<i>Gesamtwurzellänge [cm/cm²]</i>

Aus dieser Formel lässt sich die maximale Wasseraufnahmerate pro Bodenvolumen WA_{max} wie folgt ableiten:

$$WA_{\max} = b \cdot ET_p \cdot L_v^{\frac{1}{2}} \cdot SWL^{\frac{-1}{2}}$$

WA_{\max}	<i>maximale Wasseraufnahmerate pro Bodenvolumen [cm³ Wasser/cm³ Boden/Tag]</i>
b	<i>Regressionskoeffizient</i>
ET_p	<i>potentielle Evapotranspiration [mm/Tag]</i>
L_v	<i>Wurzellängendichte [cm/cm³ Boden]</i>
SWL	<i>Gesamtwurzellänge [cm/cm²]</i>

2.2.2 Evapotranspiration

Der Wasserhaushalt eines Standortes wird hauptsächlich von den Faktoren Klima, Relief, Boden und Vegetation geprägt. Wie bereits in Kapitel 2.1.4 beschrieben, wird die Wasserbilanz durch folgende Gleichung ausgedrückt:

$$N = ET + A + \Delta R \quad \rightarrow \quad A + \Delta R = N - ET$$

N	<i>Niederschlag</i>
ET	<i>Evapotranspiration</i>
A	<i>Abfluss</i>
ΔR	<i>Änderung des Wasserspeichers</i>

Die abgeänderte Gleichung zeigt den Einfluss der Vegetation auf den Wasserhaushalt eines Standortes. Es wird verdeutlicht, dass bei gleichbleibendem Niederschlag der Abfluss eines Bodens ohne seitlichen Eintrag ins Profil und die entsprechende Änderung des Wasserspeichers nur von der Evapotranspiration abhängig ist [BRECHTEL & HAMMES, 1985, S. 110ff].

Die Evapotranspiration setzt sich aus den folgenden drei Verdunstungsprozessen zusammen: der Interzeptionsverdunstung (durch oberirdische Pflanzenteile aufgefangenes Niederschlagswasser), der Evaporation (unproduktive Bodenverdunstung) und der Transpiration (produktive Pflanzenverdunstung). Bei jedem dieser Vorgänge wird Wasser, welches hauptsächlich als Niederschlag dem Standort zugeführt wurde, in gasförmigem Zustand an die Atmosphäre zurückgegeben [EHLERS, 1996, S. 28].

Dass diese drei Prozesse parallel ablaufen und deshalb nur schwer separat messbar sind, zeigt die folgende Abbildung:

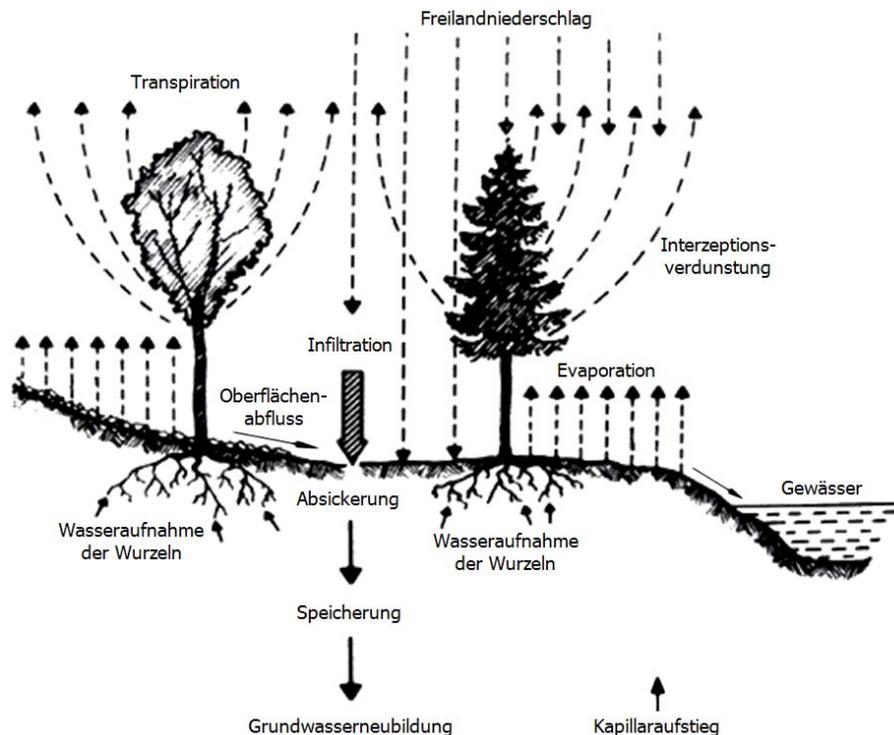


Abb. 2.10: Wasserhaushalt von Boden, Pflanze und Atmosphäre
[verändert nach BRECHTEL & HAMMES, 1985, S. 112]

Durch Interzeption wird Niederschlag an Pflanzenoberflächen aufgefangen, vorübergehend gespeichert und verdunstet ohne zur Bodenoberfläche zu gelangen, wodurch die Verschlammung und Oberflächenverdichtung des Bodens minimiert wird. Sie ist primär abhängig von dem Bestandesalter, der Vegetationsdichte, der Aufbauform, den Blattoberflächen und der Jahreszeit.

Die Interzeptionskapazität beschreibt das von Pflanzen maximal zurückgehaltene Wasser in Millimeter pro Einzelregen. Hierbei gelten für Buchen Werte von 5-6 mm und für Fichten 10-12 mm, während die Interzeptionskapazität bei Gräsern nur Werte von 1-1,5 mm ergibt.

Die Interzeptionsverdunstung wird in Prozent des Freilandniederschlags angegeben und liegt bei immergrünen Nadelbaumarten ganzjährig bei 30-40%, wohingegen manche winterkahle Laubbaumarten in der Vegetationsruhe 10-20% und während der Vegetationszeit 20-30% Interzeptionsverdunstung aufweisen [BRECHTEL & HAMMES, 1985, S. 113ff].

Das Verdampfen von Wasser an oder nahe der feuchten Bodenoberfläche wird als Evaporation bezeichnet. Dieser Vorgang setzt ein Dampfdruckdefizit, das Zuführen von Energie (hauptsächlich Strahlungsenergie) und/oder Konvektion (Luftbewegungen) voraus. Da bei der Evaporation durch den Wasserverbrauch, im Gegensatz zur Transpiration, keine Nettoproduktivität stattfindet, wird sie auch unproduktive Verdunstung genannt [EHLERS, 1996, S. 51].

Transpiration ist die Verdunstung durch Pflanzenaktivität. Ein Großteil des über die Wurzeln aufgenommenen Wassers wird während der Photosynthese in gasförmigem Zustand über die Spaltöffnungen der Blätter wieder abgegeben. Dadurch entsteht wiederum ein bis in die Wurzeln reichender Unterdruck, welcher als Transpirationssog bezeichnet wird [EHLERS, 1996, S. 83; SCHOPFER & BRENNICKE, 2010, S. 318f].

Da die Menge der Wasserdampfabgabe hauptsächlich von der Anzahl an Spaltöffnungen und somit von der Summe der Blattflächen abhängt, kann die Transpirationsrate pro Bodenfläche mit dem Blattflächenindex (BFI) berechnet werden. Dieser drückt das Verhältnis zwischen Blattfläche und Bodenfläche aus, wobei der kritische Blattflächenindex den Punkt angibt, an dem der Boden komplett mit Blattfläche bedeckt ist und somit die Transpirationsrate pro Einheit Bodenfläche nicht weiter steigen kann [EHLERS, 1996, S. 107].

Bei der Evapotranspiration wird zwischen aktueller Evapotranspiration ET_a und potentieller Evapotranspiration ET_p unterschieden.

Die aktuelle oder reale Evapotranspiration ET_a ist die tatsächliche Verdunstung einer bepflanzten Fläche, deren Wasserbilanz durch die real vorherrschenden Bedingungen (Pflanzenart, Bestandesdichte, Wasserspeicher, etc.) beeinflusst wird:

$$ET_a = E_a + E_i + T_a$$

ET_a *aktuelle Evapotranspiration*

E_a *Evaporation*

E_i *Interzeptionsverdunstung*

T_a *Transpiration*

Die potentielle Evapotranspiration ET_p beschreibt die maximal mögliche Verdunstung eines Standortes, bei optimaler Wasserversorgung und in Abhängigkeit von Temperatur, Strahlung, Wind und Luftfeuchte, allerdings ohne die vorhandene Vegetation einzubeziehen [NACHTNEBEL, 2009, S. 71; DIETRICH & SCHÖNIGER, 2011].

2.2.3 Verfahren zur Bestimmung der Evapotranspiration

2.2.3.1 Lysimeter

Für die direkte Bestimmung der Evapotranspiration werden vorwiegend Lysimeter verwendet. Hierbei handelt es sich um Messgeräte, welche ein seitlich geschlossenes System bilden und somit den horizontalen Wassereintrag bzw. -abfluss verhindern, aber vertikale Wasser-

bewegungen ermöglichen. Durch die Aufzeichnung von Niederschlag bzw. Bewässerung, durch die über ein Abflussrohr abgeleiteten Sickerwassermengen und durch die Wasserspeicheränderung im Boden kann man auf die aktuelle Evapotranspiration schließen.

$$N + I = ET_a - D - \Delta R \quad \rightarrow \quad ET_a = N + I - D - \Delta R$$

N *Niederschlag*

I *Bewässerung*

ET_a *aktuelle Evapotranspiration*

D *Sickerwassermenge*

ΔR *Änderung des Wasserspeichers*

Zur automatischen Aufnahme dieser Daten können Lysimeter mit Wiegezellen und/oder TDR-Sonden zur Messung von Bodenwassergehaltsänderungen, Tensiometern zur Messung der Bodenwasserspannung und Kippzählern zur Messung der Sickerwassermengen ausgestattet sein. Die Werte werden fortlaufend registriert und an den Datenlogger weitergeleitet und gespeichert (siehe Abb. 2.11).

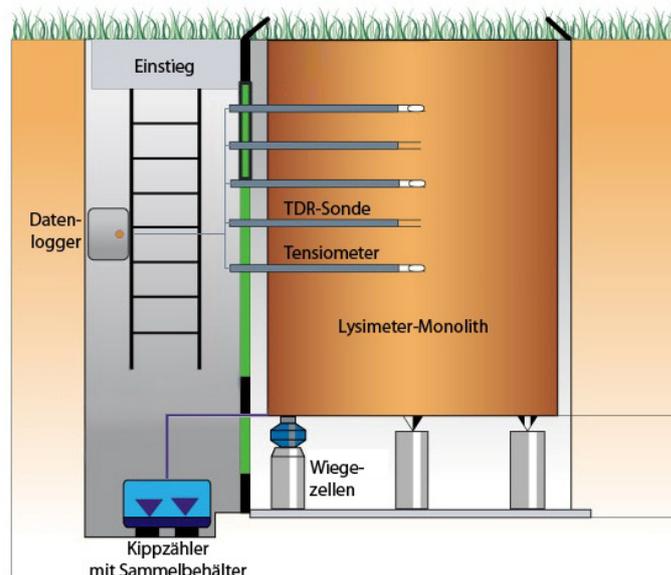


Abb. 2.11: Schnitt eines Lysimeters
[verändert nach ICT INTERNATIONAL, 2011]

Desweiteren empfiehlt es sich nahe der Lysimeteranlage eine Wetterstation zur Aufzeichnung der klimatischen Bedingungen wie Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Strahlung, etc. zu installieren [EHLERS, 1996, S. 129ff; DIETRICH & SCHÖNIGER, 2011].

2.2.3.2 Berechnung der Evapotranspiration

Im Gegensatz zur direkten Bestimmung gelten Versuche mit Verdunstungswannen, Verdunstungsmodellen und Verdunstungsformeln als indirekte Methoden, da hier mit Hilfe der potentiellen Evapotranspiration ET_p oder der Gras-Referenzverdunstung ET_0 (empirische Verdunstungsleistung eines 12 cm hohen Gräserbestandes), aber ohne Berücksichtigung auf die tatsächlichen Vegetationsbedingungen, lediglich eine Annäherung an die genaue Verdunstungsleistung stattfindet.

Für die Berechnung der Verdunstung gibt es zahlreiche Ansätze. Diese wenden die Parameter Temperatur, Windgeschwindigkeit, Strahlungsdauer, Strahlungsintensität, Dampfdruck und/oder Luftfeuchte unterschiedlich an, wobei an dieser Stelle zwei der gängigsten Ansätze behandelt werden [DIETRICH & SCHÖNIGER, 2011; LOISKANDL et al., 2011, S. 63-73]:

- Penman-Monteith-Formel:

$$\lambda \cdot ET_{crop} = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{e_a - e_d}{r_a}\right)}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

λ	latente Verdunstungsenergie	[kJ kg]
$\lambda \cdot ET_{crop}$	latenter Wärmestrom der Verdunstung	[J/kg]
Δ	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	[hPa °C]
R_n	Strahlungsbilanz der Erdoberfläche	[W/m ²]
G	Bodenwärmestrahlung	[W/m ²]
$R_n - G$	effektive Strahlungsbilanz	[W/m ²]
ρ	Atmosphärendichte	[kg/cm ³]
C_p	spezifische Wärme der feuchten Luft	[kJ kg °C]
e_a	Sättigungsdampfdruck	[hPa]
e_d	aktueller Dampfdruck	[hPa]
$e_a - e_d$	Sättigungsdefizit	[hPa]
r_a	aerodynamischer Widerstand	[s/m]
r_c	Stomatawiderstand	[s/m]
γ	Psychrometerkonstante	[hPa °C]

Diese Formel ist mit der Einführung der zwei Verdunstungswiderstände r_a (abhängig von der Höhe und Struktur des Pflanzenbestandes und der Windgeschwindigkeit) und r_c (kennzeichnet die Wasserversorgung des Bestandes) eine Weiterentwicklung der klassischen Penman-

Formel. Dieser theoretische Ansatz kann wie folgt an die Verdunstungsberechnungen angepasst werden:

$$ET_{\text{crop}} = ET_{\text{rad}} + ET_{\text{aero}}$$

Der Strahlungsterm ET_{rad} bzw. der aerodynamische Verdunstungsterm ET_{aero} werden folgendermaßen berechnet:

$$ET_{\text{rad}} = \frac{\Delta \cdot (R_n - G)}{(\Delta + \gamma^*) \cdot \lambda} \cong \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G)}{\Delta + \gamma^*}$$

$$ET_{\text{aero}} = \frac{86,4}{\lambda} \cdot \frac{1}{(\Delta + \gamma^*)} \cdot \frac{\rho \cdot C_p \cdot (e_a - e_d)}{r_a}$$

Die Gras-Referenzverdunstung ET_0 ist eine von der FAO (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) eingeführte Referenzoberfläche, welche es ermöglicht, verschiedene Standorte mit unterschiedlichen Bedingungen miteinander vergleichen zu können. Sie beschreibt die Verdunstungsleistung eines 12 cm hohen Gräserbestandes mit einem Stomatawiderstand von 70 m/s und einer Albedo (Reflexionsgrad) von 0,23.

Die Gras-Referenzverdunstung ET_0 wird, nach weiterer Anpassung der vorangegangenen Formeln, wie folgt berechnet:

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273}\right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot u_2)}$$

T Tagesmittel der Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$]

u_2 Windgeschwindigkeit in 2m Höhe [m/s]

Mit Hilfe dieser auf der Penman-Monteith-Formel basierenden Referenzverdunstung kann auf Basis einfacher meteorologischer Daten die potentielle Verdunstung relativ genau berechnet werden, wobei die Genauigkeit mit der Anzahl der vorhandenen Daten steigt (wenigstens Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung sind erforderlich).

- Haude-Formel:

$$ET_{p \text{ Haude}} = a_{\text{Haude}} \cdot (e_{s14} - e_{14}) \quad [\text{mm/d}]$$

a_{Haude} empirischer Pflanzenfaktor (Haude-Faktor)

e_{s14} temperaturabhängiger Sättigungsdampfdruck um 14:00 [hPa]

e_{14} Dampfdruck um 14:00 [hPa]

$e_{s14} - e_s$ Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf [hPa]

Dieser auf dem Sättigungsdefizit der Luft beruhende Ansatz dient der Berechnung von Monatssummen der potentiellen Evapotranspiration, da der Haude-Faktor sowohl von der Pflanzenart als auch vom Kalendermonat bestimmt wird.

Der temperaturabhängige Sättigungsdampfdruck e_{s14} wird über eine einfache Formel durch Einsetzen der um 14:00 gemessenen Temperatur errechnet:

$$e_{s14} = 6,09 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{14}}{237,3 + T_{14}}} \quad [\text{mm/d}]$$

T_{14} Temperatur um 14:00 [°C]

Da der Dampfdruck e_{14} schwer messbar ist, wird er mit Hilfe der relativen Luftfeuchte RH berechnet:

$$RH = \frac{e_{14} \cdot 100}{e_{s14}} \quad [\%]$$

Daraus ergibt sich für die Referenzverdunstung ET_0 , basierend auf dem Ansatz von Haude, folgende Formel:

$$ET_0 = e_{s14} \cdot \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad [\text{mm/d}]$$

2.2.3.3 Wasserverbrauch der Pflanzen

Um den Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes relativ einfach eruieren zu können, wird ein Pflanzenspezifischer Koeffizient herangezogen. Dieser empirische Wert wird sowohl von der Wachstumsphase, als auch von den Faktoren zur Differenzierung von der Referenzvegetation (Pflanzenhöhe, Albedo, Pflanzenwiderstand und Evaporation) bestimmt. Um die potentielle Pflanzenevapotranspiration zu berechnen wird der Pflanzenkoeffizient K_c mit der Gras-Referenzverdunstung multipliziert [LOISKANDL et al., 2011, S. 74]:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

ET_c *potentielle Pflanzenevapotranspiration [mm/Tag]*

K_c *Pflanzenkoeffizient*

ET_0 *Gras-Referenzverdunstung [mm/Tag]*

K_c -Werte sind hauptsächlich für Nutzpflanzen der Landwirtschaft verfügbar. Einige davon sind in Tabelle 2.6 ersichtlich, wobei jeweils der erste Wert bei hoher Tages-Luftfeuchtigkeit ($RH_{\min} > 70\%$) bzw. niedriger Windgeschwindigkeit ($U < 5$ m/s) und der zweite Wert bei niedriger Tages-Luftfeuchtigkeit ($RH_{\min} < 70\%$) bzw. hoher Windgeschwindigkeit ($U > 5$ m/s) zutreffend ist:

Pflanze	Wachstumsphase				gesamte Vegetationszeit
	Beginn	Mitte	Ende	Ernte	
Gras-Referenz	1	1	1	1	1
Baumwolle	0,4 - 0,5	1,05 - 1,25	0,8 - 0,9	0,65 - 0,7	0,8 - 0,9
Erdäpfel	0,4 - 0,5	1,05 - 1,2	0,85 - 0,95	0,95 - 1,05	0,75 - 0,9
Hirse	0,3 - 0,4	1,0 - 1,15	0,75 - 0,8	0,5 - 0,55	0,75 - 0,85
Kohl	0,4 - 0,5	0,95 - 1,1	0,9 - 1,0	0,8 - 0,95	0,7 - 0,8
Paradeiser	0,4 - 0,5	1,05 - 1,25	0,8 - 0,95	0,6 - 0,65	0,75 - 0,9
Reis	1,1 - 1,15	1,1 - 1,3	0,95 - 1,05	0,2 - 0,25	1,05 - 1,2
Sonnenblume	0,3 - 0,4	1,05 - 1,2	0,7 - 0,8	0,35 - 0,45	0,75 - 0,85
Wein	0,35 - 0,55	0,7 - 0,9	0,6 - 0,8	0,55 - 0,7	0,55 - 0,75
Weizen	0,3 - 0,4	1,05 - 1,2	0,65 - 0,75	0,2 - 0,25	0,8 - 0,9

Tab. 2.6: K_c -Werte einiger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen
[verändert nach LOISKANDL et al., 2011, S. 76]

2.2.4 Standsicherheit

In der Ingenieurbiologie hat sich die stabilisierende Wirkung von Gehölzen, besonders strauchförmiger Weidenarten, zur Hang- und Ufersicherung bewährt. Nach FLORINETH et al. [2011/12, S. 16] bringt der ingenieurbiologische Einsatz von Gehölzen folgende positive Wirkungen mit sich:

- Wurzeln können durch ihre Verdübelung verschiedener Bodenschichten die Standsicherheit und Bodenstabilität erhöhen
- Durch Pflanzenverdunstung entziehen die Wurzeln den Bodenporen Wasser, dadurch findet eine Erhöhung der Lagerungsdichte bzw. der Kohäsion der Bodenteilchen und somit eine Stabilisierung des Bodens statt, der Porenwasserdruck nimmt ab, gleichzeitig steigt die Bodenwasserspannung und in Folge des Gewichtsverlusts treten geringere Schubkräfte auf
- Gehölze können Niederschläge abfangen bzw. entschleunigen und so die Prallwirkung und die damit einhergehende Oberflächenerosion verhindern bzw. minimieren
- Wurzelausscheidungen und Mykorrhizapilze fördern die Neubildung bzw. Festigung von Bodenaggregaten

Dennoch sind die Auswirkungen von Gehölzen auf die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen sehr umstritten. Nach DIN 19712/1997 [HASELSTEINER, 2007, S. 107f] gibt es zwar Bestimmungen für ein konformes Einsetzen von Gehölzen auf Dämmen, es wird aber auf mögliche negative Auswirkungen auf die Standsicherheit hingewiesen:

- Bodenlockerung durch Wurzelbewegungen bei Sturm
- Entstehung von Löchern durch Windwurf
- Gefahr der Oberflächenerosion durch Wellenschlag und Strömung
- Entstehung von Hohlräumen bzw. Sickerwegen durch Wurzelfraß und/oder verrottende Wurzeln
- Behinderung bei Überwachung, Verteidigung und Unterhalt
- Beschattung der Grasnarbe
- Steigerung der statischen Belastung
- Vermehrtes Auftreten von Wühltieren

-
- Beschädigung von Dichtungen und Entwässerungsvorrichtungen durch Wurzelwachstum

Deshalb ist die Bepflanzung mit Gehölzen auf Dämmen nach DIN 19712/1997 bzw. DVWK 226/1993 [HASELSTEINER & STROBL, 2006, S. 5] wie folgt geregelt:

- Keine Gehölze auf nicht überdimensionierten Dämmen, deren Bodenarten die Durchwurzelung (besonders in den erdstatisch erforderlichen Dammquerschnitt) fördern
- Keine Gehölze an der Wasserseite, im Dammkronenbereich, an Überlaufstrecken, an überströmbaren Teilschutzdämmen und im unteren Drittel der Landseite (für einfache Sickerwasserbeobachtung und Verteidigung)
- Abstand zum Dammfuß einhalten (Kolk- und Durchwurzelungsgefahr)
- Nur gruppenweise und den Unterhalt begünstigende Bepflanzung (Anm.: gerade diese ist schlecht wegen der Düsenwirkung bei Stürmen [FLORINETH, 2012, mdl. Mitt.])
- Entfernen von abgestorbenen Wurzeln und von Gehölzen bei Gefährdung der Standsicherheit
- Beobachten der Abflusseigenschaften der Gehölze im Vorland

2.2.5 Eigenschaften der Purpurweide (*Salix purpurea*)

Die Purpurweide hat sich im Bereich der Ufer- und Hangsicherung, aufgrund ihrer Anpassungs- und Regenerationsfähigkeit, der Trockenheitsverträglichkeit, der Schadstoff- bzw. Salzresistenz und der ausgezeichneten vegetativen Vermehrbarkeit bewährt. Desweiteren sind der strauchförmige Habitus, die Elastizität, die Überschwemmbarkeit und das Ertragen längerer Überflutung für die Anwendung als Ufergehölz sehr gut geeignet.

Sie bildet eine tiefgreifende Hauptwurzel und flache, dichtverzweigte Nebenwurzeln (siehe Abb. 2.12), ist in der Lage Adventivwurzeln zu entwickeln, besitzt ein gutes Stockausschlagvermögen und kann als Steckholz verwendet werden [HÖRANDL et al., 2002, S. 138; SCHLÜTER, 1990, S. 79; HILLER, 1985, S. 96].

