Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen

Einfluss von Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen

Diplomarbeit

Eingereicht von:
Michael Obriejetan

Betreuung:
O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth
DI Walter Lammeranner

Diplomstudium für Landschaftsplanung und Landschaftspflege

Universität für Bodenkultur, Wien

Wien, April 2010

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei allen bedanken, die mich während des Studiums und bei der Erarbeitung dieser Diplomarbeit unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei DI Walter Lammeranner für die hervorragende fachliche und freundschaftliche Betreuung, die maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat. Vielen Dank auch an Prof. Dr. Florin Florineth für seine motivierende und anregende Vermittlung der Ingenieurbiologie und die Betreuung der Diplomarbeit.

Auch danke ich meinen StudienkollegInnen, besonders David Lorenz für die hilfreichen Gespräche und so manche unvergessliche Exkursion.

Herzlichen Dank auch meiner Freundin Klaudia für ihre Geduld, die aufbauenden Worte und fürs Korrekturlesen. Weiter schätze ich die Motivation und die aufbauenden Momente meines Bruders Manuel und meiner Freunde Simon und Michael.

Nicht zuletzt möchte ich mich herzlich bei meinen Eltern für die großzügige und liebevolle Unterstützung während meiner Studienzeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **4**

Abstract **5**

1. Einleitung **6**

1.1 Einführung in das Thema 6

1.2 Aufbau der Diplomarbeit 7

2. Ziele **8**

3. Grundlagen **9**

3.1 Physikalische Bodeneigenschaften 9

3.1.1 Körnung 9

3.1.2 Korngrößenverteilung 10

3.1.3 Bodenporen 12

3.1.4 Bodendichte 14

3.2 Bodenwasser 16

3.2.1 Formen von Bodenwasser 17

3.2.2 Bodenwassergehalt 18

3.2.3 Potentialkonzept 19

3.2.4 Matrixpotential 20

3.2.5 Wasserbewegung im Boden 22

3.3 Wasserhaushalt der Pflanzen 24

3.3.1 Evapotranspiration 25

3.3.2 Verfahren zur Bestimmung der Evapotranspiration 26

3.3.2.1 Lysimeter 26

3.3.2.2 Berechnung der Verdunstung 27

3.3.2.3 Berechnung des Pflanzenwasserverbrauchs 29

3.4 Vegetation und Standsicherheit 30

3.4.1 Überblick 30

3.4.2 Bodenentwässerung und Standsicherheit 31

4. Methodik ... 33
4.1 Überblick ... 33
4.2 Versuchsanordnung ... 33
4.3 Grundkonstruktion der Lysimeter ... 34
4.3.1 Bodenaufbau ... 34
4.3.2 Bodenmaterial ... 35
4.3.3 Verdichtung ... 36
4.4 Messtechnik ... 39
4.4.1 Wassergehaltssensoren ... 39
4.4.2 Tensiometer ... 40
4.4.3 Sickerwassermessung ... 41
4.4.4 Wiegeelektronik ... 42
4.5 Wetterstation ... 43
4.5.1 Niederschlag ... 43
4.5.2 Temperatur und Luftfeuchte ... 44
4.5.3 Windgeschwindigkeit ... 44
4.5.4 Strahlung ... 45
4.6 Bepflanzung und Begrünung der Lysimeter ... 45
4.6.1 Weidenspreitlage ... 45
4.6.2 Gräser-Kräuter-Ansaat ... 47
4.7 Vegetationsaufnahmen ... 48
4.7.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis ... 48
4.7.2 Biomasse ... 49
4.7.3 Blattflächenindex ... 50
4.8 Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen ... 50

5. Ergebnisse ... 53
5.1 Vegetationsentwicklung ... 53
5.1.1 Weidenspreitlage ... 53
5.1.1.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis ... 54
5.1.1.2 Biomasse ... 56
5.1.1.3 Blattflächenindex ... 57
5.1.2 Gräser-Kräuter Ansaat ... 58