Nach MARTIN & STEPHENS [2005, S. 1] ergibt sich für 1-3 jährige Korb-Weiden (*Salix viminalis*) eine Verdunstungsleistung von 360-1200 Liter pro Pflanze und Jahr. Korb-Weide und Purpurweide sind sich in ihren Wuchseigenschaften ähnlich. Da die Purpurweide aber kleinere Blätter hat und diese unterseits blau bereift sind, was auf einen Verdunstungsschutz hinweist, kann im Vergleich zur Korbweide mit leicht geringeren Werten gerechnet werden.

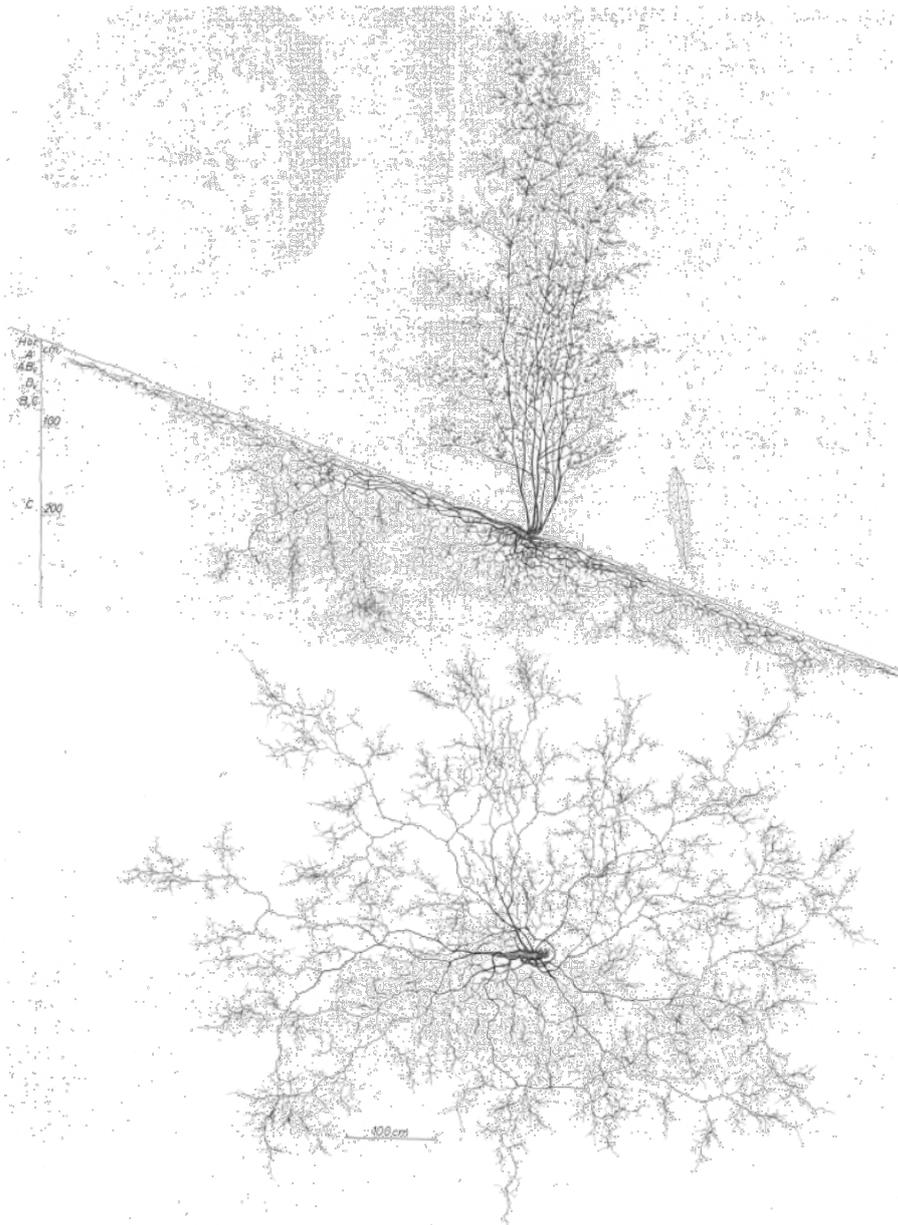


Abb. 2.12: Durchwurzelung einer Purpurweide in St. Ruprecht bei Villach
[KUTSCHERA & LICHTENEGGER, 2002, S. 508]

3 Methodik

3.1 Versuchsanlage in Deutsch-Wagram

3.1.1 Errichtung der Versuchsanlage

Im Jahr 2007 wurden am Stallingerfeld in Deutsch-Wagram (Niederösterreich) Hochwasser-Versuchsdämme errichtet, um die Auswirkungen von Gehölzen an Hochwasserschutzdämmen zu untersuchen.

Die Versuchsanlage besteht aus zwei aufstaubaren Dämmen. Diese sind einerseits mit Purpurweiden (*Salix purpurea*) in unterschiedlichen ingenieurb biologischen Bauweisen (Weidenspreitlage längs, Weidenspreitlage quer und Stechhölzern) bepflanzt und andererseits mit einer Gräser/Kräuter-Mischung (als Vergleich) begrünt.

Um die Verdunstungsleistung der Purpurweiden und den Bodenwasserhaushalt des stark verdichteten Bodens genauer untersuchen zu können, wurde 2009 zusätzlich eine Lysimeteranlage errichtet. Der genaue Aufbau dieser Anlage wird im folgenden Abschnitt bzw. in OBRIEJETAN [2010] näher beschrieben.

3.1.2 Aufbau der Lysimeteranlage

Für die Lysimeteranlage wurden 20 Kunststofffässer mit einer Höhe von 96 cm, einem Innendurchmesser von 55,4 cm und 208 Liter Fassungsvermögen als Versuchsbehälter installiert. Neun der Behälter wurden mit einer Weidenspreitlage bepflanzt, acht wurden mit einer Gräser/Kräuter-Mischung begrünt und drei blieben als Nullvariante ohne Bewuchs. Von jeder Variante ist ein Lysimeter mit einer Wiegezelle, einem Kippzähler und mit TDR-Sonden bzw. Tensiometern in unterschiedlichen Bodentiefen ausgestattet. Das Sickerwasser der restlichen Lysimeter wird über eine Abflussvorrichtung in einen Kanister geleitet und aufgefangen. Mit Hilfe von jeweils zwei Europaletten werden die Behälter in Waage gehalten. Desweiteren wird durch die Paletten der Abfluss und mögliche Transport- bzw. Wartungsarbeiten erleichtert.



Abb. 3.1: Wiegeelektronik und Kippzähler
[Deutsch-Wagram, 25.05.2011]



Abb. 3.2: Versuchsbehälter auf Europaletten
[Deutsch-Wagram, 22.06.2011]



Abb. 3.3: Abflussvorrichtung
[Deutsch-Wagram, 22.06.2011]



Abb. 3.4: Sickerwasserbehälter
[Deutsch-Wagram, 22.06.2011]

Da für die Untersuchungen der letzten 2 Jahre jeweils zu Beginn der Vegetationsruhe ein Weiden- und ein Gräser/Kräuter-Lysimeter aufgeschnitten wurden, sind in der Vegetationsperiode 2011 nur mehr 16 Versuchsbehälter (7 mit Weiden, 6 mit Gräser/Kräuter-Mischung, 3 ohne Bewuchs) vorhanden (siehe Abb. 3.5).

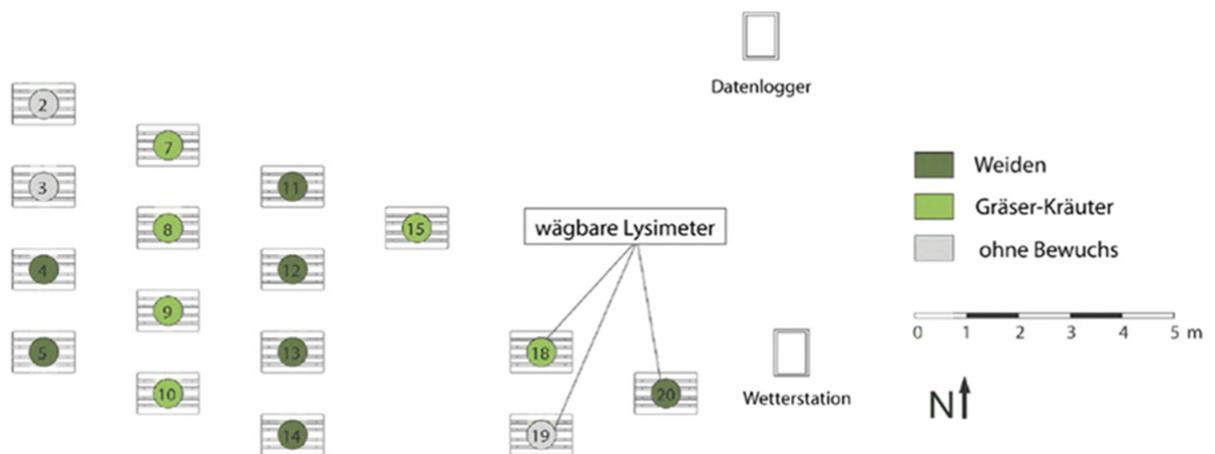


Abb. 3.5: Anordnung und Einteilung der Lysimeter im Jahr 2011
[verändert nach OBRIJETAN, 2010, S. 33]

3.1.2.1 Bodenaufbau und Bodenmaterial

Eine 10 cm starke Drainageschicht aus gewaschenem Kies (Korngröße 16/32) und ein Schutzvlies sollen den sicheren Abfluss gewährleisten bzw. das Auswaschen von Boden- und Pflanzenmaterial verhindern. Darüber wurde in 5 cm Schichten, was einem Volumen von 12052,55 cm³ entspricht, das Bodenmaterial aufgetragen und mit Hilfe einer dynamischen Lastplatte, mit einem Fallgewicht von 10 kg, verdichtet, wobei der Boden oberhalb der Messsensoren mit einem leichteren Fallgewicht komprimiert wurde, um diese nicht zu beschädigen. Bei den bewachsenen Lysimetern dient eine 1-2 cm starke Humusschicht als Austrocknungsschutz.

Das Bodenmaterial und dessen Verdichtung gleichen jenen der Versuchsdämme, nämlich ein stark schluffiger, feinkiesiger, schwach mittelkiesiger Sand (gemäß ÖNORM B4412) mit einer Lagerungsdichte ρ_d von 1,95 g/cm³, was einem Verdichtungsgrad D_{pr} von fast 97% und 356 kg Bodenmaterial pro Behälter entspricht.

Um die erforderliche Bodenmenge eruiieren zu können wurde für das verwendete Material mit Hilfe des Proctorversuchs (gemäß ÖNORM B4418) die maximal mögliche Verdichtung ρ_{pr} (2,028 g/cm³) und der Proctorwassergehalt w_{pr} (9,7%) ermittelt.

Die nötige Materialmenge M pro Schicht ($h = 5$ cm, $r = 27,7$ cm) bei einer maximalen Verdichtung ρ_{pr} von 2 g/cm³ wurde wie folgt berechnet:

$$M = V \cdot \rho_{pr} = r^2 \cdot \pi \cdot h \cdot \rho_{pr} = 27,7^2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 2 = 12052,6 \cdot 2 = 24105 \text{ g} = 24,1 \text{ kg}$$

M *Masse pro Schicht bei einer Verdichtung von 2g/cm³*

V *Volumen pro Schicht*

3.1.2.2 Weidenspreitlage

Für die Weiden-Lysimeter wurden, wie bereits bei den Versuchsdämmen ausgeführt, Äste der Purpurweide (*Salix purpurea*) in Form einer Weidenspreitlage eingesetzt. Die Weidenspreitlage gilt als bewährte ingenieurbiologische Maßnahme zur Ufersicherung, sie ist aufgrund ihrer flächigen Bauweise besonders stabil und erfüllt umgehend nach dem Einbau Schutz vor Erosion. Dafür werden Weidenäste quer zur Fließrichtung ans Ufer gelegt und mit Hilfe von, in den Boden ragenden, Holzpflocken und verzinktem Draht, Kokosschnur oder Holzstangen niedergebunden. Die Schnittflächen der Äste müssen ins Wasser reichen und werden am Böschungsfuß mit Steinen, Holzkrainerwänden, Drahtsteinwalzen oder Senkfashchinen gesichert [FLORINETH, 2004, S. 132ff].



Abb. 3.6: Simulierte Weidenspreitlage
[OBRIJETAN, 2010, S. 46; aufgenommen
in Deutsch-Wagram am 22.06.2009]



Abb. 3.7: Auftragen der Humusschicht durch
Walter Lammeranner
[OBRIJETAN, 2010, S. 46; aufgenommen
in Deutsch-Wagram am 22.06.2009]

Bei den Versuchsbehältern wurden zugeschnittene Weidenäste auf dem verdichteten Bodenmaterial eingelegt und Humus aufgetragen um die Zwischenräume zu füllen und die Äste vor dem Austrocknen zu schützen.

Da die Eigenschaften der Purpurweide bereits im Kapitel 2.2.5 erläutert wurden, wird an dieser Stelle nicht näher darauf eingegangen.

3.1.2.3 Gräser/Kräuter-Ansaat

Für die Lysimeter mit Gräser/Kräuter-Begrünung wurde dieselbe Saatgutmischung wie bereits bei den Versuchsdämmen zusammengestellt, welche der Trockenrasenmischung Nr. 14 des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien ähnelt. Diese wurde zu jeweils 10,6 g auf dem leicht gelockerten Versuchsboden aufgetragen und mit Humus überdeckt.



Abb. 3.8: Auftragen der Saatgutmischung durch Walter Lammeranner
[OBRIJETAN, 2010, S. 47; aufgenommen in Deutsch-Wagram am 29.06.2009]



Abb. 3.9: Zustand nach der Ansaat
[OBRIJETAN, 2010, S. 47; aufgenommen in Deutsch-Wagram am 29.06.2009]

Die Anteile der verwendeten Gräser und Kräuter der Saatgutmischung werden in folgender Tabelle gezeigt:

	Botanischer Name	Deutscher Name	Anteil in %
Gräser	<i>Bromus erectus</i>	Aufrechte Trespe	2,08
	<i>Bromus inermis</i>	Wehrlose Trespe	2,08
	<i>Festuca duriuscula</i>	Hartschwingel	15,61
	<i>Festuca ovina</i>	Schafschwingel	20,81
	<i>Festuca rubra commundata</i>	Horstbildender Rotschwingel	10,41
	<i>Festuca valesiaca</i>	Walliser Schwingel	5,20
	<i>Festuca rubra rubra</i>	Ausläuferbildender Rotschwingel	8,32
	<i>Lolium perenne</i>	Englisches Raygras	5,20
	<i>Poa compressa</i>	Platthalmrispe	7,28
	<i>Poa pratensis</i>	Wiesenrispe	2,08
Kräuter	<i>Achillea millefolium</i>	Schafgarbe	2,08
	<i>Anthyllis vulneraria</i>	Wundklee	2,08
	<i>Coronilla varia</i>	Kronwicke	4,16
	<i>Lathyrus pratensis</i>	Wiesenplatterbse	1,04
	<i>Lotus corniculatus</i>	Hornschotenklee	4,16
	<i>Medicago lupulina</i>	Gelbklee	2,08
	<i>Onobrychis viciifolia</i>	Espartette	2,08
	<i>Papaver rhoeas</i>	Wilder Mohn	0,10
	<i>Trifolium repens</i>	Weißklee	3,12

Tab. 3.1: Verwendete Saatgutmischung für die Begrünung der Lysimeter-Versuchsanlage in Deutsch-Wagram

3.2 Messtechnik

Die Versuchsbehälter 18-20 (je einer mit Weidenspreitlage, Gräser/Kräuter-Mischung bzw. ohne Bewuchs) sind mit Messsonden ausgestattet. Diese messen den Wassergehalt bzw. die Bodentemperatur mit TDR-Sonden in 5 bzw. 30 cm Tiefe, die Wasserspannung mit Tensiometern in 5, 15, 30 und 50 cm Tiefe (siehe Abb. 3.10), die Sickerwassermengen über Kippzähler und Gewichtsänderungen mit Hilfe von Wiegezellen. Desweiteren befindet sich für die Aufzeichnung diverser klimatischer Bedingungen, nahe der Lysimeteranlage, eine Wetterstation. Die Daten der Messsonden und der Wetterstation werden alle 10 Minuten an den Datenlogger gesendet (siehe Abschnitt 3.2.6). Die verwendeten Messgeräte werden in den nächsten Abschnitten näher beschrieben.

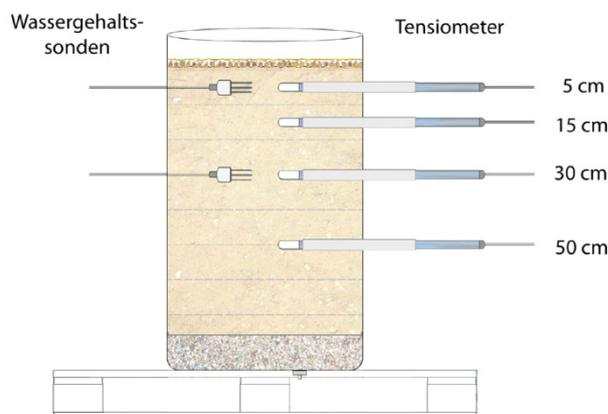


Abb. 3.10: Messtechnik bei Lysimeter 18-20
[OBRIJETAN, 2010, S. 39]

3.2.1 TDR-Sonden

Die TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry) Hydra-Probe 12 der Firma Stevens ermöglichen die fortlaufende Registrierung des volumetrischen Bodenwassergehalts in Prozent. Hierbei wird die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen zwischen drei Elektrodenstäben gemessen und somit die Leitfähigkeit (Dielektrizität) des Bodens bestimmt. Da Wasser (ca. 80), Luft (ca. 1) und Bodenteilchen (<3-5) unterschiedliche Dielektrizitätskonstanten aufweisen, kann mit diesem Wert auf den Wassergehalt geschlossen werden. Desweiteren kann mit Hilfe der Hydra-Probe 12 die Bodentemperatur gemessen werden [UMS GmbH, 2011b, S. 16].



Abb. 3.11: Eingebaute TDR-Sonde Hydra-Probe 12
[OBRIEJETAN, 2010, S. 40; aufgenommen
in Deutsch-Wagram am 12.06.2009]

3.2.2 Tensiometer

Für die kontinuierliche Aufnahme der Bodenwasserspannung bzw. des Matrixpotentials wurden Tensiometer des Typs T4 der Firma UMS GmbH in die Versuchsbehälter eingebaut. Die mit destilliertem Wasser gefüllte, semipermeable Keramikkerze ist mit dem Bodenwasser in Kontakt, wodurch es zu einem Ausgleich der Spannungsunterschiede zwischen Tensiometerzelle und Boden kommt. Dieser Ausgleich führt zu einem Druck bzw. Unterdruck, welcher vom piezoelektrischen Druckaufnehmer registriert und als analoges Signal an den Datenlogger weitergeleitet wird. Über die hydrophobe Teflonmembran am Kabel wird der atmosphärische Referenzdruck zum Drucksensor geleitet, wobei die Membran freien Luftkontakt haben muss und nie in Wasser getaucht werden sollte, da es sonst zu Fehlmessungen kommt [UMS GmbH, 2011a, S. 9ff].

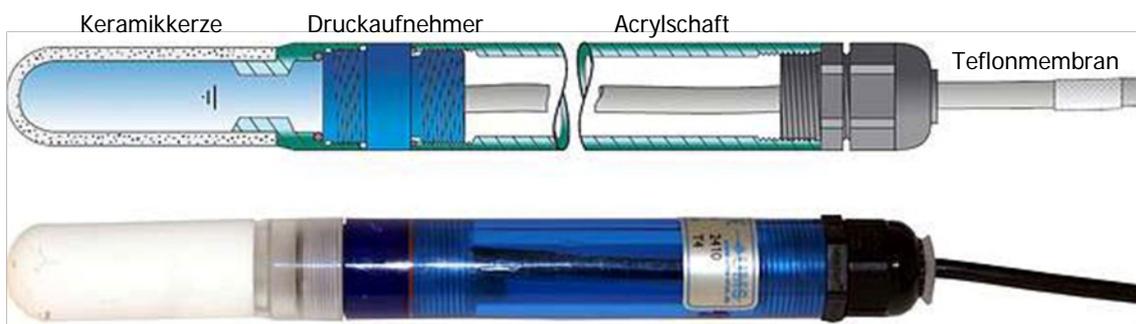


Abb. 3.12: Tensiometer T4
[verändert nach UMS GmbH, 2011b, S. 9]

Die Genauigkeit der T4 Tensiometer beläuft sich auf ± 5 hPa und deckt einen Messbereich von -850 bis 1000 hPa ab [UMS GmbH, 2011b, S. 9]. Da die Tensiometer für trockene Böden nicht geeignet sind, sollten sie bei Werten über 850 hPa bzw. bei konstant flacher werdender Messkurve überprüft und, falls notwendig, neu befüllt werden [UMS GmbH, 2011a, S. 23].

Die Tensiometer in den Versuchsbehältern sind durch PVC-Rohre vor mechanischen Schäden geschützt, desweiteren wird dadurch die jährliche Entnahme bzw. der Einbau, da die Tensiometer nicht im Boden überwintern sollten, vereinfacht.



Abb. 3.13: Eingebautes Tensiometer T4
[OBRIJETAN, 2010, S. 41; aufgenommen
in Deutsch-Wagram am 10.06.2009]

3.2.3 Sickerwassermessung

Die automatische Erhebung der Durchsickerungsleistung erfolgt mit Kippmessern der Firma UMS (siehe Abb. 3.1) mit maximal 300 ml/min Fließmenge bei einer Auflösung von 5 ml/min. Um das gesamte Sickerwasser in den Kippzähler leiten zu lassen, wurden, aufgrund der unterschiedlichen Durchmesser von Abflussvorrichtung des Versuchsbehälters und Einlauföffnung des Kippzählers, zwei Schläuche mit eingefügtem T-Adapter installiert und mit Silikon abgedichtet. Bei den Versuchsbehältern ohne Kippzähler wird das Sickerwasser in einem Kanister gesammelt (siehe Abb. 3.4) und kann jederzeit manuell gemessen werden.

3.2.4 Wiegeelektronik

Für die kontinuierliche Gewichtsmessung und damit zur Ermittlung von Gewichtsänderungen (z.B. durch Niederschlag oder Bewässerung) wurden die Versuchsbehälter auf modifizierte DMS-Wiegezellen aufgesetzt (siehe Abb. 3.1), welche bis zu 600 kg Last bei einer Genauigkeit von 200 g messen können. Es wurden U-förmige Stahlträger an die Rahmenkonstruktion geschweißt, an der Oberseite zur besseren Gewichtsverteilung der Lysimeter bzw. an der Unterseite um die Versuchsbehälter über Justierschrauben in Waage halten zu können.

3.2.5 Wetterstation

Um die genauen klimatischen Bedingungen, denen die Pflanzen ausgesetzt sind, beobachten zu können, wurde die Höhe der Wetterstation auf die Oberkante der Versuchsbehälter (ca. 160 cm) ausgerichtet (siehe Abb. 3.14).

Die Niederschlagshöhe wird mit Hilfe eines Kippwaagen-Regenmessers (ähnlich dem Kippzähler zur Sickerwassermessung) der Firma Young, mit einer Referenzfläche von 200 cm² und einer Genauigkeit von 0,1 mm pro Kippbewegung, aufgezeichnet. Trotz eines eingesetzten Kunststofffilters zur Verhinderung von Fremdkörper-Eintrag muss das Messgerät regelmäßig kontrolliert und, falls notwendig, der Filter geleert und/oder das gesamte Gerät gewartet werden.

Temperatur und Luftfeuchte werden von einem Sensor des Typs Vaisala HMP54 der Firma Stevens erfasst. Direkte Sonneneinstrahlung und damit einhergehende Messfehler werden durch einen Strahlenschutz aus Kunststofflamellen verhindert.

Die Windgeschwindigkeit wird mit einem Anemometer der Firma Kroneis gemessen, wobei die Materialien des Geräts auf Windgeschwindigkeiten bis 200 km/h begrenzt sind.

Für die Messung der Strahlungsintensität wurde ein Pyranometer der Firma Apogee Instruments installiert, welches einen Messbereich von 300 bis 1000 nm abdeckt. Um Messfehler zu vermeiden muss das Pyranometer in Waage und frei ausgerichtet sein.