5.2 Meteorologische Daten 59
5.3 Bodenphysikalische Messergebnisse 60
5.3.1 Bodenwasserspannung 60
5.3.2 Bodenwassergehalt 63
5.3.3 Bodenwasserspannung und Bodenwassergehalt bei Aufsättigung 64
5.3.4 Durchsickerung 65
5.3.5 Evapotranspiration und K_c-Werte 66

6. Diskussion und Ausblick 69

7. Literatur 70

8. Abbildungsverzeichnis 74

9. Tabellenverzeichnis 78

10. Anhang 79

Zusammenfassung

Im Rahmen eines Forschungsprojekts zu den Wirkungen von Gehölzen auf die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen wurde der Einfluss von Weiden- und Gräser-Kräuterbewuchs auf den Bodenwasserhaushalt untersucht. Hierfür wurde in Deutsch-Wagram (NÖ) eine Lysimeteranlage bestehend aus 20 Versuchsbehältern mit stark verdichteten Versuchsböden errichtet, wobei jeweils mehrere Lysimeter mit einer Weidenspreitlage (*Salix purpurea*) bepflanzt bzw. mit Gräsern und Kräutern begrünt worden sind. Einige der Versuchsbehälter wurden mit spezieller Messtechnik ausgestattet, um Veränderungen des Bodenwassergehalts und der Bodenwasserspannung in unterschiedlichen Bodentiefen fortlaufend registrieren zu können. Dies geschah zum einen mit Tensiometern zur Erfassung der Bodenwasserspannung und zum anderen über TDR-Sonden zur Ermittlung des Bodenwassergehalts. Weitere Aspekte der vorliegenden Arbeit sind neben der Bestimmung der Evapotranspiration ET_a bzw. des Pflanzenkoeffizienten K_c auch die Durchsickerung der Versuchsböden und mehrere Vegetationsuntersuchungen (Biomasse, Blattflächenindex, Wuchsleistung).

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit resultieren aus einem knapp dreimonatigen Beobachtungszeitraum von Juli bis September 2009. Die Messergebnisse zeigen, dass die Weiden bereits nach wenigen Wochen einen deutlich reduzierten Bodenwassergehalt und erhöhte Bodenwasserspannungen in der oberen Bodenschicht bewirken. Im Vergleich zu den Gräsern und Kräutern wurde bei den Weiden die bodenentwässernde Wirkung schneller und tiefreichender nachgewiesen. Bei den Erhebungen zur Verdunstungsleistung wurden bei den Weiden ET_a-Werte bis zu 10,8 mm/Tag verzeichnet. Der maximale K_c-Wert belief sich auf 1,6. Bei den Gräsern und Kräutern lag die Evapotranspirationsrate deutlich unter den Werten der Weiden. Weiter zeigt die Auswertung der Sickerwasserdaten eine signifikant geringere Durchsickerung der mit Weiden bepflanzten Lysimeter.

Abstract

In this thesis the impacts of willow stands respectively grasses and herbs on soil water dynamics and components of the water balance were determined within the scope of a research project on the subject of woody structures on levees. The studies are based on a lysimeter station set up in Deutsch-Wagram (Lower Austria) comprising 20 lysimeters cropped with willow stands (*Salix purpurea*) from brush mattresses and grass-herb vegetation. Some of the lysimeters were fitted with particular measurement technique such as soil moisture sensors and tensiometers to determine soil moisture tension. Further research aspects deal with the determination of the actual crop evapotranspiration ET_c, the crop coefficient K_c, soil seepage and plant parameters such as biomass, leaf area index and root growth.

The result evaluation over the first growing season (July-Sept. 2009) shows distinct effects of the willow stands on soil moisture and soil moisture tension in the upper soil layer within a few weeks. In comparison to grass-herb vegetation the dehydration could be detected earlier and in greater depth. The evapotranspiration rates of the willow coppice were significantly higher than those measured at the lysimeter with grass-herb vegetation. ET_c values up to 10,8 mm/day were determined whereas the maximum crop coefficient K_c was 1,6. The analysis of the percolation data showed way lower seepage at the willow stands.