Abb. 3.14: Messgeräte der Wetterstation
[Deutsch-Wagram, 25.08.2011]

3.2.6 Datenlogger

Die registrierten Daten, sowohl der Messsonden als auch der Wetterstation, werden alle 10 Minuten an den Datenlogger gesendet, zwischengespeichert und in weiterer Folge über eine Modemverbindung an den Universitätsserver der Universität für Bodenkultur weitergeleitet. Um die fortlaufende Datenaufnahme und -weiterleitung zu gewährleisten, ist der Sicherungskasten der Messstation mit einer Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) ausgestattet.



Abb. 3.15: Datenlogger
[Deutsch-Wagram, 30.09.2011]

3.3 Vegetationsaufnahmen

Um die Wachstumsleistung der Pflanzen und ihre Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt bzw. die Evapotranspiration ermitteln zu können, wurden verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt. Diese werden in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

3.3.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis der Sprosse

Mit der regelmäßigen Abmessung des Durchmesser/Längen-Verhältnisses der Weidensprosse können sowohl die Wachstumsleistung und der Entwicklungsverlauf eingeschätzt, als auch Prognosen und Pflegekonzepte erstellt werden. Der Durchmesser der Sprosse wird dabei an der Stammbasis, direkt über dem Wurzelhals bestimmt.



Abb. 3.16: Vermessen der Weiden in Lysimeter 20 mit Unterstützung von Josef Schönleitner (links) [Deutsch-Wagram, 30.09.2011]

3.3.2 Oberirdische Biomasse

Um die Menge an oberirdischer Biomasse eines Lysimeters zu eruieren, wurde am Ende der Vegetationsperiode die oberirdische organische Substanz von einem Versuchsbehälter mit Weiden und einem mit Gräser/Kräuter-Bewuchs entfernt. Danach wurden die Weidensprosse vermessen, in Durchmesserklassen eingeteilt und deren Blätter abgetrennt. Um die reine Biomasse feststellen zu können, mussten die Pflanzenteile bei 80° C im Trockenschrank mehrere Tage auf Gewichtskonstanz getrocknet werden, um danach mit einer Genauigkeit von 0,01 g gewogen zu werden.



Abb. 3.17: Abgeernteter Lysimeter 14 mit Weiden-Bewuchs [Deutsch-Wagram, 30.09.2011]



Abb. 3.18: Abgeerntetes Lysimeter 15 mit Gräser/Kräuter-Bewuchs [Deutsch-Wagram, 30.09.2011]



Abb. 3.19: Abtrennen der Blätter von den Sprossen mit Unterstützung von Agnes Kläring [BOKU, 30.09.2011]



Abb. 3.20: Einteilung in Durchmesserklassen mit Unterstützung von Agnes Kläring [BOKU, 30.09.2011]

3.3.3 Blattflächenindex

Der Blattflächenindex (BFI) bzw. Leaf Area Index (LAI) drückt das Verhältnis zwischen gesamter Blattoberfläche und Bestandesgrundfläche aus. Dafür wurden Stichproben der Blätter jeder Durchmesserklasse (vor dem Trocknen) gescannt und deren Fläche mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogrammes berechnet. Nach dem Trocknen (siehe 3.3.2) wurde mit Hilfe der Stichprobenmasse und der Gesamtmasse einer Durchmesserklasse die Gesamtblattfläche des Bestandes und damit der BFI ermittelt.

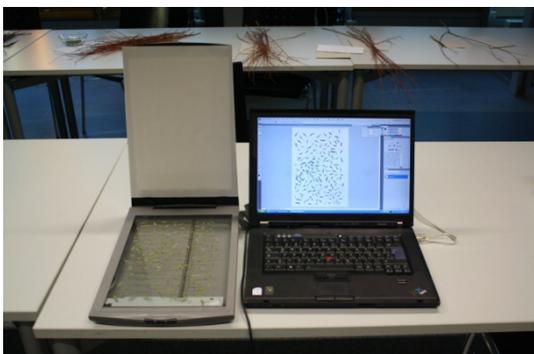


Abb. 3.21: Scannen der Weidenblätter [BOKU, 30.09.2011]

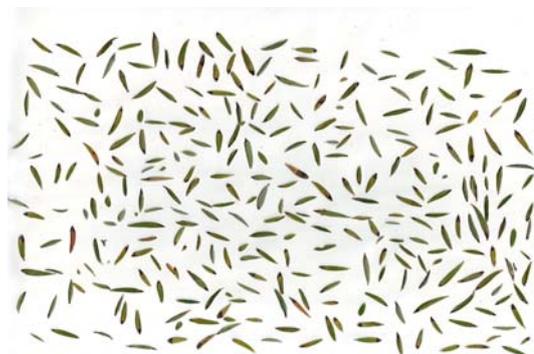


Abb. 3.22: Gescannte Weidenblätter [BOKU, 30.09.2011]

3.3.4 Wurzelanalyse

Zu Beginn der Vegetationsruhe der letzten zwei Jahre wurde jeweils ein Lysimeter mit Weidenbewuchs und einer mit Gräser/Kräuter-Ansaat in 5 cm Schichten aufgeschnitten und deren Wurzeln entnommen. Diese wurden ausgespült, vermessen und ihre Volumina nach Schichten mittels Verdrängungsmethode im Glaszylinder bestimmt. Da das nötige Scangerät mit zugehörigem Wurzelanalyseprogramm für die weiteren Untersuchungen erst ab Juli 2011 verfügbar war, wurden die entnommenen Wurzeln anschließend eingefroren.

Mit Hilfe des Perfection V700 Photscanners der Firma Epson können Wurzeln, eingelegt in einem mit Wasser gefüllten Plexiglasbehälter, gescannt und anschließend mit dem Wurzelanalyseprogramm WinRHIZO automatisch in Durchmesserklassen eingeteilt und deren Länge, Oberfläche, projizierte Fläche, Volumen und die Anzahl der Wurzelspitzen bestimmt werden.

Die Durchmesserklassen sind je nach Untersuchungsanforderungen einzustellen und wurden wie folgt gewählt: <0,125 mm, 0,125-0,25 mm, 0,25-0,5 mm, 0,5-0,75 mm, 0,75-1 mm, 1-1,5 mm, 1,5-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, 4-5 mm, 5-6 mm, 6-70 mm, 7-8 mm, 8-9 mm, 9-10 mm, >10 mm.

Beim Scannen wurde teilweise mit Stichproben gearbeitet, da die oberen Lysimeter-Schichten sehr dicht bewurzelt waren und pro Scanvorgang nur eine sehr geringe Menge bearbeitbar ist.



Abb. 3.23: Epson Perfection V700 Photscanner
[BOKU, 19.07.2011]



Abb. 3.24: Wurzeln in Plexiglasbehälter
[BOKU, 22.07.2011]

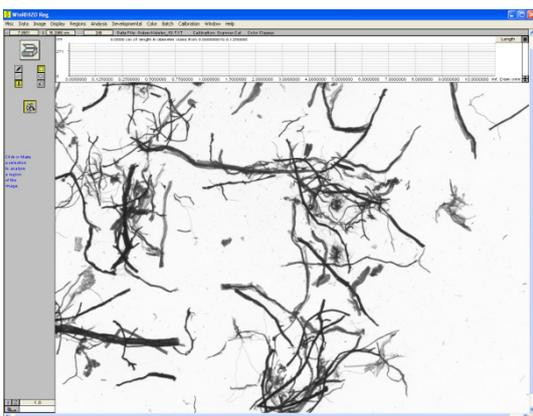


Abb. 3.25: Gescannte Wurzeln vor der Analyse
[BOKU, 25.07.2011]

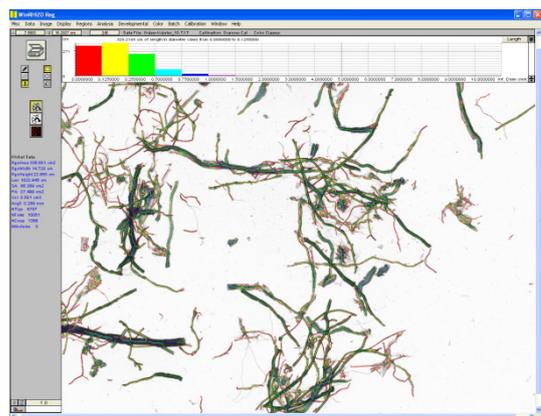


Abb. 3.26: Gescannte Wurzeln nach der Analyse
[BOKU, 25.07.2011]

Nach den Wurzelscans und der parallel laufenden Analyse wurden die Wurzeln im Trockenschrank bei 80° C auf Gewichtskonstanz getrocknet, um einerseits die Wurzeltrockenmasse

zu bestimmen und andererseits über Hochrechnungen die Ergebnisse der stichprobenartig gescannten Schichten zu erhalten.

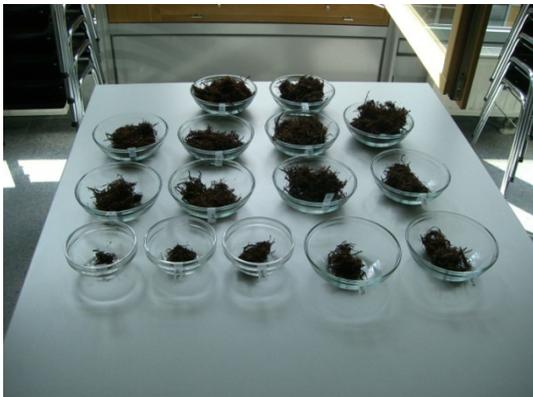


Abb. 3.27: Vorbereitung zur Trocknung
[BOKU, 22.07.2011]



Abb. 3.28: Wurzeln im Trockenschrank
[BOKU, 22.07.2011]



Abb. 3.29: Trocknen bei 80° C
[BOKU, 25.07.2011]

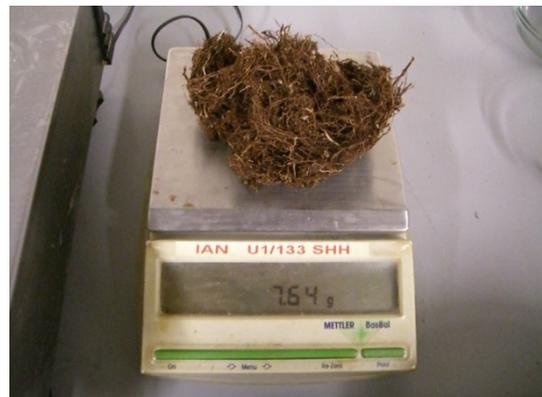


Abb. 3.30: Wiegen der Wurzeln
[BOKU, 25.07.2011]

Mit den Ergebnissen der Wurzelscans konnten in weiterer Folge die Längen, Wurzeloberflächen und die Volumina der unterschiedlichen Durchmesserklassen und Bodenschichten, sowie deren Unterschiede zwischen Weidenbewuchs und Gräser/Kräuter-Ansaat, in zwei aneinander folgenden Vegetationsperioden, verglichen werden.

4 Ergebnisse

4.1 Vegetationsentwicklung

Die Entwicklung des Weiden und des Gräser/Kräuter-Bewuchses innerhalb der dritten Vegetationsperiode wurde von April bis September 2011 regelmäßig fotografisch aufgezeichnet, sowie das Durchmesser/Längen-Verhältnis und der Blattflächenindex der Weiden bzw. die oberirdische Biomasse beider Bewuchsarten aufgenommen.

4.1.1 Weidenspreitlage

Die folgenden Fotos zeigen den Entwicklungsverlauf des Weidenbewuchses vom 20. April bis 25. August 2011.



Abb. 4.1: Weidenbewuchs am 20.04.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.2: Weidenbewuchs am 25.05.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.3: Weidenbewuchs am 22.06.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.4: Weidenbewuchs am 25.08.2011
[Deutsch-Wagram]

Es ist zu erkennen, dass sowohl die Sprosse als auch die Blätter im Laufe der Vegetationsperiode an Dichte und an Farbe (vgl. Abschnitt 4.1.1.1) verloren haben. Diese Entwicklung lässt sich vermutlich auf den relativ heißen und trockenen Sommer (siehe Abschnitt 4.3) zurückführen.

4.1.1.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis

Das Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse von Lysimeter 20 wurde am 22.06.2011 und am 30.09.2011 gemessen, um die Entwicklung der Weiden innerhalb der Vegetationsperiode festzustellen. Um außerdem die oberirdische Biomasse und den Blattflächenindex von Lysimeter 20 berechnen zu können, wurde am 30.09.2011 zusätzlich das Durchmesser/Längen-Verhältnis von Lysimeter 14 aufgenommen und anschließend die Sprosse für weitere Untersuchungen entnommen. Innerhalb dieser drei Monate hat die Anzahl der Sprosse in Lysimeter 20 von 130 auf 111 Stück abgenommen, was auch der Entwicklung der beiden Jahre zuvor entspricht, da Lysimeter 20 im Herbst 2009 noch 316 Weidensprosse umfasste und im darauf folgenden Herbst nur noch 143 Sprosse gezählt wurden.

Während Ende Juni 2011 die mittlere Länge und der Durchmesser 43,8 cm bzw. 3,46 mm betragen, lagen die Werte Ende September bei einer durchschnittlichen Länge von 50,3 cm und einem Durchmesser von 3,66 mm. Da sich die maximalen Werte nur unerheblich verändert haben, ist davon auszugehen, dass die Verluste hauptsächlich in den geringen bzw. mittleren Durchmesserklassen stattgefunden haben. Einer gewöhnlichen Vegetationsentwicklung entsprechend dominieren also die stärkeren Sprosse zunehmend und verdrängen die schwächeren. Diese Entwicklung ist auch aus den folgenden Streudiagrammen abzulesen (die Strich-Linien zeigen die jeweiligen Mittelwerte an).

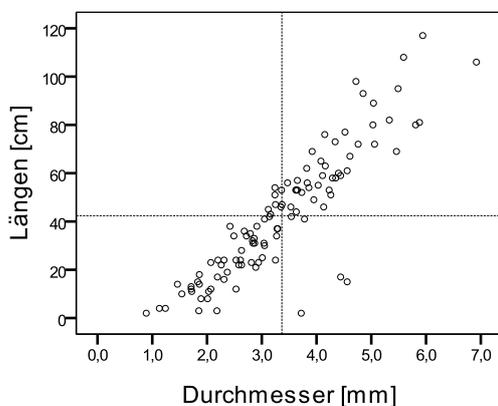


Abb. 4.5: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 20 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 22.06.2011]

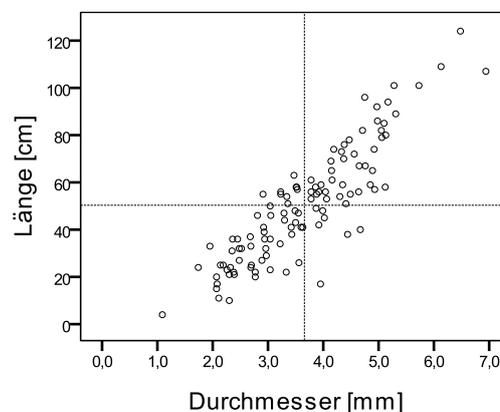


Abb. 4.6: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 20 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Nach den Abmessungen vom 30.09.2011 umfasste Lysimeter 14 108 Weidensprosse, deren Maximalwerte bei einer Länge von 121 cm und einem Durchmesser von 6,14 mm lagen, während die 111 Sprosse in Lysimeter 20 maximal eine Länge von 124 cm und einen Durchmesser von 6,94 mm erreichten. Die beiden anschließenden Streudiagramme (Abb. 4.7

und Abb. 4.8) zeigen, dass die Datenpunkte beider Lysimeter bis zu einem Durchmesser von ca. 5,5 mm relativ gleichmäßig verteilt und die Durchschnittswerte sehr ähnlich sind.

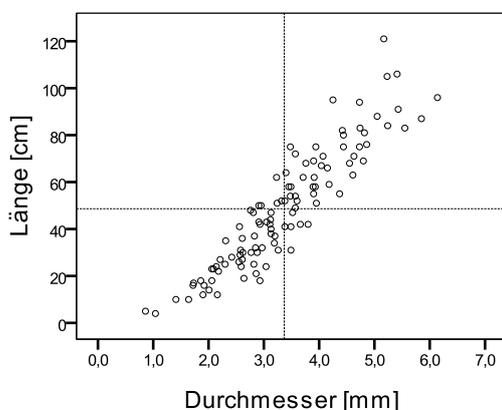


Abb. 4.7: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidenprosse in Lysimeter 14 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

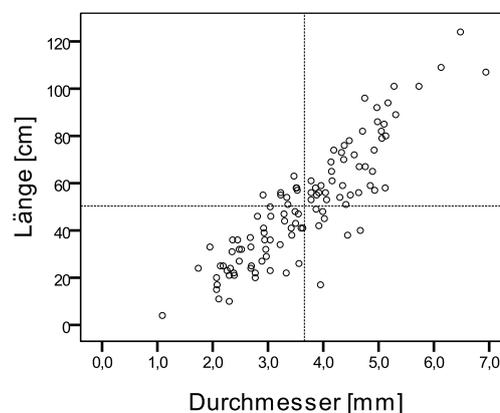


Abb. 4.8: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidenprosse in Lysimeter 20 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

In den folgenden Boxplot-Diagrammen sind die Längen- bzw. Durchmesserverteilungen der Lysimeter 14 und 20 im direkten Vergleich dargestellt:

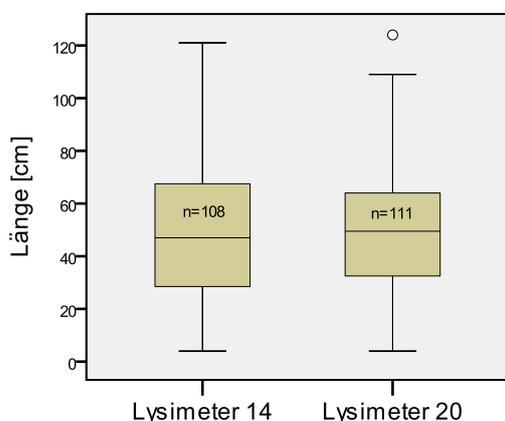


Abb. 4.9: Längenverteilung der Weidenprosse in Lysimeter 14 und 20 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

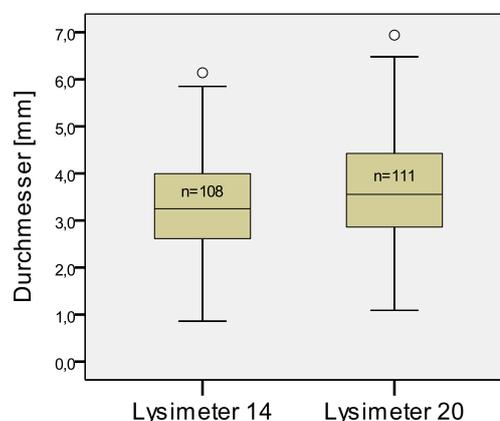


Abb. 4.10: Durchmesserverteilung der Weidenprosse in Lysimeter 14 und 20 [Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Die beiden Abbildungen zeigen, dass, bis auf einzelne Ausreißer, die Weidenprosse der Lysimeter 14 und 20 sowohl bei den Längen als auch bei den Durchmessern eine relativ regelmäßige Verteilung aufweisen. In Tabelle 4.1 sind die statistischen Messdaten genauer aufgelistet.

	Lysimeter 14		Lysimeter 20	
	Länge [cm]	Durchmesser [mm]	Länge [cm]	Durchmesser [mm]
Minimum	4	0,86	4	1,09
Maximum	121	6,14	124	6,94
Mittelwert	48,64	3,37	50,33	3,66
Median	47	3,25	49	3,55

Tab. 4.1: Abmessungen der Weidensprosse in Lysimeter 14 und 20
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Die Minimal- bzw. Maximalwerte unterscheiden sich nur unerheblich von den im Herbst 2010 gemessenen Werten, jedoch sind die Mittelwerte der Längen von 38,6 cm auf 50,33 cm bzw. der Durchmesser von 2,5 mm auf 3,66 mm bedeutend angestiegen.

4.1.1.2 Oberirdische Biomasse

Die oberirdische Biomasse setzt sich aus dem Trockengewicht der Weidenäste und der Blätter zusammen. Hierfür wurden die Weidensprosse (Spross = Zweig + Blätter) von Lysimeter 14 in Durchmesserklassen eingeteilt und vermessen. Danach wurde der Durchschnittswert pro Spross und Klasse errechnet und in weiterer Folge, mit Hilfe der Sprossanzahl, auf Lysimeter 20 hochgerechnet. Abbildung 4.11 zeigt die oberirdische Biomasse auf eine Bestandesfläche von 1 m² bezogen:

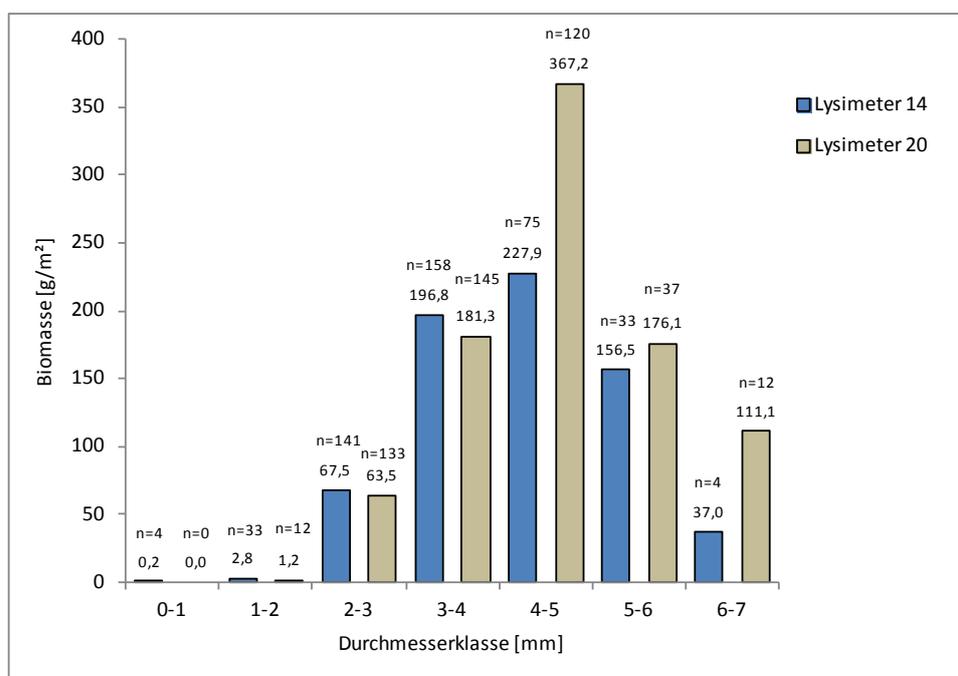


Abb. 4.11: Oberirdische Biomasse der Lysimeter 14 (gemessen) und 20 (berechnet)
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Den Maximalwert erreichen die Weidensprosse von Lysimeter 20 mit einem Durchmesser von 4-5 mm, welcher $367,2 \text{ g/m}^2$ beträgt. In Lysimeter 14 liegt der höchste Wert mit $227,92 \text{ g/m}^2$ in derselben Klasse. Der Mittelwert pro Durchmesserklasse beläuft sich auf $98,4 \text{ g/m}^2$ (Lysimeter 14) bzw. $128,63 \text{ g/m}^2$ (Lysimeter 20).

In Tabelle 4.2 wird die tatsächliche Trockenmasse der Zweige und der Blätter von Lysimeter 14 nach Durchmesserklassen gegliedert dargestellt, um diese mit den Werten der ersten und der zweiten Vegetationsperiode vergleichen zu können:

Durchmesser- klasse [mm]	Sprosse [Stk]	Trockenmasse der Zweige [g]	Trockenmasse der Blätter [g]	Trockenmasse gesamt [g]	Anteil [%]	Trockenmasse gesamt [g/m^2]
0-1	1	0,02	0,02	0,04	0,02	0,17
1-2	8	0,68	0,08	0,68	0,41	2,82
2-3	34	14,53	1,74	16,27	9,80	67,50
3-4	38	43,54	3,91	47,45	28,58	196,85
4-5	18	50,99	3,95	54,94	33,09	227,92
5-6	8	35,44	2,29	37,73	22,72	156,52
6-7	1	8,27	0,66	8,93	5,38	37,05
Summe	108	153,47 (92,39%)	12,65 (7,61%)	166,04	100	688,82

Tab. 4.2: Oberirdische Biomasse in Lysimeter 14
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Es ist zu erkennen, dass die Blätter mit $12,65 \text{ g}$ Trockengewicht und $7,61\%$ einen sehr geringen Anteil am Gesamtgewicht ausmachen. Die Trockenmasse der Blätter ergab in der ersten Vegetationsperiode mit $34,84 \text{ g}$ noch $35,7\%$ [OBRIJETAN, 2010] bzw. in der zweiten mit $29,64 \text{ g}$, $19,3\%$ [LUKAS, 2011] der Gesamtbiomasse.

4.1.1.3 Blattflächenindex

Für Lysimeter 14 wurde der Blattflächenindex (BFI bzw. LAI) erhoben und anschließend für Lysimeter 20 berechnet. Hierfür wurde mit Hilfe von (für manche Durchmesserklassen stichprobenartig durchgeführten) Blattscans die Summe der Blattflächen eruiert und das Verhältnis zur Bestandesgrundfläche ermittelt. Die gesamte Blattfläche von Lysimeter 14 betrug $1255,98 \text{ cm}^2$ und ergab bei einer Bestandesfläche von $2410,51 \text{ cm}^2$ pro Lysimeter einen BFI von $0,52$. Nach der Hochrechnung auf die gesamte Blattfläche belief sich der BFI von Lysimeter 20 auf $0,66$. Im Vergleich dazu betrug der BFI in Lysimeter 20 in der ersten Vegetationsperiode noch $2,52$ [OBRIJETAN, 2010], während bei Lysimeter 6 in der zweiten ein BFI von $1,6$ [LUKAS, 2011] erhoben wurde.

Tabelle 4.3 zeigt die Daten der unterschiedlichen Durchmesserklassen von Lysimeter 14, wobei zu beachten ist, dass die Werte (mit Ausnahme der Sprosszahl) der mit einem Stern gekennzeichneten Durchmesserklassen auf Stichproben basieren.

Durchmesser- klasse [mm]	Sprosse [Stk]	Blattanzahl [Stk]	Fläche/Blatt [cm ²]	Blattfläche gesamt [cm ²]	Anteil an Gesamt- blattfläche [%]	Blattfläche/ Spross [cm ²]
0-1	1	10	0,2	1,98	0,16	1,98
1-2	8	44	0,18	7,82	0,62	0,98
2-3*	34	779	0,23	181,13	14,42	5,33
3-4*	38	1696	0,24	406,90	32,4	10,71
4-5*	18	1347	0,26	352,49	28,07	19,58
5-6*	8	790	0,31	241,68	19,24	30,21
6-7	1	264	0,24	63,99	5,09	63,99
Summe	108	4930		1255,98		

Tab. 4.3: Blattflächenberechnungen von Lysimeter 14

* Werte basieren auf Stichproben (mit Ausnahme der Sprosszahl)

[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, aufgenommen am 30.09.2011]

Der Tabelle ist zu entnehmen, dass die Sprosse mit Durchmessern von 3-5 mm mit 60,47% den größten Anteil der Gesamtblattfläche aufweisen. Der Mittelwert der Blattfläche pro Blatt beläuft sich auf 0,24 cm² bzw. pro Spross auf 18,97 cm². Diese Werte betragen in der ersten Vegetationsperiode noch 1,03 cm² bzw. 39,25 cm², bei einer Gesamtblattfläche von 6191,74 cm² [OBRIJETAN, 2010], während in der zweiten Vegetationsperiode die Blattfläche pro Blatt 0,33 cm² bzw. die Blattfläche pro Spross 32,98 cm² und die Gesamtblattfläche 3560,79 cm² [LUKAS, 2011] ergaben.

4.1.2 Gräser/Kräuter Ansaat

Die Gräser und Kräuter sind zwischen Ende April und Ende Mai stark gewachsen (siehe Abb. 4.12 und Abb. 4.13) und blieben bis Ende Juni relativ unverändert. Ähnlich den Weiden waren die Gräser und Kräuter aufgrund der hohen Temperaturen und mangelnden Niederschlag Ende August etwas ausgetrocknet.



Abb. 4.12: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 29.04.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.13: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 25.05.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.14: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 22.06.2011
[Deutsch-Wagram]



Abb. 4.15: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 25.08.2011
[Deutsch-Wagram]

Am 30.09.2011 wurden die Gräser und Kräuter auf der Höhe der Lysimeter-Oberkante nachgeschnitten, wobei der Bewuchs von Lysimeter 15 komplett geerntet worden ist, um in weiterer Folge die oberirdische Biomasse zu bestimmen. Diese betrug $435,14 \text{ g/m}^2$ Trockengewicht und entspricht somit $63,14\%$ der Trockenmasse der geernteten Weiden. In der ersten Vegetationsperiode ergab die Biomasse der geernteten Gräser und Kräuter $121,14 \text{ g/m}^2$ [OBRIJETAN, 2010] und entsprach ungefähr einem Drittel der Weiden-Trockenmasse. Somit hat sich die Trockenbiomasse der Gräser und Kräuter in 2 Jahren als Wert mehr als verdreifacht und in Relation zu den Weiden verdoppelt.

4.2 Wurzelanalyse

Wie bereits in Abschnitt 3.3.4 beschrieben, werden an dieser Stelle nur Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen dargestellt, welche auf den in der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode entnommenen Wurzeln basieren. Für das Jahr 2011 sind aus versuchstechnischen Gründen keine Wurzeluntersuchungen durchgeführt worden.

Die genauen Ergebnisse der Wurzeluntersuchungen ohne die Aufteilung in Durchmesserklassen sind dem Anhang in Abschnitt 9.5 zu entnehmen.

2009 haben die Weiden bis 75 cm und die Gräser und Kräuter bis 70 cm Bodentiefe gewurzelt. Im Jahr darauf sind die Wurzeln beider Bewuchsarten sogar durch das Schutzvlies in die Kies-Drainage-Schicht gewachsen. Die beiden folgenden Grafiken zeigen die Wurzellängenverteilung pro cm^3 Boden in den einzelnen Bodenschichten:

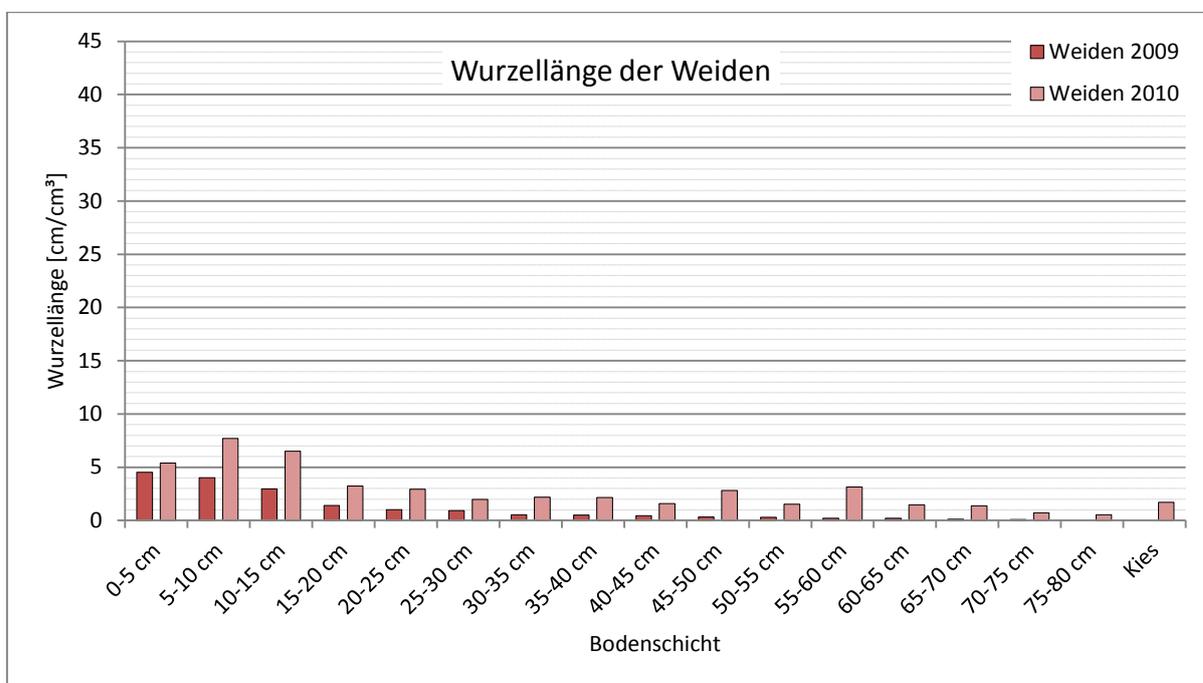


Abb. 4.16: Wurzellängen der Weiden pro cm^3 Boden
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

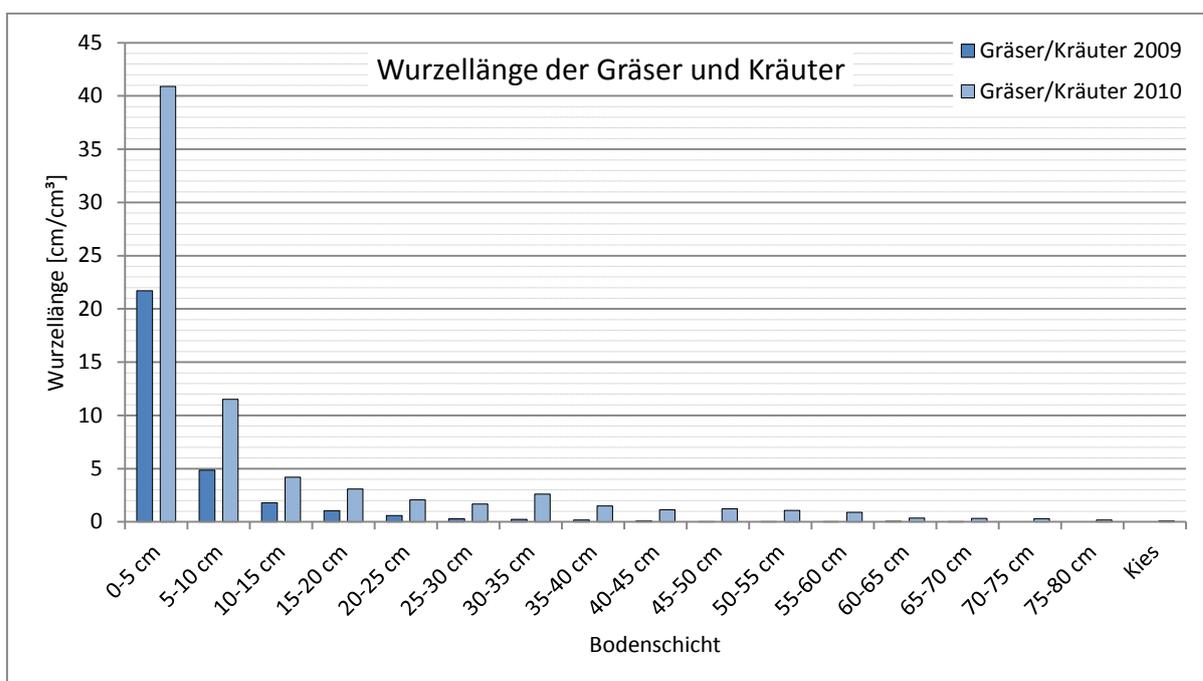


Abb. 4.17: Wurzellängen der Gräser und Kräuter pro cm^3 Boden
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Die Ergebniswerte der Wurzellängen waren unerwartet hoch, so sind z.B. die Gräser/Kräuter-Wurzeln im Jahr 2010, allein in der obersten Bodenschicht, beinahe 41 cm/cm^3 lang.

Die Grafiken verdeutlichen, dass die Gräser und Kräuter die oberste Bodenschicht sehr dicht bewurzeln, der Durchwurzelungsgrad jedoch ab der zweiten Schicht fast stetig abnimmt.

Die Weiden bewurzeln die unterschiedlichen Bodenschichten hingegen relativ gleichmäßig. Hier ist auffällig, dass manche tiefere Schichten, besonders die Drainageschicht (Kies), dichter bewurzelt sind als darüber liegende. Die Wurzellängen in der obersten Bodenschicht betrugen im ersten Jahr $4,5 \text{ cm/cm}^3$ und sind bis 2010 nur auf $5,4 \text{ cm/cm}^3$ Länge gewachsen. In der zweiten Bodenschicht sind die Wurzeln in einem Jahr von 4 auf $7,7 \text{ cm/cm}^3$ gewachsen.

Die Verteilung der Wurzellängen in den einzelnen Durchmesserklassen wird im folgenden Diagramm dargestellt:

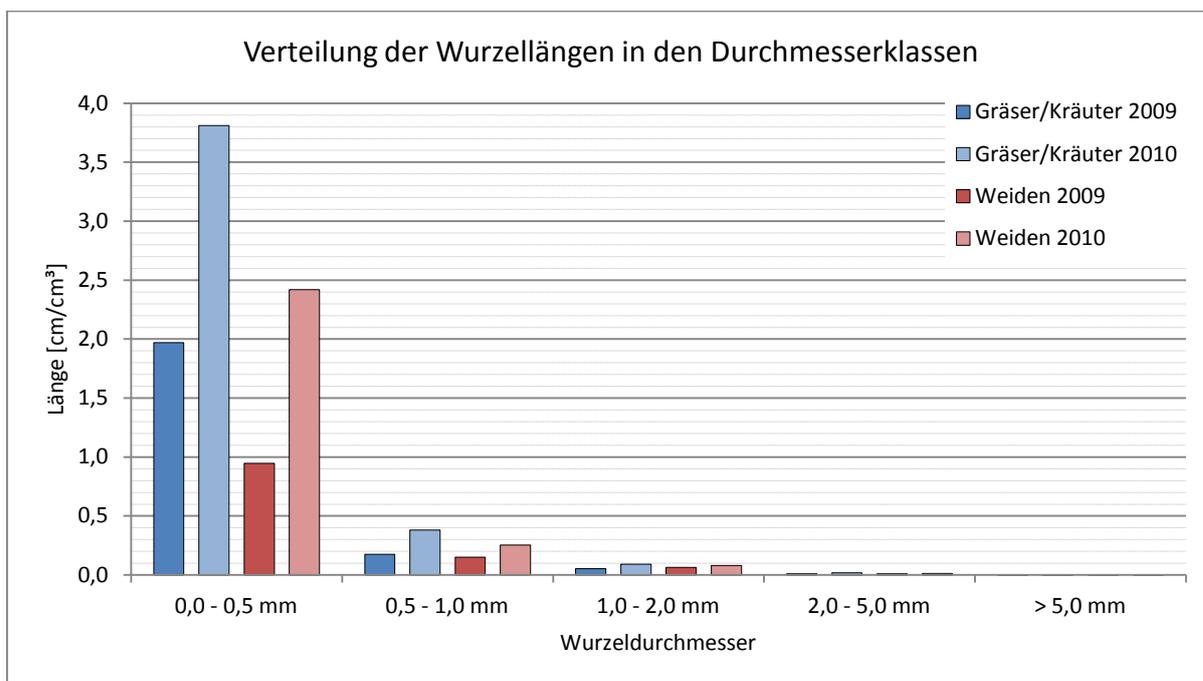


Abb. 4.18: Verteilung der Wurzellängen in den Durchmesserklassen
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

In Bezug auf die Gesamtwurzellänge pro Lysimeter sind die Wurzeln bis zu einem Durchmesser von $0,5 \text{ mm}$, mit durchschnittlich 2 cm/cm^3 (2009) und $3,8 \text{ cm/cm}^3$ (2010) bei den Gräsern und Kräutern bzw. $0,9 \text{ cm/cm}^3$ (2009) und $2,4 \text{ cm/cm}^3$ (2010) bei den Weiden, deutlich am häufigsten vertreten. Die Wurzeln mit einem Durchmesser größer als 2 mm sind hingegen mit einem maximalen Durchschnittswert von $0,018 \text{ cm/cm}^3$ (Weiden, 2009) sehr selten vorhanden.

In Abbildung 4.19 stehen die Gesamtlängen der Weiden- und Gräser/Kräuterwurzeln pro cm^3 Boden im direkten Vergleich:

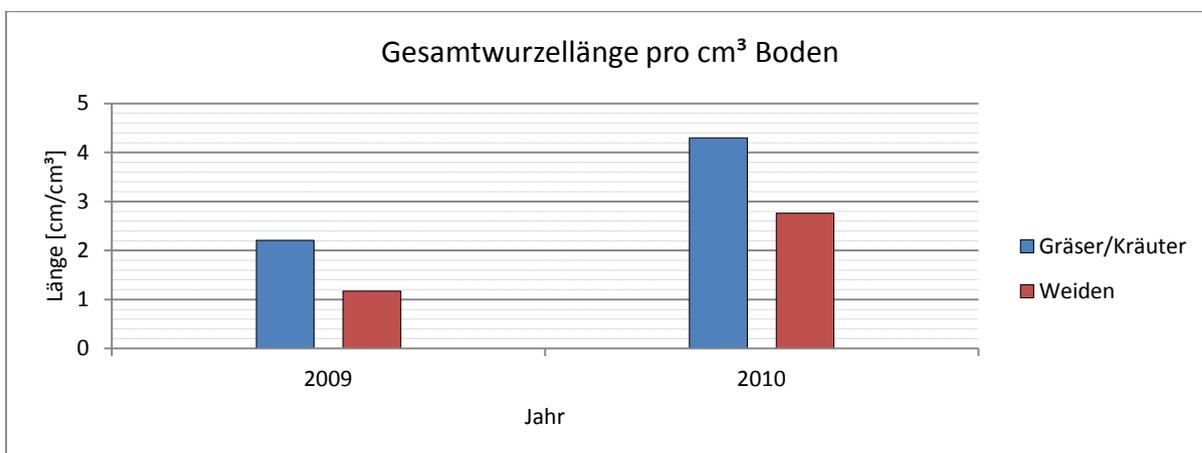


Abb. 4.19: Gesamtwurzellänge der einzelnen Lysimeter
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Die anschließenden Diagramme stellen das Wurzelvolumen pro cm^3 dar:

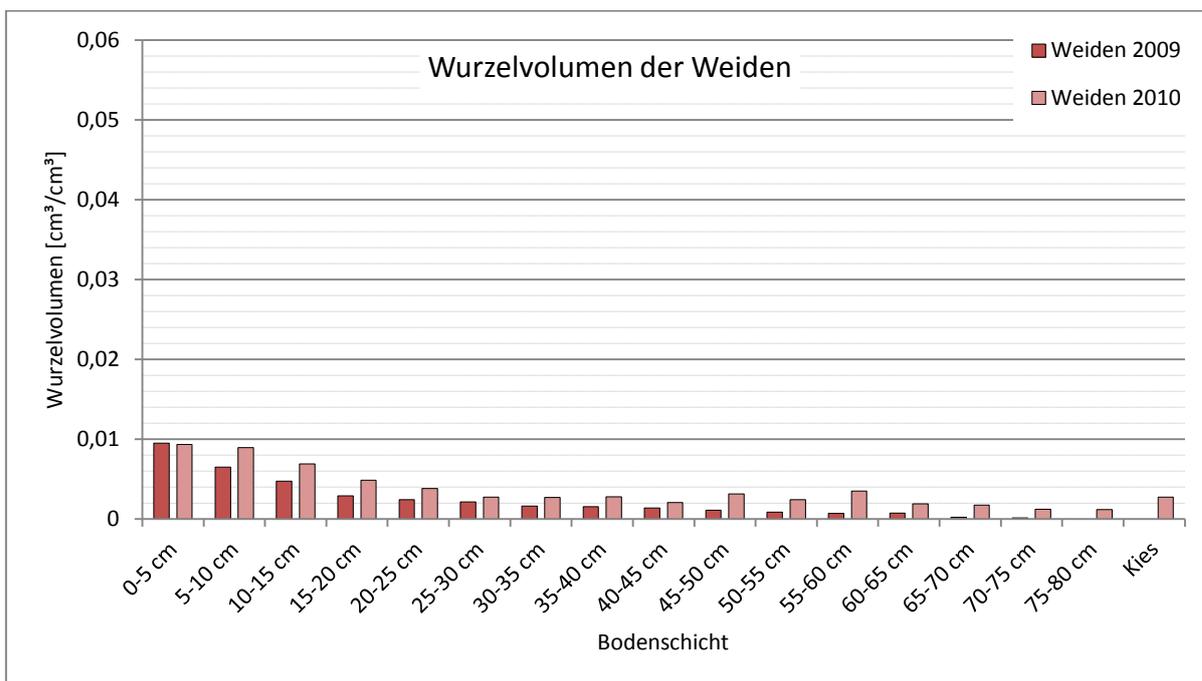


Abb. 4.20: Volumen der Weidenwurzeln pro cm^3 Boden
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

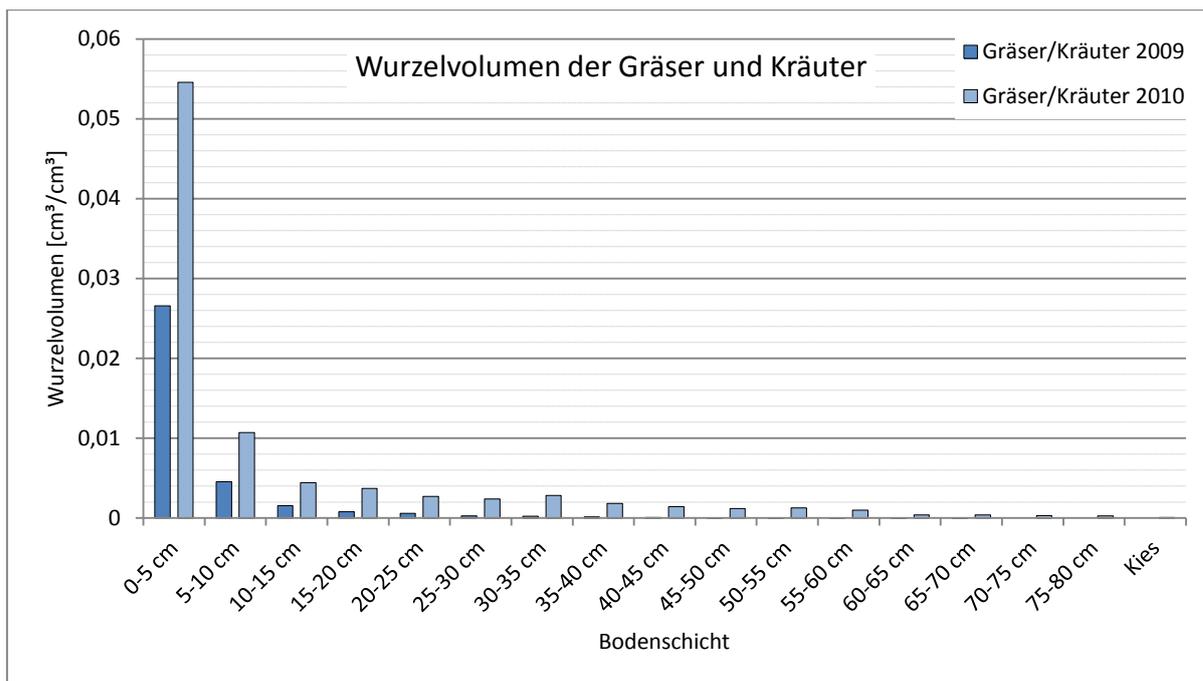


Abb. 4.21: Volumen der Gräser- und Kräuterwurzeln pro cm³ Boden
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Der Wurzel-Volumenanteil der Weiden liegt in beiden Jahren in allen Schichten unter 1%. In der ersten Schicht sinkt der Anteil sogar von 0,0095 cm³/cm³ (2009) auf 0,0093 cm³/cm³ (2010). Im Gegensatz dazu nehmen die Gräser und Kräuter in der Schicht von 0-5 cm mit 0,027 cm³/cm³ (2009) und 0,055 cm³/cm³ (2010) einen relativ hohen Anteil am Bodenvolumen ein. Obwohl die Gräser und Kräuter die oberste Bodenschicht im ersten Jahr sehr viel dichter bewurzeln als die Weiden, beträgt das durchschnittliche Wurzelvolumen im ersten Jahr bei beiden Bewuchsarten 0,0025 cm³ pro cm³ Boden (siehe Abb. 4.23), da die Weiden im Gegensatz zu den Gräsern und Kräutern tiefer und gleichmäßiger wurzeln.