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Die Hochwässer der letzten Jahre in großen Teilen Österreichs und die dadurch verzeichneten schweren Schäden führten zu einer gesteigerten Aufmerksamkeit gegenüber Hochwasserschutz und Hochwasservorsorge. Neben der Untersuchung und Bewertung der sozioökonomischen Auswirkungen von Hochwässern stellt die ingenieurbauliche Betrachtung von Hochwasserschutz aus wissenschaftlicher Sicht eine aktuelle und interdisziplinäre Herausforderung dar.

Diesbezüglich wurde auch die Frage nach dem Einfluss von Gehölzen auf die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen oft diskutiert. In diesem Zusammenhang schildert PFLUG (1999) eine Neuorientierung bei der Betrachtung von Pflanzen an Hochwasserdämmen. Demnach wurde der bis dahin geltende rein biologische Ansatz um die Erkenntnis erweitert, dass Pflanzen als lebende Baustoffe einen wesentlichen Beitrag zur dauerhaften Sicherung und Erhaltung der Dämme leisten. Durch diese Feststellung wird insbesondere das Fachgebiet der Ingenieurbiologie angesprochen, die sich mit der baulichen Verwendung von Pflanzen zu Sicherungszwecken beschäftigt. Den nachweislich positiven Wirkungen einer dauerhaften Grasnarbe (SCHIECHTL, 1985; SEETHALER, 1999) stehen jedoch sicherheitstechnische Bedenken gegenüber, die große, starre Bäume bzw. sehr dichte Vegetation auf Dämmen betreffen (HASELSTEINER, 2007; KRÖMER und HACKER, 1999).

Auf Grund dieser Unsicherheiten werden im Rahmen eines Forschungsprojektes des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur die Auswirkungen von Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen untersucht. Dies geschieht im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), des Lebensministeriums und des Landes Niederösterreich. Für die Untersuchungen wurden 2007 im niederösterreichischen Deutsch-Wagram zwei Hochwasser-Versuchsdämme errichtet und mithilfe von verschiedenen ingenieurbiologischen Bauweisen bepflanzt. Die Errichtung der Versuchsanlage und erste Vegetationsuntersuchungen sind in EBNER (2008) und HOLZAPFEL (2008) beschrieben. Die weitere Vegetationsentwicklung wurde von KRAYCHNIKOVA (2009) und RAJIC (2009) dokumentiert und ausgewertet.

2009 wurde die Versuchsanlage um eine Lysimeteranlage erweitert, deren Aufbau und Ergebnisse Gegenstand dieser Diplomarbeit sind. Der Forschungsschwerpunkt liegt hierbei auf der Untersuchung des Einflusses von Gehölzen auf den Bodenwasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung der Verdunstung und der Durchlässigkeit des stark verdichteten Versuchsbodens. Ferner sollen die gewonnenen Ergebnisse Rückschlüsse auf Auswirkungen hinsichtlich der Bodenstabilität zulassen.

1.2 Aufbau der Diplomarbeit

Die Arbeit beginnt nach der Einführung in das Themengebiet mit der Beschreibung der Untersuchungsziele (Kapitel 2), die nach eingehender Auseinandersetzung mit dem Thema Bewuchs auf Hochwasserschutzdämmen dargestellt werden.

Anschließend folgt ein Grundlagenkapitel (Kapitel 3), das dazu dient, wesentliche Bodenkennwerte und deren Erhebungsmethodik zu erläutern. Zudem wird im Speziellen auf hydrogeologische Zusammenhänge zwischen Boden und Wasser eingegangen. Dieses System wird anschließend um den Faktor Pflanze ergänzt, der sich sowohl aktiv als auch passiv auf zahlreiche Bodeneigenschaften auswirkt.