Die Verteilung der Volumina ist der Wurzellängenverteilung sehr ähnlich. Ein großer Unterschied liegt jedoch im Anteil der Durchmesserklassen. In Hinblick aufs Volumen sind die größeren Durchmesserklassen stärker vertreten als bei den Wurzellängen, da der Anteil am Gesamtwurzelvolumen zusammen mit dem Wurzeldurchmesser bei gleicher Wurzellängenverteilung exponentiell ansteigt:

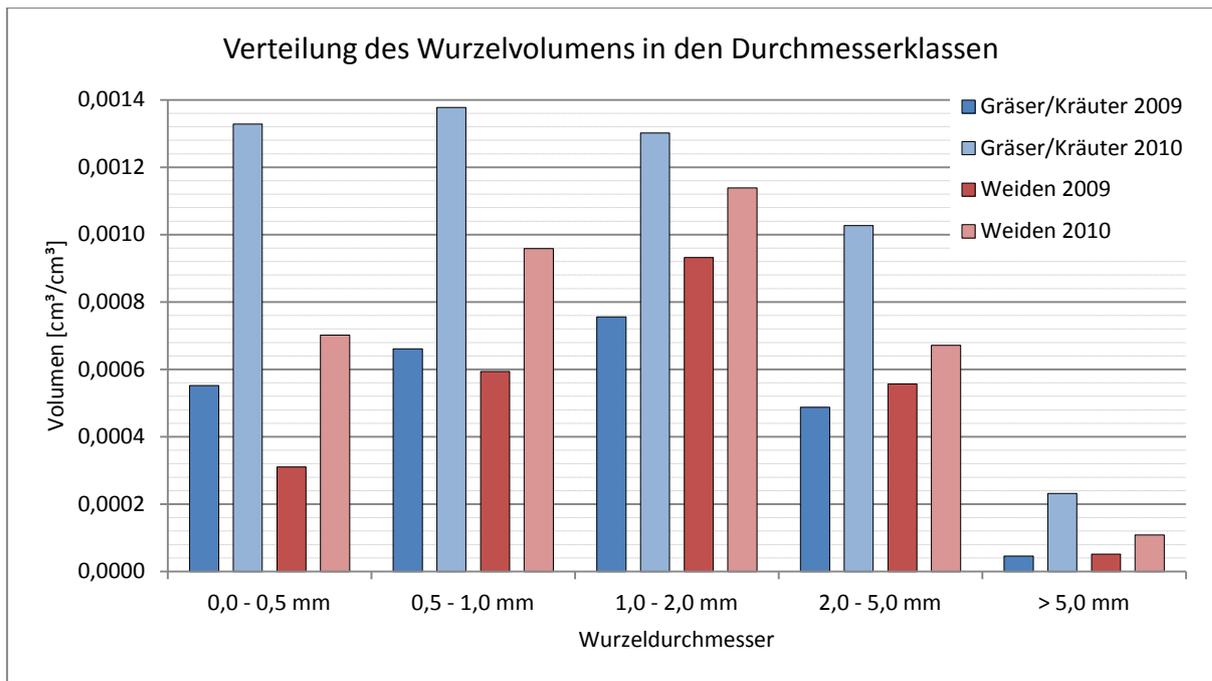


Abb. 4.22: Verteilung des Wurzelvolumens in den Durchmesserklassen
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Mit Ausnahme der Gräser- und Kräuterwurzeln von 2010, bei denen die ersten drei Durchmesserklassen sehr gleichmäßig verteilt sind und der größte Volumenanteil pro cm³ Boden mit 0,00138 cm³ in der zweiten Durchmesserklasse liegt, steigt die Volumenverteilung der anderen Wurzeln bis zur dritten Durchmesserklasse stetig an. Die Gräser und Kräuter erreichen hier 0,00076 cm³/cm³ (2009) bzw. 0,0013 cm³/cm³ (2010), während der Volumenanteil der Weiden 0,00093 cm³/cm³ (2009) bzw. 0,00114 cm³/cm³ (2010) beträgt. Der Anteil der Wurzeln mit Durchmessern zwischen 2 und 5 mm ist bei beiden Bewuchsarten und Vegetationsperioden geringer als bei der Durchmesserklasse von 1 bis 2 mm. Die Wurzeln mit Durchmessern über 5 mm sind wie bei den Wurzellängen am geringsten vertreten.

Der durchschnittliche Feinwurzelanteil (Durchmesser < 2 mm) ergibt bei den Weiden 75,7% (2009) und 72,5% (2010) bzw. bei den Gräsern und Kräutern 94,2% (2009) und 75,1% (2010). Diese unterschiedliche Entwicklung ist auf ein schnelleres Dickenwachstum bei den Kräutern in der zweiten Vegetationsperiode zurückzuführen.

Abbildung 4.23 zeigt die Entwicklung der beiden Bewuchsarten in Hinblick auf das Gesamtwurzelvolumen pro cm³:

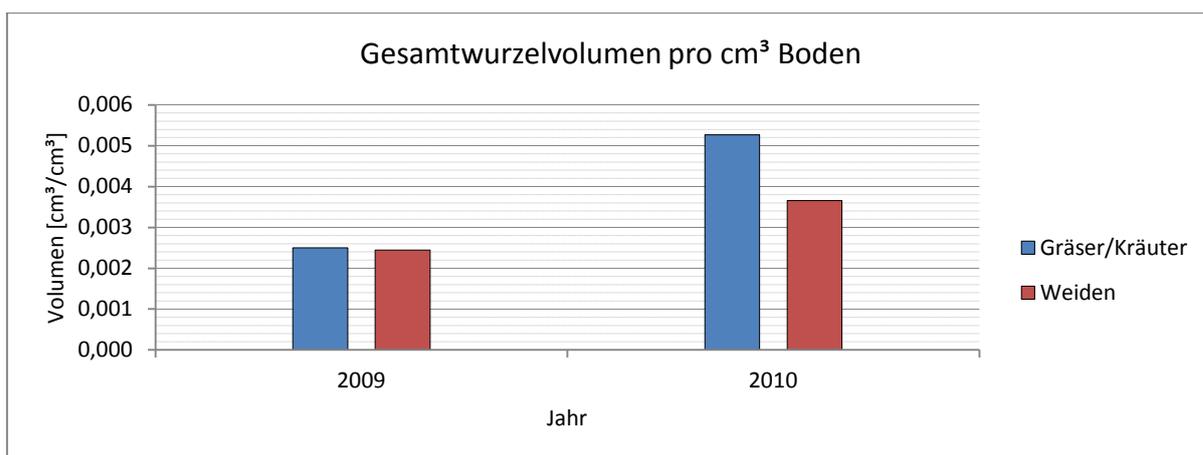


Abb. 4.23: Gesamtwurzelvolumen der einzelnen Lysimeter
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Im Durchschnitt ergibt das Wurzelvolumen pro cm³ Boden 0,0025 cm³ (2009) und 0,0037 cm³ (2010) bei den Weiden bzw. 0,0025 cm³ (2009) und 0,0053 cm³ (2010) bei den Gräsern und Kräutern.

Nach dem Scannen wurden die Wurzeln auf Gewichtskonstanz getrocknet und anschließend die Biomasse erhoben. Die beiden folgenden Grafiken zeigen die Trockenmasse der Weiden- bzw. der Gräser- und Kräuterwurzeln:

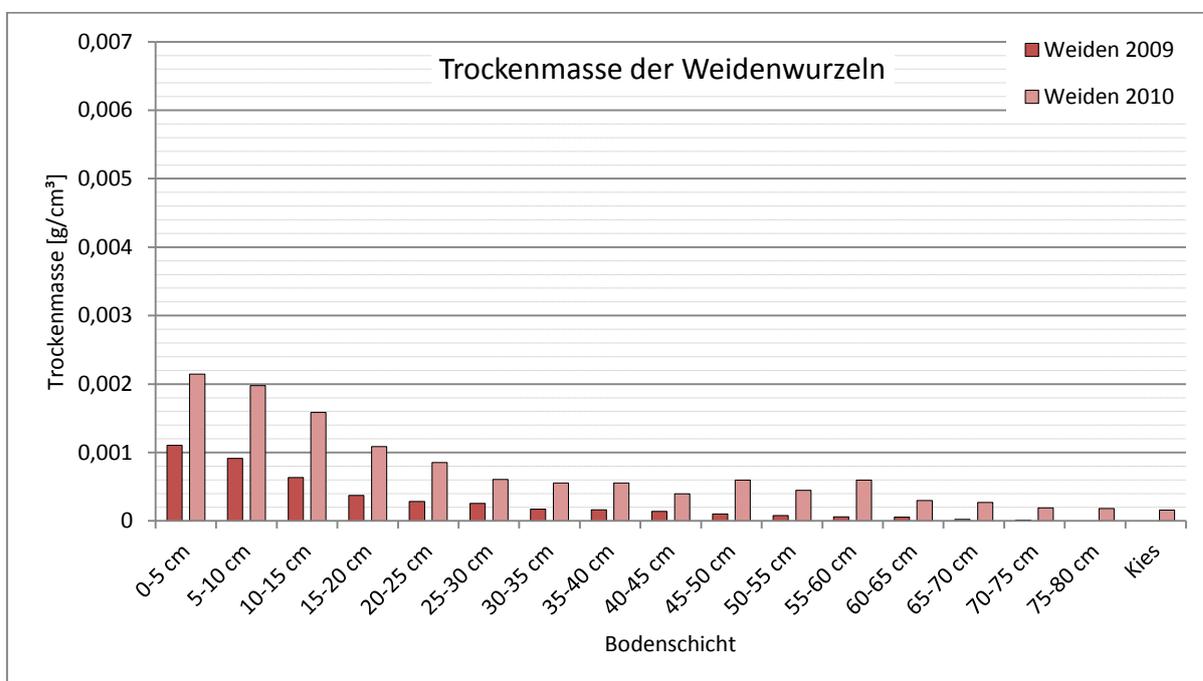


Abb. 4.24: Trockenmasse der Weidenwurzeln in g pro cm³
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

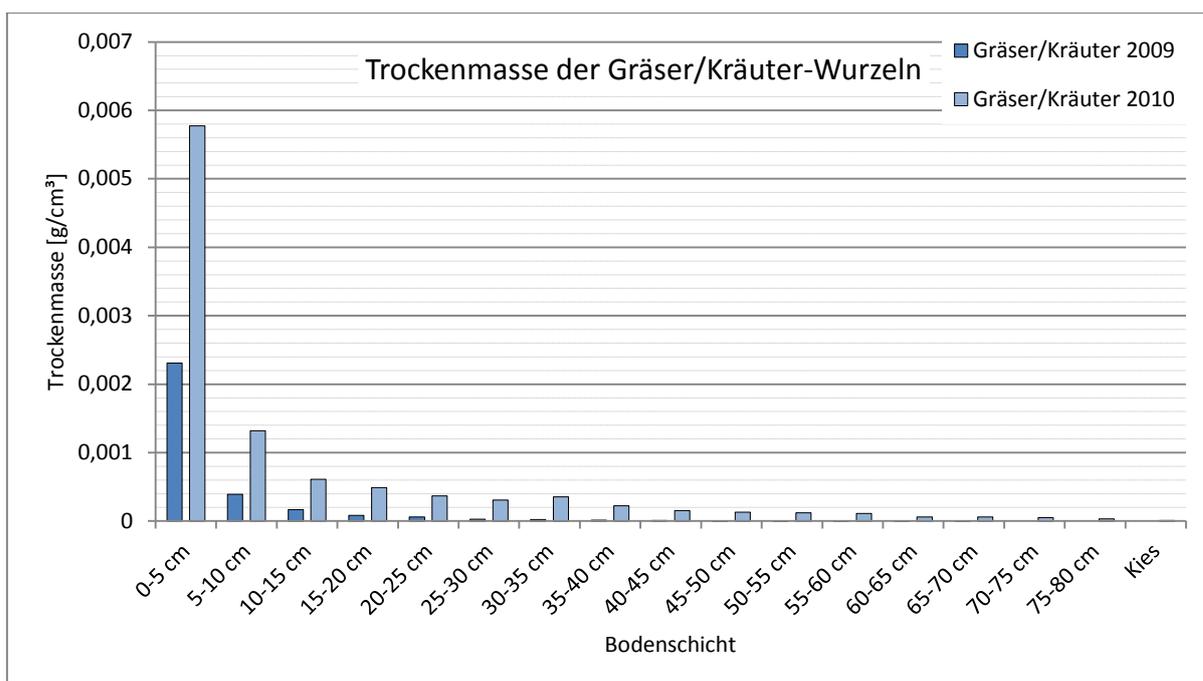


Abb. 4.25: Trockenmasse der Gräser/Kräuter-Wurzeln in g pro cm³ Boden
[Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009/2010]

Die Trockenmasse der Wurzeln sinkt mit jeder Schicht, wobei die Weiden (2010) in 45-50 cm Tiefe die einzige Ausnahme bilden. Den Maximalwert erreichen die Gräser und Kräuter (2010) mit 0,00577 g/cm³ in 0-5 cm Tiefe, was 56,7% der gesamten Gräser/Kräuter-Wurzelmasse von 2010 entspricht. Den größten Anteil an der Gesamtwurzelmasse nehmen die Gräser und Kräuter (2009) ebenfalls in der obersten Schicht mit 0,00231 g/cm³ bzw. 74,5% ein. Der Maximalwert der Weiden beträgt 0,00215 g/cm³ (2010) in derselben Schicht und dieser entspricht 17% der Trockenmasse.

4.3 Meteorologische Daten

Abbildung 4.26 zeigt den von der Wetterstation in der Versuchsanlage Deutsch-Wagram registrierten Temperatur-, Luftfeuchte- und Niederschlagsverlauf von 01.03.-31.10.2011:

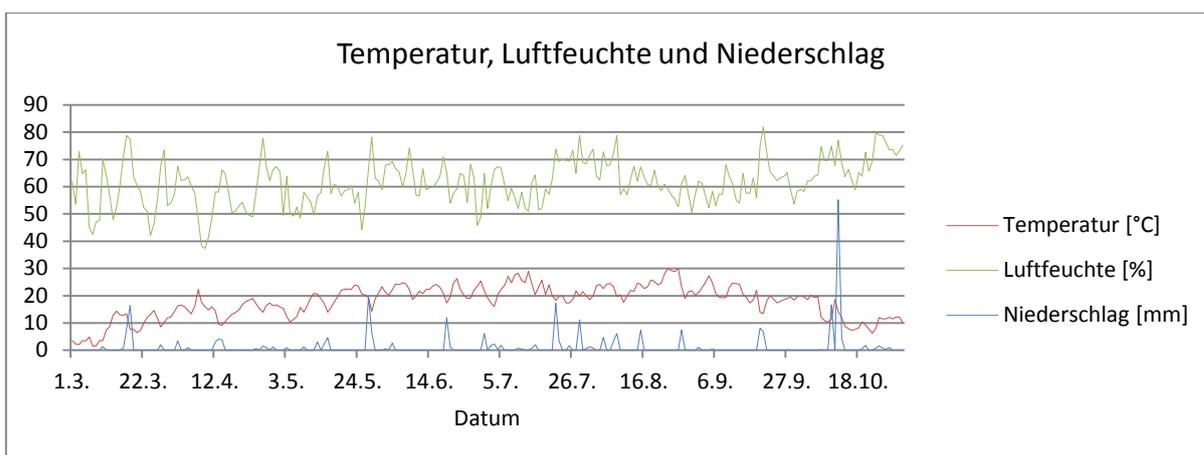


Abb. 4.26: Temperatur-, Luftfeuchte- und Niederschlagsverteilung
[Deutsch-Wagram, März-Oktober 2011]

Um diese Daten besser vergleichen zu können, wurde der Monatsmittelwert der Temperatur und der Luftfeuchte bzw. der Monatsgesamtniederschlag errechnet und den langjährigen Mittelwerten (1951-1980), welche von einer privaten Wetterstation in Deutsch-Wagram aufgenommen wurden und im Internet frei abrufbar sind, gegenübergestellt [BERGAUER, 2011]:

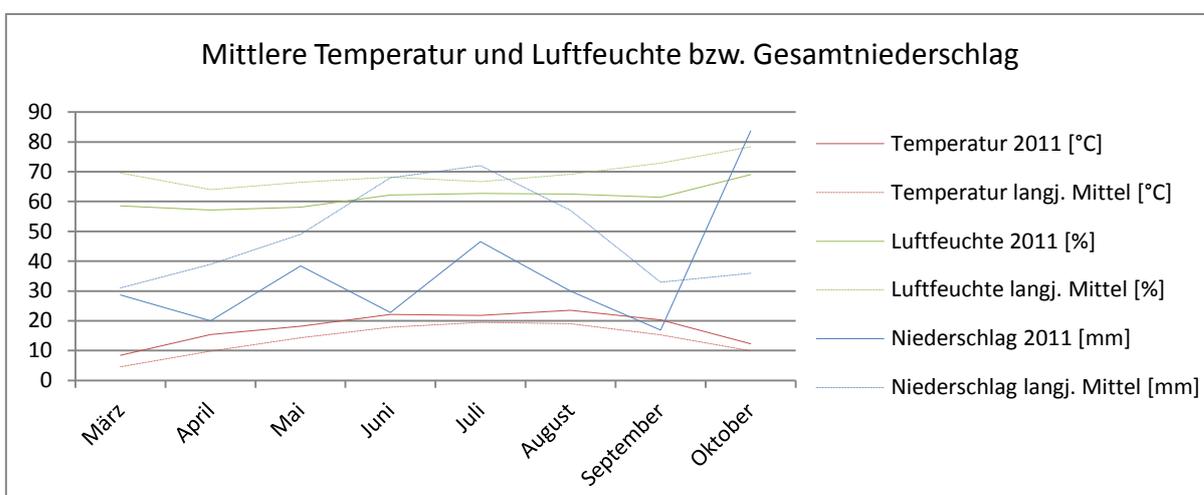


Abb. 4.27: Mittlere Temperatur und Luftfeuchte bzw. Gesamtniederschlag
[Deutsch-Wagram, März-Oktober 2011; langjährige Mittel nach BERGAUER, 2011]

Aus der Grafik lässt sich ablesen, dass über die gesamte Vegetationsperiode die Messwerte der Lufttemperatur über bzw. der Luftfeuchte und des Gesamtniederschlags (mit Ausnahme von Oktober) unter dem langjährigen Mittelwert liegen. Die hohe Niederschlagsmenge von 83,7 mm im Oktober ist auf den sehr niederschlagsreichen 12. Oktober zurückzuführen, da hier der Niederschlag mit 55,2 mm einen Anteil von 65,9% des Monatsgesamtniederschlags ausgemacht hat. Der restliche Oktober verlief im Verhältnis zum langjährigen Mittel und somit dieser Vegetationsperiode entsprechend sehr niederschlagsarm.

4.4 Bodenphysikalische Messergebnisse

Mit Hilfe der Tensiometer bzw. der TDR-Sonden konnte sowohl die Bodenwasserspannung als auch der Bodenwassergehalt stetig aufgenommen werden. An dieser Stelle werden die Daten von April bis September 2011 behandelt und mit den Ergebnissen von 2009 verglichen. Da es einige Messausfälle gegeben hat, sind die Daten teilweise nicht vorhanden. Hierbei ist zu beachten, dass der Tensiometer des wägbaren Lysimeters ohne Bewuchs in 30 cm Bodentiefe über die gesamte Vegetationsperiode ausgefallen ist.

4.4.1 Bodenwasserspannung

Mit jeweils vier Tensiometern pro wägbaren Lysimeter wurde die Bodenwasserspannung in unterschiedlichen Bodenschichten fortlaufend erfasst. Diese liegen in 5, 15, 30 und 50 cm Tiefe. Um die Werte mit denen des Bodenwassergehalts besser vergleichen zu können, beginnt die Datumsanzeige der Diagramme mit 01. April, obwohl die Tensiometer nach der Winterpause erst am 20. April wieder installiert wurden. In Abbildung 4.28 mit dem Verlauf der Bodenwasserspannung der Gräser/Kräuter-Begrünung ist zu beachten, dass die Tensiometer in 5 cm Tiefe von 21.05.-30.06. bzw. in 15 cm Tiefe von 06.06-30.06 keine Daten übertragen haben und die Werte zwischen 30.06. und 07.08. möglicherweise auf Messfehlern basieren. Diese werden daher in den Berechnungen des Mittelwertes nicht einbezogen.

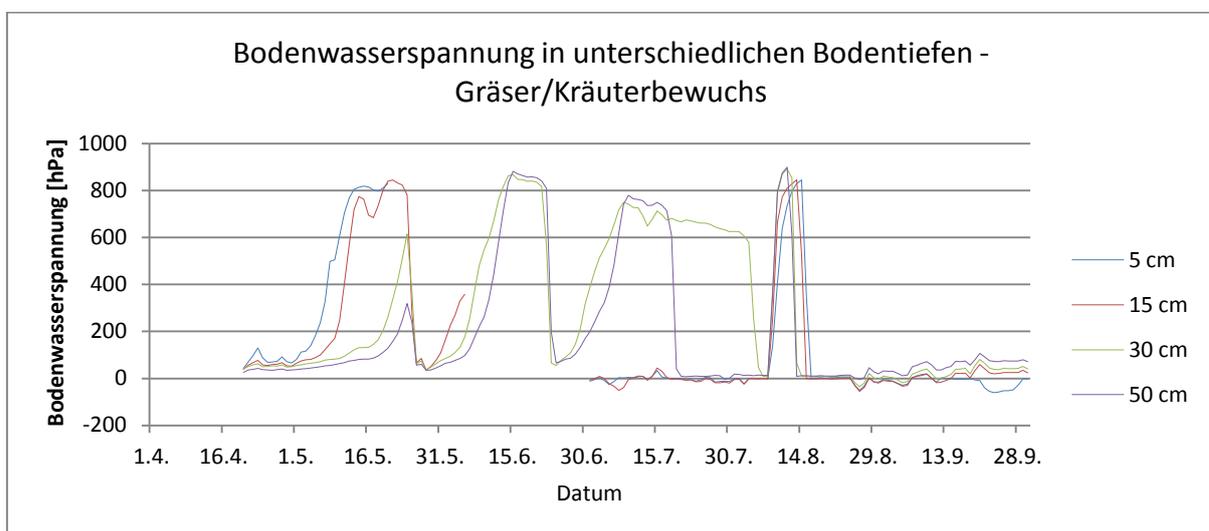


Abb. 4.28: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 18 (Gräser/Kräuterbewuchs)
[Deutsch-Wagram, 20.04.-30.09.2011]

Am Verlauf ist zu erkennen, dass bis Ende Mai in der 5 bzw. 15 cm tiefen Bodenschicht eine höhere Wasserspannung herrscht als in den anderen Schichten und zwischen Anfang Juni und Ende Juli bzw. Anfang August die Saugspannung in den beiden tieferen Schichten, bis auf ein Tal Ende Juni, welches auf die Bewässerung am 22.06. zurückzuführen ist, stark an-

steigt. Von 08.08-14.08. erreicht die Wasserspannung in allen Schichten Maximalwerte von 844,35 hPa bis 899,19 hPa und fällt danach relativ gleichmäßig auf Werte zwischen -60,09 hPa und 106,14 hPa ab.

Im Gegensatz dazu steht der Saugspannungsverlauf des Weidenlysimeters (siehe Abb. 4.29), welcher bereits auf den ersten Blick Unterschiede erkennen lässt:

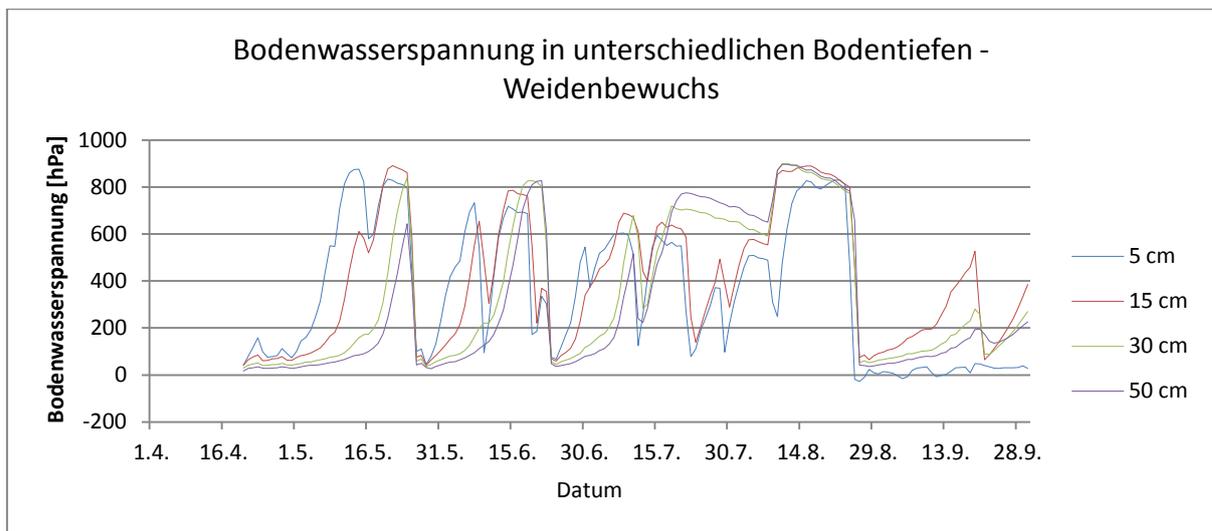


Abb. 4.29: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 20 (Weidenbewuchs)
[Deutsch-Wagram, 20.04.-30.09.2011]

Bei den Weiden sind die Messwerte der unterschiedlichen Bodentiefen ähnlicher zueinander als bei den Gräsern und Kräutern. Hierbei ist zu erkennen, dass die Saugspannung je nach Bodentiefe später ansteigt und bei Bewässerung (20.04., 24.04., 29.04., 25.05., 22.06., 10.07. und 25.08.) alle Werte abfallen. Desweiteren ist auffällig, dass die Wasserspannung zwischen 19.07. und 15.08 in 30 und 50 cm Tiefe mit einem Maximalwert von 775,84 hPa weit höher liegt als in den darüber liegenden Schichten. Gegen Ende der Vegetationsperiode, nach der Bewässerung am 25.08., sinkt die Wasserspannung in 5 cm Tiefe in den Minusbereich und steigt danach nur mehr geringfügig an.

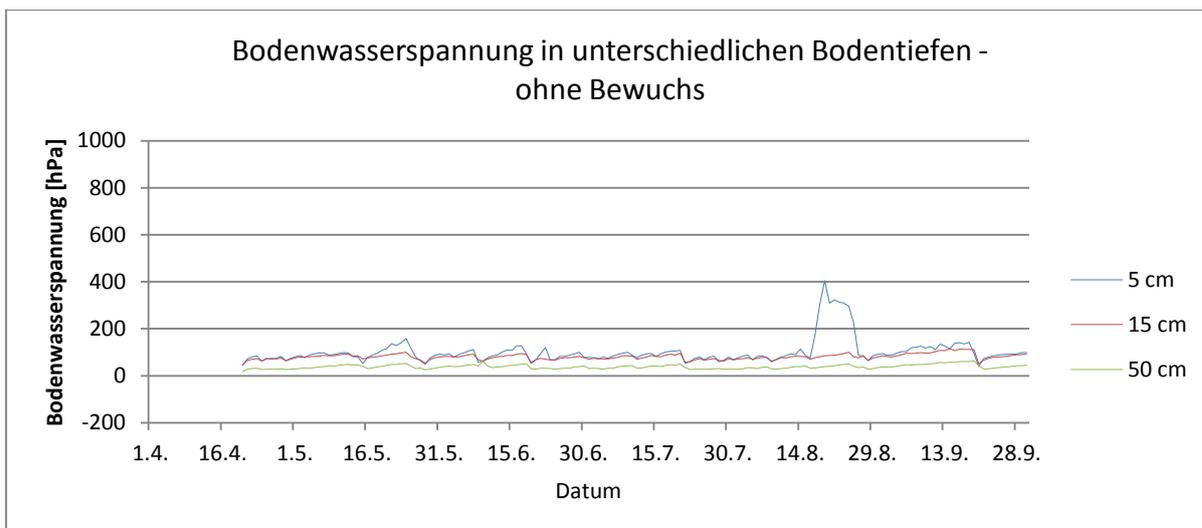


Abb. 4.30: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 19 (ohne Bewuchs)
[Deutsch-Wagram, 20.04.-30.09.2011]

Die Tensiometer im Lysimeter ohne Bewuchs haben bis auf zwei Auffälligkeiten zwischen 19.05. und 28.05. bzw. 17.08. und 25.08. mit einem Maximalwert von 404,8 hPa einen sehr regelmäßigen Wasserspannungsverlauf, mit Werten unter 150 hPa, gemessen.

Die beiden folgenden Grafiken bieten einen direkten Vergleich der unterschiedlichen Bewuchsarten in 15 bzw. 50 cm Bodentiefe, wobei das Tensiometer im Gräser/Kräuter-Lysimeter in 15 cm Bodentiefe von 06.06. bis 30.06. keine Daten aufgenommen hat:

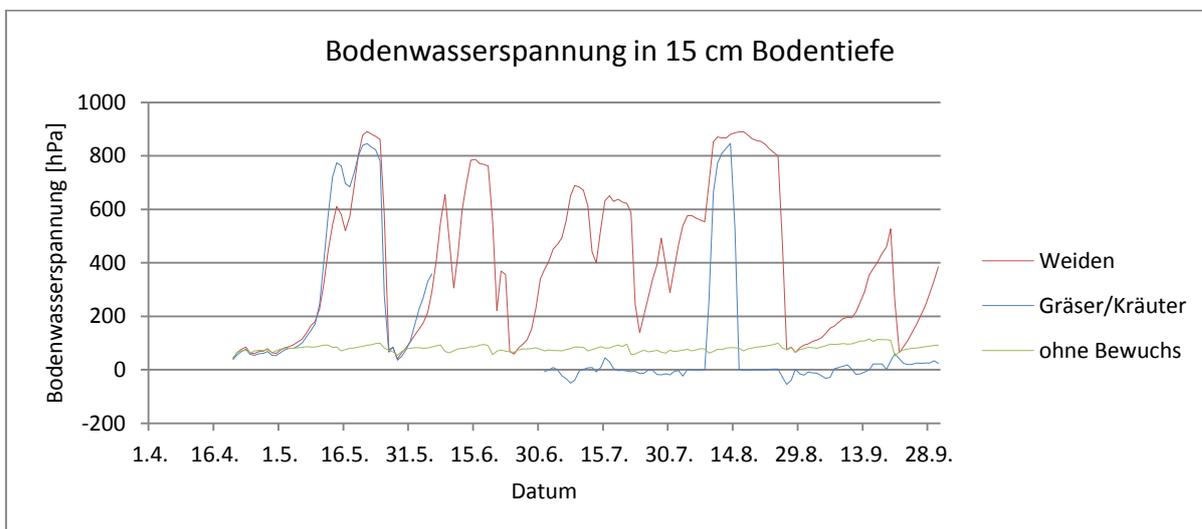


Abb. 4.31: Verlauf der Bodenwasserspannung in 15 cm Bodentiefe mit Weiden- oder Gräser/Kräuterbewuchs bzw. ohne Bewuchs
[Deutsch-Wagram, 20.04.-30.09.2011]

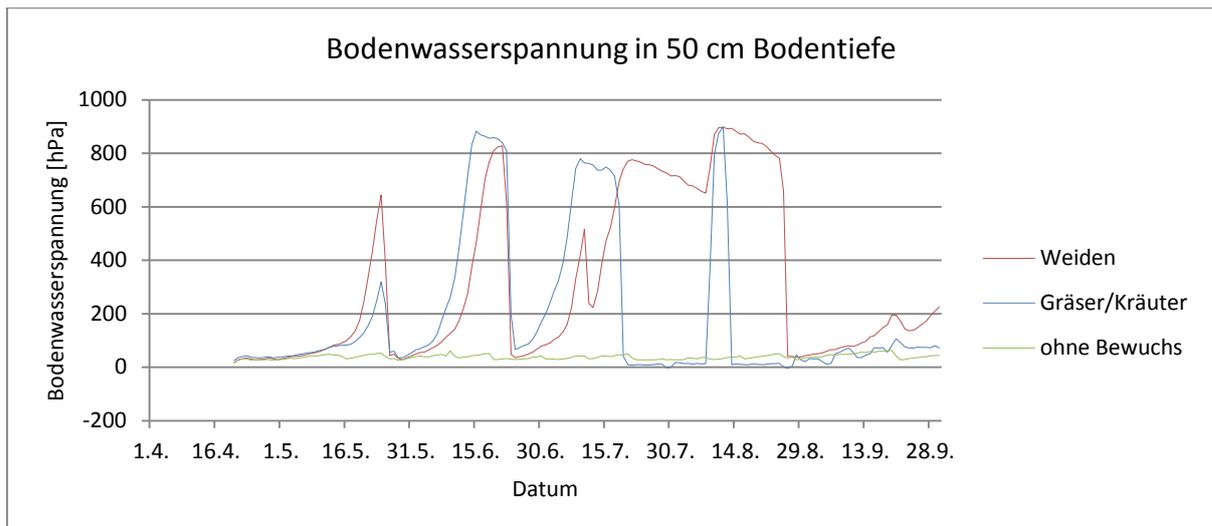


Abb. 4.32: Verlauf der Bodenwasserspannung in 50 cm Bodentiefe mit Weiden- oder Gräser/Kräuterbewuchs bzw. ohne Bewuchs
[Deutsch-Wagram, 20.04.-30.09.2011]

Beide Grafiken zeigen, dass die Wasserspannung der Weiden im Vergleich zu den Gräsern und Kräutern öfter ansteigt, was auch höhere Mittelwerte zur Folge hat. Durchschnittlich beträgt die Bodenwasserspannung der Weiden 352,1 hPa pro Tag und Bodenschicht. Die Gräser und Kräuter erreichen hingegen einen Mittelwert von 211,4 hPa. Da die Gräser und Kräuter allerdings auch einen niedrigeren Bodenwassergehalt aufweisen (siehe Abschnitt 4.4.2) und sich diese Werte üblicherweise indirekt proportional verhalten, ist anzunehmen, dass die Tensiometer der Weidenlysimeter nicht nur die Wasserspannung des Bodens, sondern auch die Saugspannung der direkt an der Keramikzelle anliegenden Wurzeln registriert haben.

Sehr auffällig ist die Verdunstungsleistung der Pflanzen, da beide Vegetationsarten eine weitaus höhere Wasserspannung aufzeigen als der Lysimeter ohne Bewuchs, bei dem die Durchschnittswerte lediglich bei 73,3 hPa pro Tag und Bodenschicht liegen.

Nach Bewässerung

Abbildung 4.33 verdeutlicht den Spannungsabfall nach der Bewässerung am 25.08., wobei die Weiden in 5 cm Tiefe bzw. die Gräser und Kräuter in allen Schichten vor der Bewässerung Spannungswerte um 0hPa aufweisen und danach in den Minus-Bereich wandern. Die Wasserspannungswerte der Weiden in 15 und 30 cm Bodentiefe liegen vor der Bewässerung um 800 hPa und fallen danach fast zeitgleich auf Werte um 50 hPa.

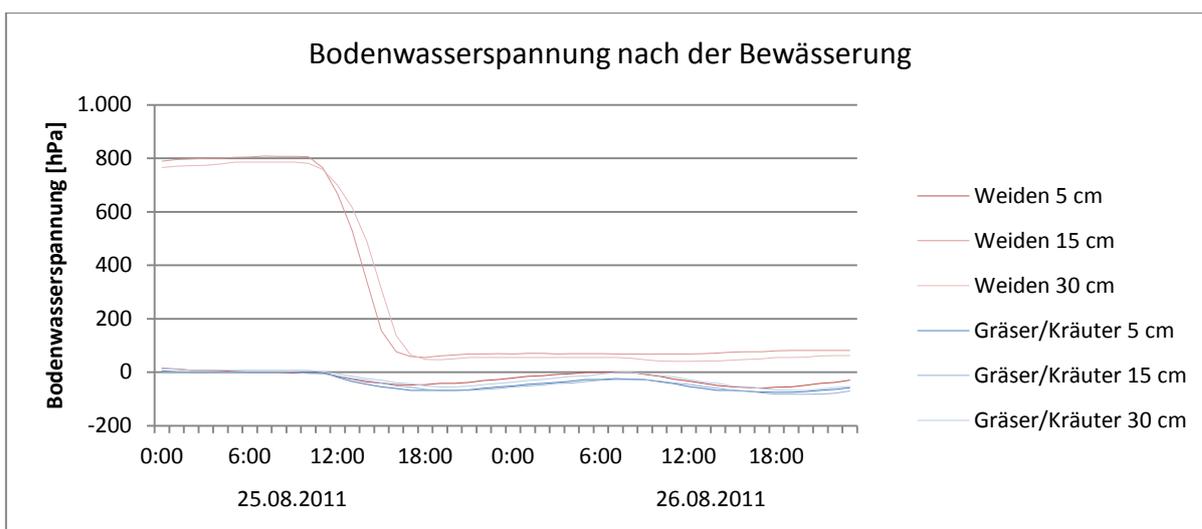


Abb. 4.33: Verlauf der Bodenwasserspannung nach der Bewässerung am 25.08.2011 um 10:00
[Deutsch-Wagram, 25.08.-26.08.2011]

4.4.2 Bodenwassergehalt

In den wägbaren Lysimetern wurde der Bodenwassergehalt mit Hilfe der TDR-Sonden in 5 und 30 cm Bodentiefe über die gesamte Vegetationsperiode gemessen, wobei zu beachten ist, dass an dieser Stelle der Vergleich der Lysimeter untereinander aussagekräftiger ist, als die absoluten Werte. Die folgenden Diagramme verdeutlichen die Unterschiede der verschiedenen Bewuchsarten in der jeweiligen Bodenschicht:

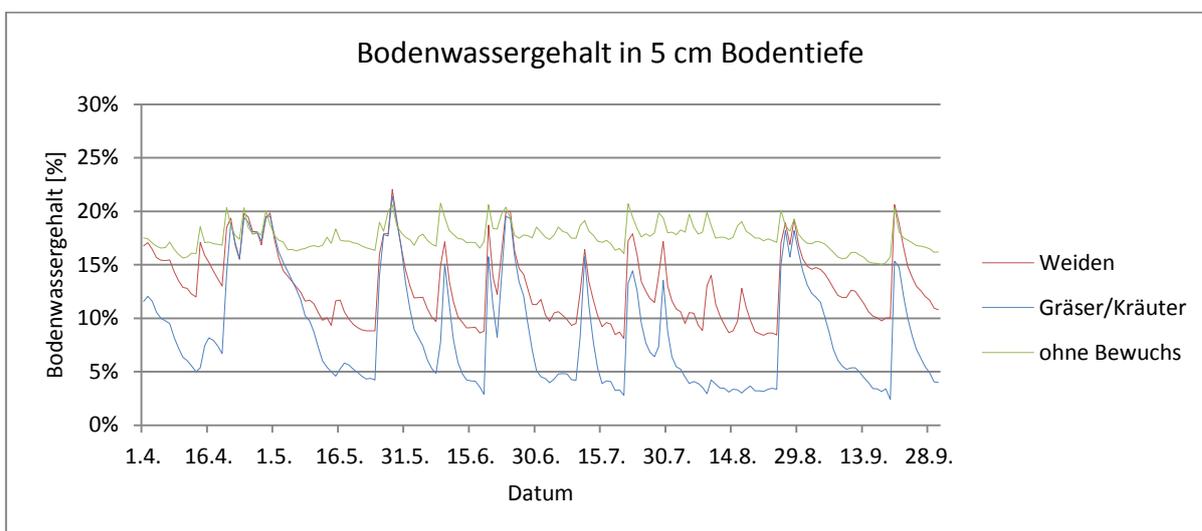


Abb. 4.34: Verlauf des Bodenwassergehalts in 5 cm Bodentiefe
[Deutsch-Wagram, 01.04.-30.09.2011]

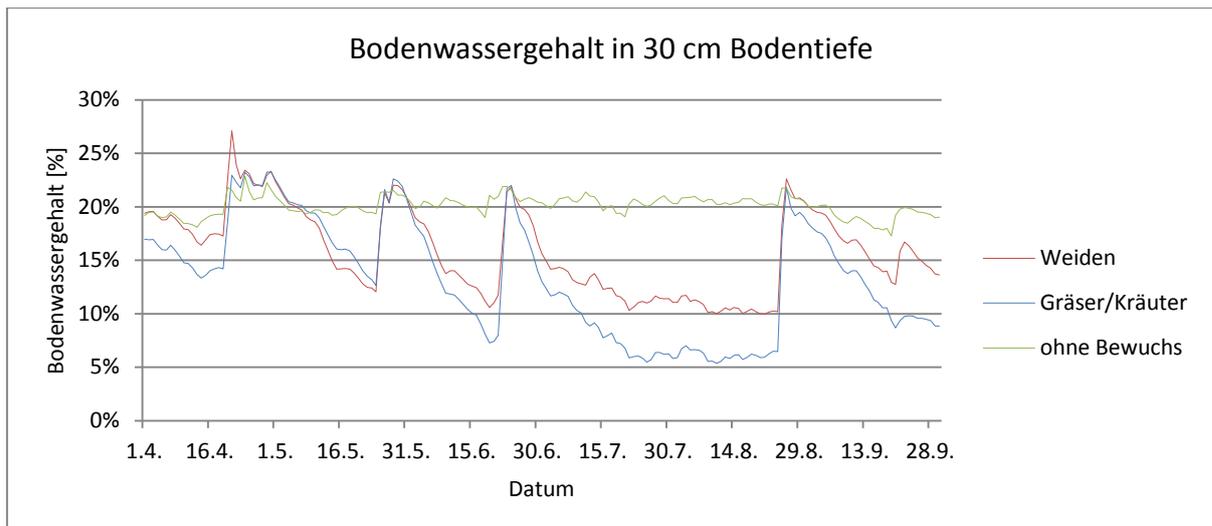


Abb. 4.35: Verlauf des Bodenwassergehalts in 30cm Bodentiefe
[Deutsch-Wagram, 01.04.-30.09. 2011]

In beiden Messtiefen liegt der Wassergehalt der Gräser und Kräuter bis auf Regenereignisse und bei Bewässerung durchgehend unter den Weiden. Besonders in 5 cm Bodentiefe liegt die Differenz höchstens bei 11,8% und durchschnittlich bei 4,3%, wohingegen in 30 cm Tiefe der Unterschied nur mehr durchschnittlich 2,5% beträgt. Der Bodenwassergehalt im Lysimeter ohne Bewuchs weist in beiden Messtiefen durchgehend Werte zwischen 15 und 22,9% auf.

Nach Bewässerung

Vor der Bewässerung am 25.08. sind die Wassergehaltswerte relativ unterschiedlich (siehe Abb. 4.36). Die Differenz zwischen den Weiden und den Gräsern und Kräutern liegt vor 10:00 in 5 cm Bodentiefe bei 4,8% bzw. in 30 cm Tiefe bei 3,3%. Nach der Bewässerung steigt der Bodenwassergehalt, in der tiefer liegenden Schicht etwas zeitversetzt, auf Werte von 26,6 bis 29% an, um danach langsam wieder abzufallen, wobei die Weiden und die Gräser und Kräuter in den jeweiligen Bodenschichten sehr ähnliche Werte aufweisen.

Die Bewässerungsmenge und genaue Uhrzeit ist im Anhang Kapitel 9.2 genauer angegeben.

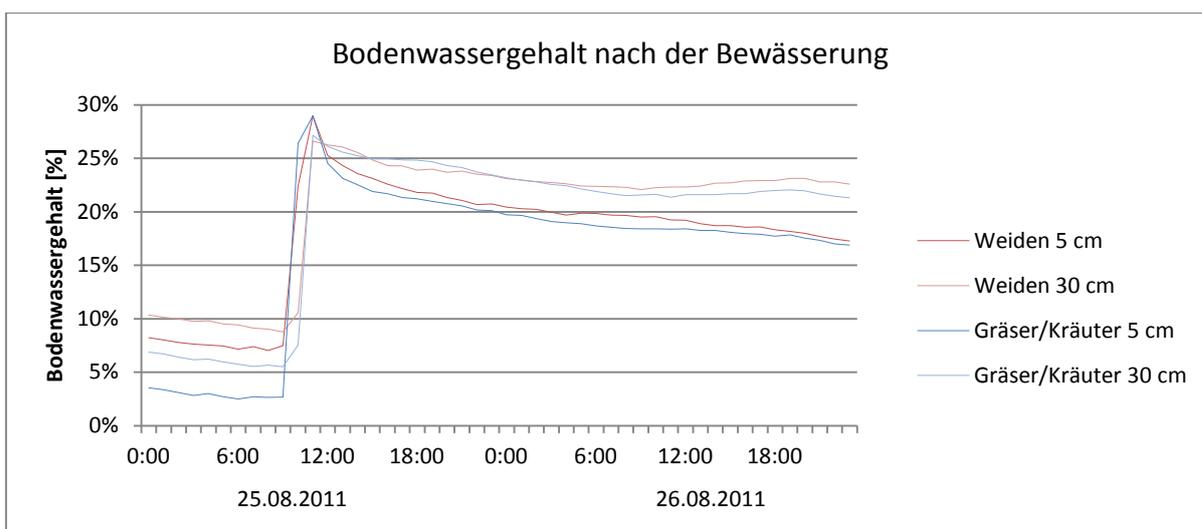


Abb. 4.36: Verlauf des Bodenwassergehalts nach der Bewässerung am 25.08.2011 um 10:00
[Deutsch-Wagram, 25.08.-26.08.2011]

4.4.3 Durchsickerung

Mit Hilfe der Kippzähler wurde die Durchsickerungsleistung gemessen, wobei es bei den Gräsern und Kräutern von 19.04. bis 02.05. zu Fehlmessungen gekommen ist und diese Werte daher nicht angeführt werden. Da die Werte der durchströmenden Wassermenge zwischen den Lysimetern mit und ohne Bewuchs sehr unterschiedlich sind, wird die Durchsickerung zur besseren Lesbarkeit in zwei Diagrammen mit denselben Messwerten, aber unterschiedlichen Skalen dargestellt. Um die Differenz zwischen dem Niederschlag und der Durchsickerung besser zu erkennen werden die Sickerwassermengen ebenfalls in mm angegeben und entsprechen somit derselben Menge Liter pro m²:

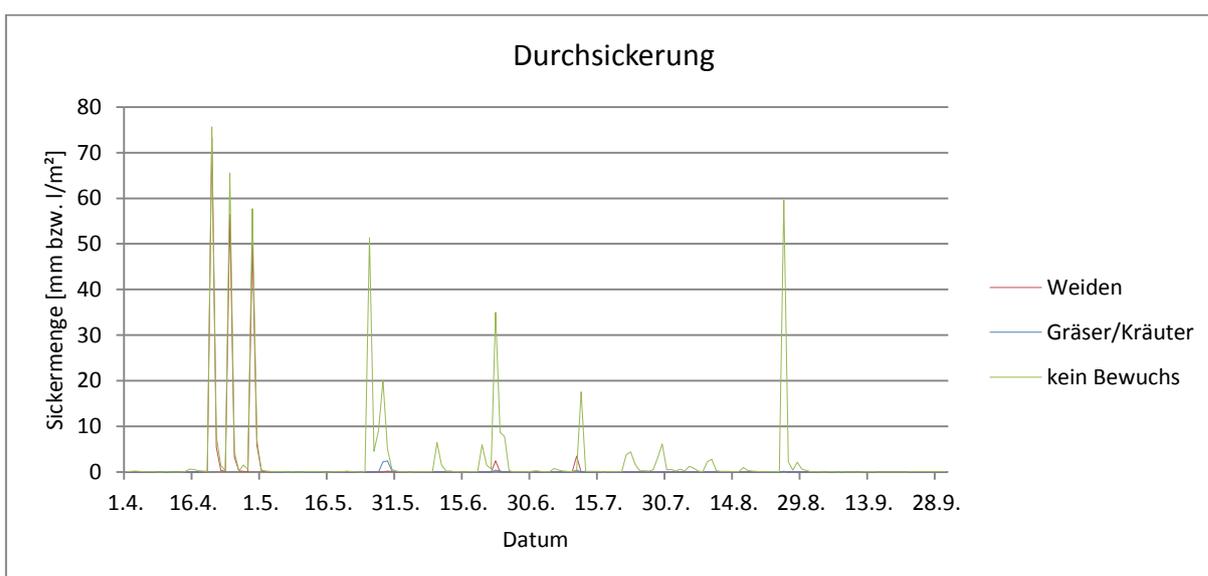


Abb. 4.37: Verlauf der Durchsickerungsleistung (Skala bis 80 mm)
[Deutsch-Wagram, April-September 2011]