Kapitel 4 hat die Methodik der Untersuchungen zum Inhalt. Neben der technischen Konstruktion der Lysimeter und deren Anordnung auf dem Versuchsgelände werden die verwendeten Materialien und Messgeräte genauer beschrieben. Weitere Unterkapitel widmen sich u.a. den Bepflanzungsmaßnahmen, den Vegetationsaufnahmen sowie der Chronologie der durchgeführten Arbeiten.

Die bei den Untersuchungen gewonnenen Messergebnisse und deren Analyse ist Gegenstand von Kapitel 5. Hierbei werden die Messdaten des lysimetrischen Versuchs und die erhobenen Vegetationsdaten dargestellt und interpretiert.

In Kapitel 6 werden die wichtigsten Erkenntnisse aus der Datenauswertung zusammengefasst und interpretiert. Weiter wird die Lysimetertechnologie zur Beantwortung der oben formulierten Fragestellung kritisch beleuchtet. Die Arbeit endet mit Empfehlungen in Hinblick auf weiterführende Untersuchungen in diesem Forschungsbereich.

2 Ziele

Im Bereich der Ingenieurbiologie kommt den Weiden (*Salix* spec.) eine besondere Bedeutung zu. Wissenschaftliche Forschungen in diesem Arbeitsbereich sind weitgehend auf die Ergründung der stabilisierenden Wirkung von lebendem Pflanzenmaterial an Hängen und Böschungen bzw. an Fließgewässern ausgelegt. Ein vergleichsweise junger Forschungsbereich innerhalb der Ingenieurbiologie befasst sich darauf aufbauend mit der Frage nach der Möglichkeit, Weidengehölze auch zur Sicherung von Hochwasserschutzdämmen einzusetzen.

Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, mit Hilfe von Lysimeterversuchen zu klären, inwiefern sich Weidenbewuchs in Form einer Spreitlage im Vergleich zu einer Gräser-Kräuter-Begrünung auf den Bodenwasserhaushalt und in weiterer Folge auf die Standsicherheit eines Dammes auswirkt.

Zu diesem Zweck wird die Verdunstungsleistung von Weiden gegenüber Gräsern und Kräutern mittels Lysimetern erhoben. Ein Vergleich der Ergebnisse soll Rückschlüsse auf den Grad der entwässernden Wirkung ermöglichen. Weiter sollen Durchlässigkeitsuntersuchungen zeigen, inwiefern sich die verschiedenen Vegetationsstrukturen auf die Durchsickerung des Versuchsbodens auswirken.

3 Grundlagen

3.1 Physikalische Bodeneigenschaften

Böden bestehen bei wechselnder Zusammensetzung und Durchmischung aus mineralischen und organischen Bestandteilen sowie Bodenluft und Bodenwasser. Dieses Gemisch aus Festmasse (Körner, Primärteilchen) und Hohlräumen (Poren), die teilweise oder gänzlich mit Luft oder Wasser gefüllt sind, wird auch als 3-Phasensystem „fest – flüssig – gasförmig“ bezeichnet (SCHRÖDER, 1992).

Um diesen Systemkomplex besser verstehen zu können ist es notwendig, die jeweiligen spezifischen Eigenschaften und die Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Bestandteilen zu betrachten. Bei der Beurteilung eines Bodens gelten physikalischen Eigenschaften wie Körnung, Bodendichte, Wassergehalt und das Vermögen, Wasser zu binden als zunächst wichtigste Parameter (HARTGE und HORN, 2009).

3.1.1 Körnung

Abhängig vom geologischen Ausgangsmaterial und dem Verlauf der physikalischen Verwitterung werden größere Gesteinsbruchstücke zerkleinert, transportiert und mehr oder weniger sortiert abgelagert.