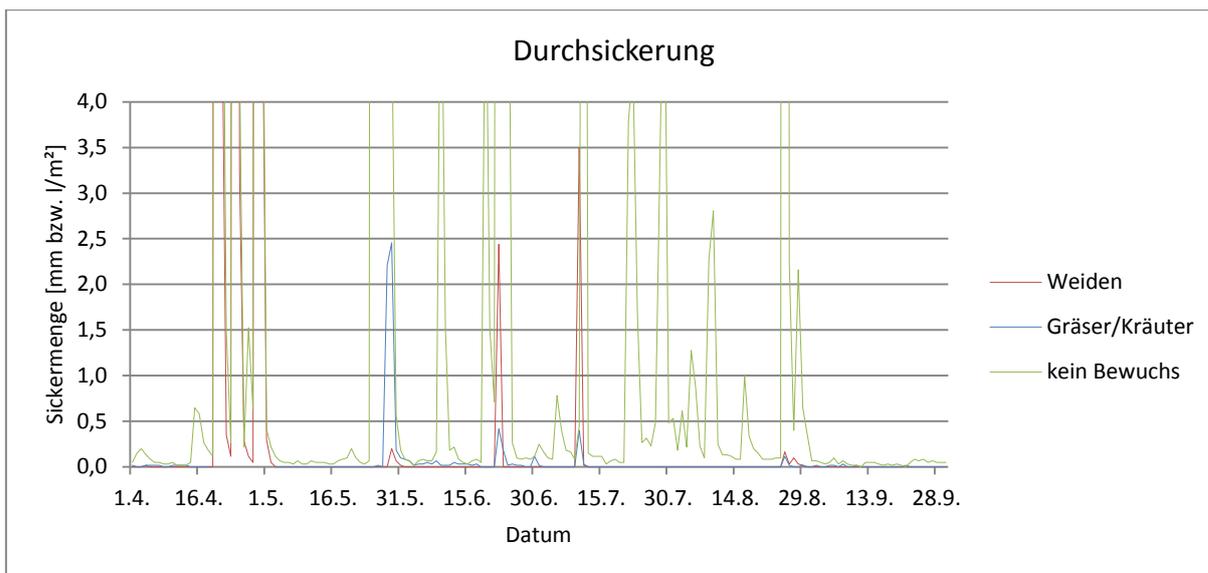


Abb. 4.38: Verlauf der Durchsickerungsleistung (Skala bis 4 mm)
[Deutsch-Wagram, April-September 2011]

Beide Abbildungen verdeutlichen den starken Wasserdurchfluss nach der Bewässerung bzw. einem Regenereignis im vegetationslosen Boden. Die Maximalwerte werden zwischen 20.04. und 29.04. erreicht, da in diesem Zeitraum an drei Tagen bewässert wurde. Diese betragen 75,67 mm bei dem Lysimeter ohne Bewuchs, 73,35 mm bei den Weiden. Leider fehlen für diesen Zeitraum die Daten der Gräser und Kräuter. Vier Tage nach der Bewässerung am 25.05. steigt die Sickerwassermenge bei den Gräsern und Kräutern auf 2,46 mm, was deren gemessenen Maximalwert ergibt, bleibt aber bei den Weiden, mit 0,2 mm, sehr gering. Danach steigen die Werte nur noch nach der Bewässerung am 22.06., mit Maximalwerten der Weiden von 2,44 mm und der Gräser und Kräuter von 0,41 mm, sowie am 10.07., mit 3,5 mm bei den Weiden und 0,4 mm bei den Gräsern und Kräutern, deutlich an. Ebenfalls sehr aussagekräftig sind die Mittelwerte über die gesamte Vegetationsperiode, da sie starke Differenzen zwischen den Weiden und den Lysimetern ohne Bewuchs aufzeigen. Da es bei den Gräsern und Kräutern zu Fehlmessungen gekommen ist, sind deren Mittelwerte nicht aussagekräftig und werden an dieser Stelle nicht behandelt. Die mittlere Sickerwassermenge des vegetationslosen Bodens beträgt 2,78 mm, wohingegen die Weiden 1,11 mm (39,9% der Nullvariante) Wasser pro Tag durchströmen lassen.

4.4.4 Evapotranspiration und K_c -Werte

Die Evapotranspiration ET_a konnte mit den Messwerten der Kippzähler und der Wiegeelektronik, sowie den Niederschlags- und Bewässerungsdaten, bis auf den Zeitraum von 19.04. bis 02.05. wegen Fehlmessungen der Kippzähler des Gräser/Kräuter-Lysimeters, für die gesamte Vegetationsperiode berechnet werden:

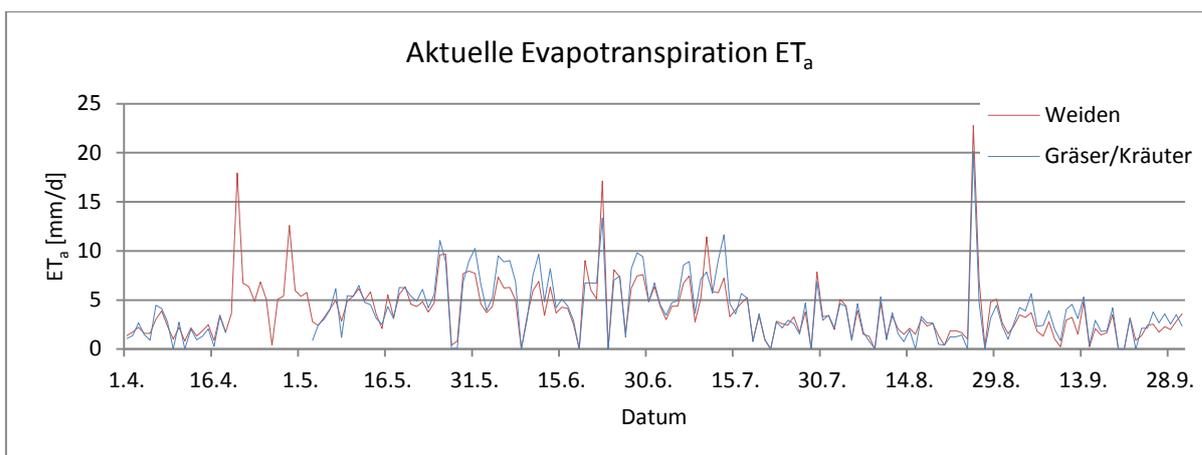


Abb. 4.39: Verlauf der aktuellen Evapotranspiration ET_a
[Deutsch-Wagram, April-September 2011]

Abbildung 4.39 zeigt, dass die Verdunstungsleistung der Weiden und der Gräser und Kräuter sehr ähnlich ist. Die durchschnittliche Evapotranspiration der Weiden beläuft sich auf 3,91 mm/d und die der Gräser und Kräuter auf 4,2 mm/d. Der Maximalwert der Weiden wurde nach der Bewässerung am 25.08. erreicht und beträgt 22,79 mm/d, wobei die Verdunstung der Gräser und Kräuter an diesem Tag, mit 20,14 mm, nur unerheblich niedriger ist.

Mit Hilfe des ET_0 -Calculators, welcher auf der FAO Website frei verfügbar ist, wurde mit den Temperatur-, Luftfeuchte- und Strahlungswerten, bzw. den Koordinaten und der Meereshöhe der Versuchsanlage die Referenzverdunstung ET_0 berechnet. Das Programm wendet hierfür die Penman-Monteith-Formel (vgl. Abschnitt 2.2.3.2) an:

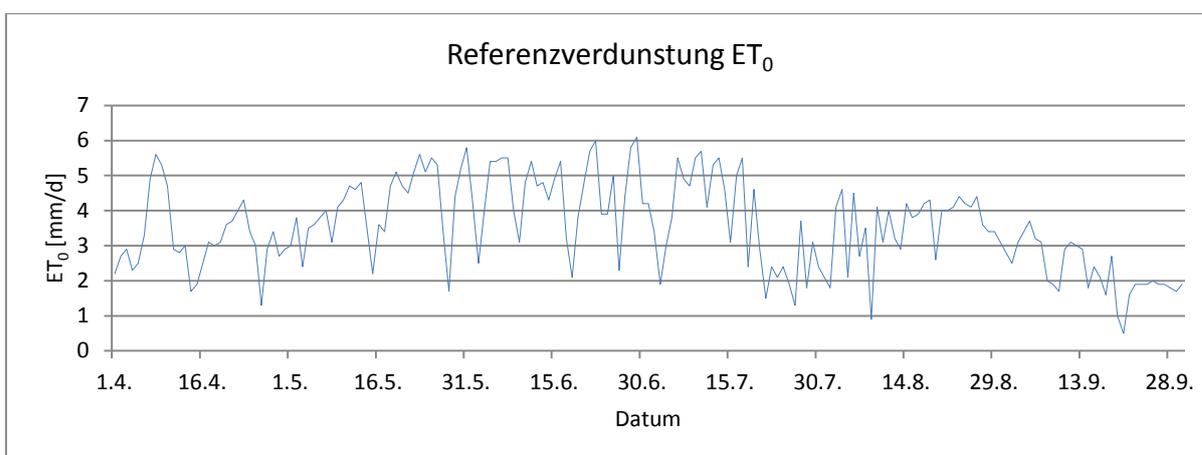


Abb. 4.40: Verlauf der Referenzverdunstung ET_0
[Deutsch-Wagram, April-September 2011; FAO, 2011]

Mit der aktuellen Evapotranspiration ET_a und der Referenzverdunstung ET_0 kann der Pflanzenkoeffizient K_c ermittelt werden:

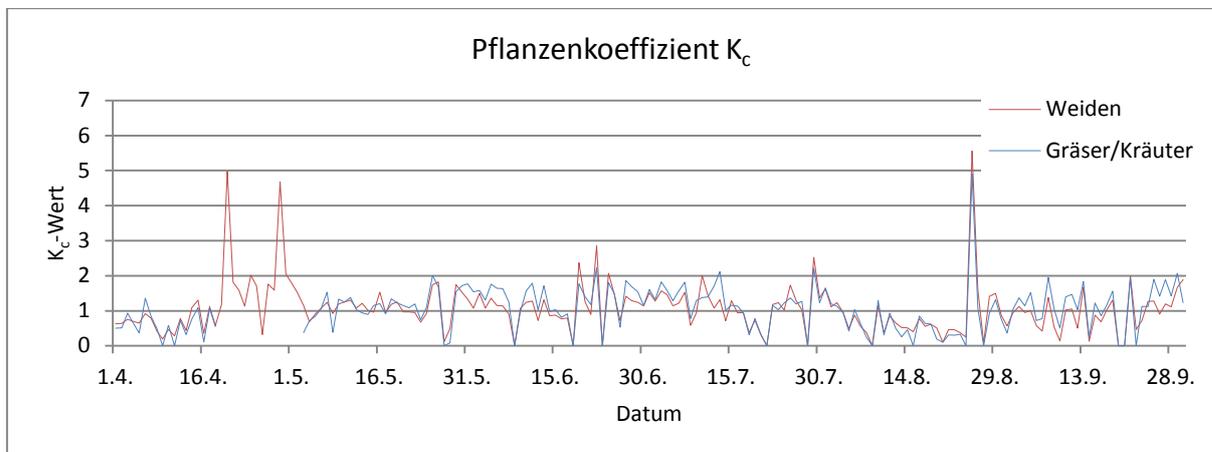


Abb. 4.41: Verlauf des Pflanzenkoeffizienten K_c
[Deutsch-Wagram, April-September 2011]

Der Verlauf der Pflanzenkoeffizienten ist dem der aktuellen Evapotranspiration sehr ähnlich. Auch hier ist die Bewässerung sowohl von Ende April mit einem sehr hohen Maximalwert der Gräser und Kräuter von 18,59 (K_c), als auch vom 25.08. mit einem Maximalwert der Weiden von 5,6 (K_c) klar zu erkennen. Die Durchschnittswerte belaufen sich auf 1,07 (K_c) bei den Weiden bzw. 1,39 (K_c) bei den Gräsern und Kräutern.

5 Diskussion

An dieser Stelle werden die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen reflektiert und ein Vergleich mit den Ergebnissen der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode hergestellt, um die langfristige Wirkung von Weiden- und Gräser/Kräuter-Bewuchs auf einen verdichteten Hochwasserschutzboden, besonders in Hinblick auf den Wasserhaushalt, einschätzen zu können.

Die Ergebnisse der Lysimeteruntersuchungen zeigen, dass der Bodenwassergehalt bei den Gräsern und Kräutern bis auf einzelne Ereignisse, bei denen beide Bewuchsarten hohe Werte aufweisen, über die gesamte Vegetationsperiode je nach Bodentiefe durchschnittlich 4,3% bzw. 2,5% unter dem der Weiden liegt. Sowohl die Weiden als auch die Gräser und Kräuter erreichen sehr hohe Saugspannungswerte um 900 hPa, wobei die Bodenwasserspannung der Weiden möglicherweise durch die Saugspannung der tiefreichenden um die Tensiometerzelle liegenden Wurzeln zusätzlich erhöht wird. So liegt die durchschnittliche Bodenwasserspannung der Weiden bei 352,1 hPa bzw. die der Gräser und Kräuter bei 211,4 hPa pro Tag und Bodenschicht. Beide Vegetationsvarianten erreichen weitaus höhere Saugspannungswerte als der Lysimeter ohne Bewuchs. Ähnlich verhält es sich bei den Mittelwerten der Sickerwassermengen, wobei hier aufgrund von Fehlmessungen bei den Gräsern und Kräutern nur auf den Vergleich zwischen den Weiden und der Variante ohne Bewuchs eingegangen wird. Beim Lysimeter ohne Bewuchs als Nullvariante beläuft sich die Durchsickerung auf 2,78 mm pro Tag, wohingegen die Weiden eine durchschnittliche Sickerwassermenge von 1,11 mm/d und somit 39,9% der Nullvariante zeigen, was auf eine intensivere Wasseraufnahme der Wurzeln schließen lässt.

Die Wurzeluntersuchungen haben ergeben, dass die oberste Bodenschicht der Gräser und Kräuter im Vergleich zu den Weiden relativ dicht bewurzelt ist. Allerdings nimmt der Wurzelanteil fast exponentiell ab, wohingegen die Weiden die unterschiedlichen Schichten gleichmäßiger durchwurzeln. Hinsichtlich des Wurzelvolumens beträgt der durchschnittliche Feinwurzelanteil (Durchmesser < 2 mm) der Weiden bei 75,7% (2009) bzw. 72,5% (2010) vom Gesamtwurzelvolumen, während der Feinwurzelanteil der Gräser und Kräuter in einem Jahr von 94,2% auf 75,1% gesunken ist, was auf ein schnelleres Dickenwachstum der Kräuter in der zweiten Vegetationsperiode zurückzuführen ist. Auch in Bezug auf die Wurzellänge pro cm^3 Boden wachsen die Weiden langsamer. So hat die Gesamtlänge nur von 4,5 cm/cm^3 auf 5,4 cm/cm^3 zugenommen, wobei sich die Wurzellänge der Gräser und Kräuter mit 4 cm/cm^3 Boden auf 7,7 cm/cm^3 fast verdoppelt hat.

Desweiteren konnte mit Hilfe der Blattscans für Lysimeter 20 ein Blattflächenindex der Weiden von 0,66 berechnet werden. Dieser betrug 2009 im Lysimeter 20 noch 2,52, im Lysime-

ter 6 ist im Jahr 2010 ein BFI von 1,6 erhoben worden. Diese Entwicklung ist auf die Abnahme der Sprossanzahl und der Größe der Weidenblätter zurückzuführen.

Über die wägbaren Lysimeter konnte außerdem die Verdunstungsleistung gemessen werden. Die durchschnittliche Evapotranspiration der Weiden beläuft sich auf 3,91 mm bzw. die der Gräser und Kräuter auf 3,93 mm pro Tag. Der Maximalwert der Gräser und Kräuter liegt bei 26,93 mm, während die höchste Verdunstung der Weiden 22,79 mm pro Tag beträgt. Somit ergab die Verdunstungsleistung der beiden Bewuchsarten über die gesamte Vegetationsperiode relativ ähnliche Ergebnisse.

In Anbetracht dessen, dass die Pflanzen in den Versuchsbehältern einer höheren Stresssituation ausgesetzt sind als auf den Versuchsdämmen, ist die Wirkung sowohl der Purpurweide, als auch der Gräser/Kräuter-Begrünung auf den Bodenwasserhaushalt des verdichteten Versuchsbodens sehr positiv, da sie besonders im Vergleich zu den Lysimetern ohne Bewuchs durch die tiefreichende Durchwurzelung und hohe Verdunstungswerte den Boden entwässern und die Bodenwasserspannung deutlich erhöhen.

Während die Weiden gegenüber den Gräsern und Kräutern im ersten Versuchsjahr hinsichtlich des Bodenwasserhaushalts, der Verdunstung und der Wuchsleistung bessere Messwerte erzielten, haben die Gräser und Kräuter in der dritten Vegetationsperiode die Weiden überholt. Zu bemerken ist allerdings dazu, dass die Purpurweide durch die blaue Bereifung (Wachsschicht) sehr sparsam mit dem verfügbaren Wasser umgeht, was sie dazu befähigt, auch trockene Böden zu besiedeln. Dies gilt auch für die Lavendelweide (*Salix eleagnos*), alle anderen Weiden sind typische Feuchtezeiger und verdunsten viel mehr Wasser.

6 Literaturverzeichnis

- ABW OIKOARTEC GMBH (2011): Regenwasserversickerung (abgerufen am 10.08.2011):
http://www.abwdat.de/abw/versickerung/pdf/Regenwasserversickerung_Planung-Dimensionierung.pdf
- BERGAUER, T. (2011): Klimadaten Deutsch-Wagram (abgerufen am 24.11.2011):
<http://www.bergauer.priv.at/toni/dwklima.htm>
- BLUM, W.E.H. (2007): Bodenkunde in Stichworten. 6. Auflage. Gebr. Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin, Stuttgart.
- BRECHTEL, H.M.; HAMMES, W. (1985): Der Einfluß der Vegetation auf den Bodenwasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung von Fragen der Bodenkonsistenz auf Böschungen und Hängen. Seite 108-131 in: Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbioogie. Sepia Verlag, Aachen.
- DACHROTH, W. (2002): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 3. Auflage. Springer, Berlin.
- DIN 18127 (1997): Baugrund - Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN 19712 (1997): Flussdeiche. Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIETRICH, J.; SCHÖNIGER, M. (2011): Hydroskript. Online-Skript zur Hydrologie (abgerufen am 28.08.2011):
<http://www.hydroskript.de>
- DVWK 226 (1993): Landschaftsökologische Gesichtspunkte bei Flußdeichen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Bonn.
- EBNER, E. (2008): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Durchsickerung. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- EHLERS, W. (1996): Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- FAO (2011): Water Development and Management Unit (abgerufen am 23.11.2011):
<http://www.fao.org/nr/water/eto.html>

- FLORINETH, F. (2004): Pflanzen statt Beton. Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- FLORINETH, F.; KLOIDT, F.; WEISSTEINER, C. (2011/2012): Studienblätter zur Vorlesung Ingenieurbiologie. Eigenverlag des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur Wien.
- HARTGE, K.H.; HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis, Messmethoden, Auswertung. 4. Auflage. Schweizerbart Verlag, Stuttgart.
- HASELSTEINER, R.; STROBL, T. (2006): Deichertüchtigung unter besonderer Berücksichtigung des Gehölzbewuchses. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität, München.
- HASELSTEINER, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Techn. Univ., Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft im Institut für Wasserwesen, München.
- HELLBERG-RODE, G. (2004): Projekt HyperSoil. Lern- und Arbeitsumgebung zum Themenfeld "Boden" im Unterricht (abgerufen am 27.06.2011):
<http://hypersoil.uni-muenster.de>
- HILLER, H. (1985): Zur Ausbildung des Wurzelwerkes von Strauchweiden und ihr Beitrag zur Böschungssicherung. Seite 93-99 in: Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen. Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie. Sepia Verlag, Aachen.
- HÖLL, K.; NIESSNER, R. (2010): Wasser. Nutzung im Kreislauf. Hygiene, Analyse und Bewertung. 9. Auflage. Walter de Gruyter & Co. KG, Berlin-New York.
- HOLZAPFEL, G. (2008): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Überströmbarkeit. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- HÖRANDL, E.; FLORINETH, F.; HADACEK, F. (2002): Weiden in Österreich und angrenzenden Gebieten. Eigenverlag des Arbeitsbereiches Ingenieurbiologie und Landschaftsbau. Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie, Universität für Bodenkultur Wien.
- ICT INTERNATIONAL (2011): Solutions for Soil, Plant and Environmental monitoring (abgerufen am 29.08.2011):
<http://www.ictinternational.com.au/soils.htm>

- KRAYCHNIKOVA, D. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Überströmungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5. Auflage. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- KUTSCHERA, L.; LICHTENEGGER, E. (2002): Wurzelatlas mitteleuropäischer Waldbäume und Sträucher. 6. Band der Wurzelatlas-Reihe. Leopold Stocker Verlag, Graz.
- LESZCZYNSKI, J. (2011): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Weidengehölzen an Hochwasserschutzdämmen. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- LOISKANDL, W.; KLIK, A.; CEPUDER, P. (2011): Landeskulturelle Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz. Studienblätter zur Vorlesung. Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien.
- LUKAS, B. (2011): Untersuchungen zum Einfluss von Weidensträuchern auf den Bodenwasserhaushalt eines Hochwasserschutzdammes anhand von Lysimeterversuchen. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- LYR, H.; FIEDLER, H.J.; TRANQUILLINI, W. (1992): Physiologie und Ökologie der Gehölze. Gustav Fischer Verlag Jena, Stuttgart.
- MARTIN, P.J.; STEPHENS, W. (2005): Willow Growth in response to nutrients and moisture on clay landfill cap soil, II Water use. Agronomy Institute, Orkney (abgerufen am 09.09.2011):
https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/870/3/Willow%20growth_II-Water_use-2005.pdf
- NACHTNEBEL, H.P. (2009): Hydrologie und Wasserwirtschaftliche Planung. Studienblätter zur Vorlesung. Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien.
- OBRIJETAN, M. (2010): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen. Einfluss von Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- ÖNORM B4412 (1974): Erd- und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Korngrößenverteilung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.

- ÖNORM B4418 (1981): Erd- und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Proctorversuch. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- RAJIC, F. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Überströmungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P.; BLUME, H.P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHLÜTER, U. (1990): Laubgehölze. Ingenieurbiologische Einsatzmöglichkeiten. Patzer Verlag, Berlin-Hannover.
- SCHOPFER, P.; BRENNICKE, A. (2010): Pflanzenphysiologie. 7. Auflage. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- SCHRÖDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten. 5. Auflage. Gebrüder Borntraeger Verlagsbuchhandlung, Berlin-Stuttgart.
- SIMMER, K. (1994): Grundbau 1. Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen. 19. Auflage. Teubner, Stuttgart
- SOOS, P. (2001): Eigenschaften von Boden und Fels - ihre Ermittlung im Labor. In: Grundbau-Taschenbuch. Teil 1: Geotechnische Grundlagen. 6. Auflage. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH, Berlin.
- STAHR, K.; KANDELER, E.; HERRMANN, L.; STRECK, T. (2008): Bodenkunde und Standortlehre. Eugen Ulmer KG, Stuttgart.
- UMS GmbH (2011a): Produktbeschreibung des T4/T4e (abgerufen am 11.09.2011): http://www.ums-muc.de/fileadmin/produkt_downloads/Tensiometer/T4_Anleitung.pdf
- UMS GmbH (2011b): UMS Katalog Version 2.2 (abgerufen am 07.06.2011): <http://www.ums-muc.de/fileadmin/files/Content/Katalog/UMS%20Katalog-DEU-HQ-V2.pdf>

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Körnungssummenkurven von Feinböden	13
Abb. 2.2: Feinböden im Dreiecksdiagramm.....	14
Abb. 2.3: Proctorkurve und Sättigungskurve	17
Abb. 2.4: Verteilung von Niederschlägen und Bodenwasser	19
Abb. 2.5: Bindungsformen des Haftwassers.....	20
Abb. 2.6: Erscheinung der Kapillarität eines Rohres im Wasserbad	20
Abb. 2.7: Potentialverteilung	23
Abb. 2.8: Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt.....	24
Abb. 2.9: k_f -Werte nach Bodenarten	26
Abb. 2.10: Wasserhaushalt von Boden, Pflanze und Atmosphäre	29
Abb. 2.11: Schnitt eines Lysimeters	31
Abb. 2.12: Durchwurzelung einer Purpurweide in St. Ruprecht bei Villach	38
Abb. 3.1: Wiegeelektronik und Kippzähler	40
Abb. 3.2: Versuchsbehälter auf Europaletten	40
Abb. 3.3: Abflussvorrichtung	40
Abb. 3.4: Sickerwasserbehälter	40
Abb. 3.5: Anordnung und Einteilung der Lysimeter im Jahr 2011	40
Abb. 3.6: Simulierte Weidenspreitlage.....	42
Abb. 3.7: Auftragen der Humusschicht durch Walter Lammeranner	42
Abb. 3.8: Auftragen der Saatgutmischung durch Walter Lammeranner	43
Abb. 3.9: Zustand nach der Ansaat	43
Abb. 3.10: Messtechnik bei Lysimeter 18-20.....	44
Abb. 3.11: Eingebaute TDR-Sonde Hydra-Probe 12	45
Abb. 3.12: Tensiometer T4	45
Abb. 3.13: Eingebautes Tensiometer T4	46
Abb. 3.14: Messgeräte der Wetterstation	47
Abb. 3.15: Datenlogger	48
Abb. 3.16: Vermessen der Weiden in Lysimeter 20.....	49
Abb. 3.17: Abgeernteter Lysimeter 14 mit Weiden-Bewuchs	49
Abb. 3.18: Abgeerntetes Lysimeter 15 mit Gräser/Kräuter-Bewuchs	49
Abb. 3.19: Abtrennen der Blätter von den Sprossen	50
Abb. 3.20: Einteilung in Durchmesserklassen	50
Abb. 3.21: Scannen der Weidenblätter	50
Abb. 3.22: Gescannte Weidenblätter	50
Abb. 3.23: Epson Perfection V700 Photscanner	51

Abb. 3.24: Wurzeln in Plexiglasbehälter.....	51
Abb. 3.25: Gescannte Wurzeln vor der Analyse.....	51
Abb. 3.26: Gescannte Wurzeln nach der Analyse.....	51
Abb. 3.27: Vorbereitung zur Trocknung.....	52
Abb. 3.28: Wurzeln im Trockenschrank.....	52
Abb. 3.29: Trocknen bei 80° C.....	52
Abb. 3.30: Wiegen der Wurzeln.....	52
Abb. 4.1: Weidenbewuchs am 20.04.2011.....	53
Abb. 4.2: Weidenbewuchs am 25.05.2011.....	53
Abb. 4.3: Weidenbewuchs am 22.06.2011.....	53
Abb. 4.4: Weidenbewuchs am 25.08.2011.....	53
Abb. 4.5: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 20.....	54
Abb. 4.6: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 20.....	54
Abb. 4.7: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 14.....	55
Abb. 4.8: Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidensprosse in Lysimeter 20.....	55
Abb. 4.9: Längenverteilung der Weidensprosse in Lysimeter 14 und 20.....	55
Abb. 4.10: Durchmesserverteilung der Weidensprosse in Lysimeter 14 und 20.....	55
Abb. 4.11: Oberirdische Biomasse der Lysimeter 14 (gemessen) und 20 (berechnet).....	56
Abb. 4.12: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 29.04.2011.....	59
Abb. 4.13: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 25.05.2011.....	59
Abb. 4.14: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 22.06.2011.....	59
Abb. 4.15: Gräser/Kräuter-Bewuchs am 25.08.2011.....	59
Abb. 4.16: Wurzellängen der Weiden pro cm ³ Boden.....	60
Abb. 4.17: Wurzellängen der Gräser und Kräuter pro cm ³ Boden.....	60
Abb. 4.18: Verteilung der Wurzellängen in den Durchmesserklassen.....	61
Abb. 4.19: Gesamtwurzellänge der einzelnen Lysimeter.....	62
Abb. 4.20: Volumen der Weidenwurzeln pro cm ³ Boden.....	62
Abb. 4.21: Volumen der Gräser- und Kräuterwurzeln pro cm ³ Boden.....	63
Abb. 4.22: Verteilung des Wurzelvolumens in den Durchmesserklassen.....	64
Abb. 4.23: Gesamtwurzelvolumen der einzelnen Lysimeter.....	65
Abb. 4.24: Trockenmasse der Weidenwurzeln in g pro cm ³	65
Abb. 4.25: Trockenmasse der Gräser/Kräuter-Wurzeln in g pro cm ³ Boden.....	66
Abb. 4.26: Temperatur-, Luftfeuchte- und Niederschlagsverteilung.....	67
Abb. 4.27: Mittlere Temperatur und Luftfeuchte bzw. Gesamtniederschlag.....	67
Abb. 4.28: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 18 (Gräser/Kräuterbewuchs) ...	68
Abb. 4.29: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 20 (Weidenbewuchs).....	69
Abb. 4.30: Verlauf der Bodenwasserspannung in Lysimeter 19 (ohne Bewuchs).....	70

Abb. 4.31: Verlauf der Bodenwasserspannung in 15 cm Bodentiefe mit Weiden- oder Gräser/Kräuterbewuchs bzw. ohne Bewuchs	70
Abb. 4.32: Verlauf der Bodenwasserspannung in 50 cm Bodentiefe mit Weiden- oder Gräser/Kräuterbewuchs bzw. ohne Bewuchs	71
Abb. 4.33: Verlauf der Bodenwasserspannung nach der Bewässerung am 25.08.2011 um 10:00	72
Abb. 4.34: Verlauf des Bodenwassergehalts in 5 cm Bodentiefe	72
Abb. 4.35: Verlauf des Bodenwassergehalts in 30cm Bodentiefe.....	73
Abb. 4.36: Verlauf des Bodenwassergehalts nach der Bewässerung am 25.08.2011 um 10:00	74
Abb. 4.37: Verlauf der Durchsickerungsleistung (Skala bis 80 mm)	74
Abb. 4.38: Verlauf der Durchsickerungsleistung (Skala bis 4 mm).....	75
Abb. 4.39: Verlauf der aktuellen Evapotranspiration ET_a	76
Abb. 4.40: Verlauf der Referenzverdunstung ET_0	76
Abb. 4.41: Verlauf des Pflanzenkoeffizienten K_c	77

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Einteilung und Bezeichnung der Kornfraktionen	11
Tab. 2.2: Beziehung zwischen Kornfraktion, Partikelzahl und spezifischer Oberfläche	12
Tab. 2.3: Schwankungsbereiche von Lagerungsdichte, Porenvolumen und Porenziffer	15
Tab. 2.4: Funktionen und Anteile in Bodenarten der Porenbereiche	16
Tab. 2.5: Umrechnungstabelle von pF-Wert, Saugspannung und Wassersäule	24
Tab. 2.6: K_c -Werte einiger landwirtschaftlicher Nutzpflanzen.....	35
Tab. 3.1: Verwendete Saatgutmischung für die Begrünung der Lysimeter-Versuchsanlage in Deutsch-Wagram	43
Tab. 4.1: Abmessungen der Weidensprosse in Lysimeter 14 und 20	56
Tab. 4.2: Oberirdische Biomasse in Lysimeter 14	57
Tab. 4.3: Blattflächenberechnungen von Lysimeter 14.....	58

9 Anhang

9.1 Zeittabelle der durchgeführten Untersuchungen

Datum	Durchgeführte Untersuchung
20.04.2011	Einbau der Lysimeter nach der Winterpause, Sickerwassermessungen, Bewässerung
24.04.2011	Sickerwassermessungen, Bewässerung
29.04.2011	Sickerwassermessungen, Bewässerung
25.05.2011	Sickerwassermessungen, Bewässerung
22.06.2011	Messen des Durchmesser/Längen-Verhältnisses der Sprosse in Lysimeter 20, Sickerwassermessungen, Bewässerung
10.07.2011	Bewässerung
18.07.2011- 25.07.2011	Scannen, Analysieren und Wiegen (Trockenmasse) der 2009 entnommenen Weiden-Wurzeln
22.07.2011- 29.07.2011	Scannen, Analysieren und Wiegen (Trockenmasse) der 2009 entnommenen Gräser/Kräuter-Wurzeln
02.08.2011- 10.08.2011	Scannen, Analysieren und Wiegen (Trockenmasse) der 2010 entnommenen Weiden-Wurzeln
08.08.2011- 09.08.2011	Messen der Durchmesser/Längen-Verhältnisse der Sprosse bei den Versuchsdamm-Sektoren 3, 9 und 11
10.08.2011- 22.08.2011	Scannen, Analysieren und Wiegen (Trockenmasse) der 2010 entnommenen Gräser/Kräuter-Wurzeln
25.08.2011	Sickerwassermessungen, Bewässerung
30.09.2011	Messen des Durchmesser/Längen-Verhältnisses der Sprosse in Lysimeter 14 und 20, Ernten der Lysimeter 14 (Weiden) und 15 (Gräser/Kräuter), Nachschneiden der restlichen Gräser/Kräuter-Lysimeter, Scannen der Blätter von Lysimeter 14
11.10.2011	Wiegen (Trockenmasse) der Sprosse und Blätter von Lysimeter 14
08.11.2011	Wiegen (Trockenmasse) der Gräser/Kräuter von Lysimeter 15

9.2 Bewässerungsdaten

Datum	Uhrzeit	Menge [l]
20.04.2011	13:40	36
24.04.2011	12:20	22
29.04.2011	15:30	20
25.05.2011	11:40	20
22.06.2011	13:25	20
10.07.2011	18:10	10
25.08.2011	10:00	30

9.3 Sickerwassermengen der Lysimeter ohne Messgeräte

Datum	Uhrzeit	Lys. 2 [ml] o. Bew.	Lys. 3 [ml] o. Bew.	Lys. 4 [ml] Salix	Lys. 5 [ml] Salix	Lys. 7 [ml] Gräser-Kr.
20.04.2011	11:50	5100	5800	1500	2900	250
24.04.2011	11:55	5000	6000	5240	5340	5600
29.04.2011	15:00	5200	5600	5320	5600	5620
25.05.2011	11:15	4850	5820	5350	4800	5400
22.06.2011	13:00	4800	5400	160	420	5100
25.08.2011	09:30	4240	5320	5240	2960	2040

Datum	Uhrzeit	Lys. 8 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 9 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 10 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 11 [ml] Salix	Lys. 12 [ml] Salix
20.04.2011	11:50	300	0	0	300	600
24.04.2011	11:55	4660	6000	5060	4900	4660
29.04.2011	15:00	4600	4700	4880	4900	5740
25.05.2011	11:15	4600	4900	5540	4320	4950
22.06.2011	13:00	4240	3700	3650	3700	1360
25.08.2011	09:30	2120	1980	720	4540	3900

Datum	Uhrzeit	Lys. 13 [ml] Salix	Lys. 14 [ml] Salix	Lys. 15 [ml] Gräser-Kr.
20.04.2011	11:50	1000	250	0
24.04.2011	11:55	6000	4760	4300
29.04.2011	15:00	5700	4260	3940
25.05.2011	11:15	5500	4150	3900
22.06.2011	13:00	680	1240	4200
25.08.2011	09:30	5240	4420	4100

9.4 Durchmesser/Längen-Verhältnisse der Sprosse

Nr.	Lysimeter 20 (22.06.2011)		Lysimeter 14 (30.09.2011)		Lysimeter 20 (30.09.2011)	
	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm
1	0,89	2	0,86	5	1,09	4
2	1,13	4	1,04	4	1,74	24
3	1,24	4	1,41	10	1,95	33
4	1,46	14	1,64	10	2,07	20
5	1,54	10	1,72	16	2,07	15
6	1,71	13	1,73	17	2,08	17
7	1,71	12	1,86	18	2,11	11
8	1,72	11	1,9	12	2,14	25
9	1,83	15	1,92	16	2,19	25
10	1,85	3	2,01	14	2,26	23
11	1,86	14	2,06	23	2,3	10
12	1,86	18	2,06	18	2,3	21
13	1,89	8	2,09	23	2,32	24
14	2,01	8	2,14	24	2,35	31
15	2,03	11	2,16	12	2,36	36
16	2,07	12	2,18	22	2,38	22
17	2,07	23	2,21	27	2,39	21
18	2,08	15	2,3	25	2,45	36
19	2,18	3	2,31	35	2,48	32
20	2,19	17	2,42	28	2,48	27
21	2,2	24	2,55	26	2,52	32
22	2,26	22	2,56	41	2,68	37
23	2,29	12	2,57	29	2,69	24
24	2,31	16	2,58	31	2,69	33
25	2,31	24	2,59	24	2,7	25
26	2,37	19	2,61	36	2,77	20
27	2,42	38	2,61	27	2,77	22
28	2,49	34	2,62	30	2,81	46
29	2,53	24	2,64	19	2,89	27
30	2,53	12	2,76	48	2,91	55
31	2,58	22	2,77	30	2,92	41
32	2,61	24	2,81	47	2,93	39
33	2,63	22	2,82	25	2,94	36
34	2,63	28	2,83	37	2,96	32
35	2,68	36	2,85	32	2,97	29
36	2,72	34	2,86	21	3,04	23
37	2,79	35	2,88	30	3,04	36
38	2,81	23	2,91	50	3,04	50

Nr.	Lysimeter 20 (22.06.2011)		Lysimeter 14 (30.09.2011)		Lysimeter 20 (30.09.2011)	
	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm
39	2,83	32	2,91	43	3,05	46
40	2,84	31	2,93	18	3,22	34
41	2,84	28	2,93	42	3,23	55
42	2,86	33	2,95	50	3,23	56
43	2,87	31	2,97	32	3,29	47
44	2,89	21	3,04	24	3,3	44
45	2,91	38	3,05	43	3,33	22
46	2,94	23	3,11	42	3,34	54
47	2,94	36	3,12	44	3,36	51
48	3,01	25	3,13	38	3,42	41
49	3,04	31	3,13	40	3,43	38
50	3,05	30	3,13	47	3,47	63
51	3,05	41	3,19	34	3,49	48
52	3,09	45	3,2	37	3,5	43
53	3,12	45	3,23	62	3,51	58
54	3,14	42	3,24	51	3,52	58
55	3,16	43	3,26	31	3,53	57
56	3,24	54	3,32	52	3,55	47
57	3,24	51	3,38	41	3,56	26
58	3,25	24	3,38	52	3,6	41
59	3,25	47	3,4	64	3,63	41
60	3,27	34	3,45	58	3,78	53
61	3,28	37	3,48	54	3,78	56
62	3,29	37	3,48	75	3,78	61
63	3,32	43	3,49	41	3,86	58
64	3,35	46	3,49	31	3,87	49
65	3,36	53	3,49	58	3,88	55
66	3,37	47	3,52	47	3,92	42
67	3,4	30	3,57	49	3,92	56
68	3,45	46	3,57	72	3,95	17
69	3,47	56	3,57	54	3,96	59
70	3,53	46	3,6	52	3,99	48
71	3,54	42	3,66	42	4,02	45
72	3,54	26	3,71	62	4,04	56
73	3,62	53	3,76	68	4,06	53
74	3,63	53	3,8	42	4,14	69
75	3,63	44	3,89	58	4,15	65
76	3,65	53	3,9	55	4,16	61
77	3,65	57	3,9	69	4,19	74
78	3,66	42	3,91	62	4,3	54
79	3,71	40	3,93	58	4,33	73

Nr.	Lysimeter 20 (22.06.2011)		Lysimeter 14 (30.09.2011)		Lysimeter 20 (30.09.2011)	
	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm
80	3,72	2	3,94	75	4,35	59
81	3,73	52	3,95	51	4,37	70
82	3,78	41	4,04	67	4,38	76
83	3,82	62	4,07	71	4,41	51
84	3,83	56	4,15	66	4,44	38
85	3,86	54	4,18	59	4,47	78
86	3,92	69	4,25	95	4,49	55
87	3,94	55	4,37	55	4,56	72
88	3,95	49	4,42	82	4,64	56
89	4,03	55	4,44	75	4,65	67
90	4,08	65	4,44	80	4,67	40
91	4,11	59	4,55	68	4,71	82
92	4,13	46	4,61	63	4,75	96
93	4,15	76	4,63	71	4,76	67
94	4,16	63	4,73	75	4,85	59
95	4,23	53	4,73	94	4,89	65
96	4,26	51	4,74	83	4,92	74
97	4,28	54	4,8	69	4,93	57
98	4,29	58	4,82	81	4,97	92
99	4,34	73	4,86	76	4,98	86
100	4,35	58	5,05	88	5,05	82
101	4,4	60	5,17	121	5,06	79
102	4,44	17	5,23	105	5,1	85
103	4,44	59	5,24	84	5,12	58
104	4,45	51	5,41	106	5,13	80
105	4,52	77	5,43	91	5,17	94
106	4,53	58	5,55	83	5,28	101
107	4,56	15	5,85	87	5,31	89
108	4,56	61	6,14	96	5,73	101
109	4,58	59			6,13	109
110	4,61	67			6,48	124
111	4,62	95			6,94	107
112	4,72	98				
113	4,74	93				
114	4,76	72				
115	4,85	93				
116	4,85	78				
117	5,03	80				
118	5,04	89				
119	5,06	72				
120	5,14	61				

Nr.	Lysimeter 20 (22.06.2011)		Lysimeter 14 (30.09.2011)		Lysimeter 20 (30.09.2011)	
	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm	Durchmesser in mm	Sprosslänge in cm
121	5,33	82				
122	5,34	53				
123	5,46	69				
124	5,46	97				
125	5,49	95				
126	5,59	108				
127	5,81	80				
128	5,88	81				
129	5,94	117				
130	6,92	106				
Max	6,92	117,00	6,14	121,00	6,94	124,00
3rd Quartile	4,29	58,00	3,97	67,25	4,43	62,00
Median	3,37	42,50	3,25	47,00	3,55	49,00
Middle	3,46	43,82	3,37	48,64	3,66	50,33
1st Quartile	2,63	23,25	2,62	28,75	2,85	32,00
Min	0,89	2,00	0,86	4,00	1,09	4,00

9.5 Ergebnisse der Wurzelscans

Schicht		Masse in g	Masse in %	Länge in cm	Surface Area in cm ²	Projected Area in cm ²	Volumen in cm ³	Wurzel- spitzen
Weiden 2009	1	13,34	25,28	54521,95	4920,59	1566,27	114,72	449966
	2	11,03	20,91	48453,05	4274,52	1360,62	78,58	243700
	3	7,66	14,52	35830,59	3298,49	1049,94	57,11	176345
	4	4,51	8,55	17029,27	1815,66	577,94	35,06	80387
	5	3,45	6,54	12088,80	1394,76	443,96	29,22	61124
	6	3,07	5,82	11254,51	1271,83	404,83	25,91	61330
	7	2,06	3,90	6356,38	851,52	271,05	19,72	30382
	8	1,94	3,68	5954,13	795,13	253,10	18,62	28441
	9	1,66	3,15	5291,06	710,76	226,24	16,76	25757
	10	1,21	2,29	4100,73	556,67	177,19	13,47	18249
	11	0,96	1,82	3562,72	458,18	145,84	10,47	19828
	12	0,72	1,36	2425,18	338,08	107,61	8,43	10168
	13	0,69	1,31	2669,94	349,56	111,27	9,03	14664
	14	0,28	0,53	1557,89	168,26	53,56	3,10	7169
	15	0,18	0,34	1053,25	112,68	35,87	1,96	4865
Summe		52,76	100,00	212149,46	21316,70	6785,32	442,15	1232375
Weiden 2010	1	25,88	16,96	64961,02	5189,78	1651,96	112,56	451681
	2	23,86	15,64	92688,69	6656,83	2118,93	107,89	494430
	3	19,13	12,54	78400,60	5805,87	1848,07	83,23	440832
	4	13,1	8,59	38862,19	3235,58	1029,92	58,57	64464
	5	10,28	6,74	35281,72	2886,69	918,86	46,27	203700
	6	7,31	4,79	23835,10	2049,81	652,48	33,19	105536
	7	6,69	4,39	26477,09	2122,98	675,77	32,57	142863
	8	6,7	4,39	26113,37	2134,50	679,43	33,68	155092
	9	4,75	3,11	19107,81	1575,83	501,60	25,11	93582
	10	7,17	4,70	33900,52	2527,81	804,63	38,15	200005
	11	5,39	3,53	18581,55	1613,07	513,46	29,12	102995
	12	7,18	4,71	37780,15	2887,41	919,09	42,60	238732
	13	3,6	2,36	17779,80	1504,77	478,98	23,17	97003
	14	3,24	2,12	16707,51	1334,58	424,81	21,32	99944
	15	2,28	1,49	8752,03	808,63	257,40	14,91	56913
	16	2,18	1,43	6536,07	733,74	233,56	14,59	31552
	Steine	3,81	2,50	41114,03	2941,41	936,28	33,04	113081
Summe		152,55	100,00	586879,26	46009,30	14645,21	749,96	3092405

Schicht		Masse in g	Masse in %	Länge in cm	Surface Area in cm ²	Projected Area in cm ²	Volumen in cm ³	Wurzel- spitzen
Gräser/Kräuter 2009	1	27,83	74,51	261639,04	19204,33	6112,93	320,62	2167310
	2	4,7	12,58	58375,67	4152,17	1321,67	55,06	343794
	3	2,02	5,41	21490,70	1594,13	507,43	18,91	97240
	4	0,99	2,65	12457,89	885,09	281,73	9,52	74342
	5	0,72	1,93	7138,28	568,16	180,85	7,31	37301
	6	0,34	0,91	3510,83	275,59	87,72	3,40	17896
	7	0,27	0,72	2837,93	226,36	72,05	2,93	15190
	8	0,18	0,48	2172,74	163,73	52,12	1,87	13253
	9	0,09	0,24	1022,76	73,62	23,43	0,74	6787
	10	0,05	0,13	417,44	32,53	10,35	0,39	3663
	11	0,04	0,11	343,43	24,82	7,90	0,28	3328
	12	0,04	0,11	395,22	27,64	8,80	0,33	4422
	13	0,04	0,11	606,51	42,39	13,49	0,51	6997
	14	0,04	0,11	464,12	31,61	10,06	0,36	5238
Summe		37,35	100,00	372872,57	27302,16	8690,55	422,21	2796761
Gräser/Kräuter 2010	1	69,57	56,68	493078,68	37732,42	12010,60	657,56	3509521
	2	15,93	12,98	138690,46	10232,43	3257,09	129,12	725787
	3	7,38	6,01	50705,91	4266,86	1358,18	53,25	199639
	4	5,91	4,81	37246,46	3431,67	1092,33	44,74	197132
	5	4,46	3,63	24762,21	2407,75	766,41	32,62	118062
	6	3,69	3,01	20191,35	2067,09	657,98	28,88	88808
	7	4,28	3,49	31419,76	2791,15	888,45	34,41	165040
	8	2,67	2,18	17962,61	1757,97	559,58	22,36	89804
	9	1,83	1,49	13632,12	1326,55	422,25	17,43	75430
	10	1,55	1,26	14742,71	1216,60	387,25	14,53	124088
	11	1,48	1,21	13117,64	1130,61	359,88	15,42	122813
	12	1,36	1,11	10806,91	931,96	296,65	11,96	96811
	13	0,73	0,59	4134,69	350,90	111,70	4,63	32001
	14	0,7	0,57	3820,60	342,08	108,89	4,83	27212
	15	0,61	0,50	3587,22	282,08	89,79	3,69	30001
	16	0,39	0,32	2220,09	195,20	62,14	3,32	17771
	Steine	0,21	0,17	1963,64	126,32	40,21	1,07	4516
Summe		122,75	100,00	882083,07	70589,64	22469,37	1079,81	5624435