Die Vielfalt an Korngrößen ist sehr breit und reicht vom Meterbereich bis unter das Auflösungsvermögen eines Lichtmikroskops. Eine Einteilung der Zusammensetzung des Mineralkörpers erscheint daher zweckmäßig und erfolgt anhand der Größe und Form der Körner gemäß sogenannter Korn-Fraktionen. Die Abstufung der Fraktionen verläuft anhand eines logarithmischen Maßstabs, welcher die Möglichkeit der äquidistanten (einheitlich skalierten) Darstellung, von beliebig vielen Größenfraktionen zulässt. Da die Bodenteilchen meist nicht kugelförmig sind, wird die Korngröße über den Äquivalentdurchmesser von Kugeln angegeben.

Tabelle 3.1 zeigt die im deutschen Sprachraum am häufigsten verwendete Einteilung in Feinboden (Körner < 2 mm) und Grobboden (Körner > 2 mm), der auch als Bodenskelett bezeichnet wird. Der Feinboden wird darüber hinaus in die Fraktionen Sand (S), Schluff (U) und Ton (T) untergliedert.

Äquivalent-Ø (Ersatzwert)		Bezeichnung der Korn-Fraktionen		Symbol	
mm	µm	gerundet	eckig-kantig		
>200		Blöcke, Geschiebe			
200-63		Gerölle	Grobsteine	Kiese: G	Grobboden (Boden-skelett)
62-20		Grobkies	Mittelsteine		
20-6,3		Mittelkies	Feinsteine	Steine: X	
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. 3.1 Einteilung und Bezeichnung der Kornfraktionen (nach SCHRÖDER, 1992)

Zwischen der Korngröße und der spezifischen Oberfläche (Oberfläche je Gewichtseinheit) bzw. der Partikelzahl je Gewichtseinheit besteht ein direkter Zusammenhang. Diese Beziehung wird durch die Tabelle 3.2 verdeutlicht:

Kornfraktion µm	Partikelzahl je g	spezifische Oberfläche cm^2 je g
2 000 – 200	$5 \cdot 10^2$	20
200 – 20	$5 \cdot 10^5$	200
20 – 2	$5 \cdot 10^8$	2 000
2 – 0,2	$5 \cdot 10^{11}$	20 000 $= 2m^2$

Tab. 3.2 Beziehung zwischen Kornfraktion, Partikelzahl und spezif. Oberfläche (SCHRÖDER, 1992)

Feinkörnige Fraktionen wie z.B. Tonminerale sind auf Grund ihrer hohen spezifischen Oberfläche neben chemischen Austauschprozessen vor allem für die Bindung von Wasser von Bedeutung. Dieser Zusammenhang ist in Abschnitt 3.2.4 näher erläutert.

3.1.2 Korngrößenverteilung

Die Korngrößenverteilung gibt die Massenanteile der in einem Boden vorhandenen Kornfraktionen bzw. Körnungsgruppen an und gilt als wichtige Information in der Bodenmechanik. Zudem wird die Korngrößenzusammensetzung eines Bodens als Grundlage für die Bodenart-Klassifizierung herangezogen.

Bei der Bestimmung der Korngrößenverteilung werden, je nach vorliegender Bodenart, verschiedene Verfahren angewendet oder miteinander kombiniert. Die genauen Verfahrensabläufe sind in der ÖNORM B4412 festgesetzt und richten sich nach den vorhandenen Korngrößen: so werden Korngrößen > 0,063 mm Durchmesser durch Siebung (Siebanalyse), Korngrößen < 0,125 mm über Sedimentationsverfahren (Schlämmanalyse) getrennt. Anhand von Tabellen kann die hierfür benötigte Mindestprobenmenge abgelesen werden, die sich bei der Siebanalyse nach dem geschätzten Größtkorn richtet und zwischen 150 g und 18 kg liegt. Beim Sedimentationsverfahren sind in der Regel Probenmengen zwischen 30 und 50 g ausreichend.

Die Ergebnisse werden meistens anhand von Körnungssummenkurven grafisch dargestellt und zeigen, ob die Körner der untersuchten Bodenprobe größenmäßig durchmischt sind oder ob bestimmte Kornfraktionen dominieren.

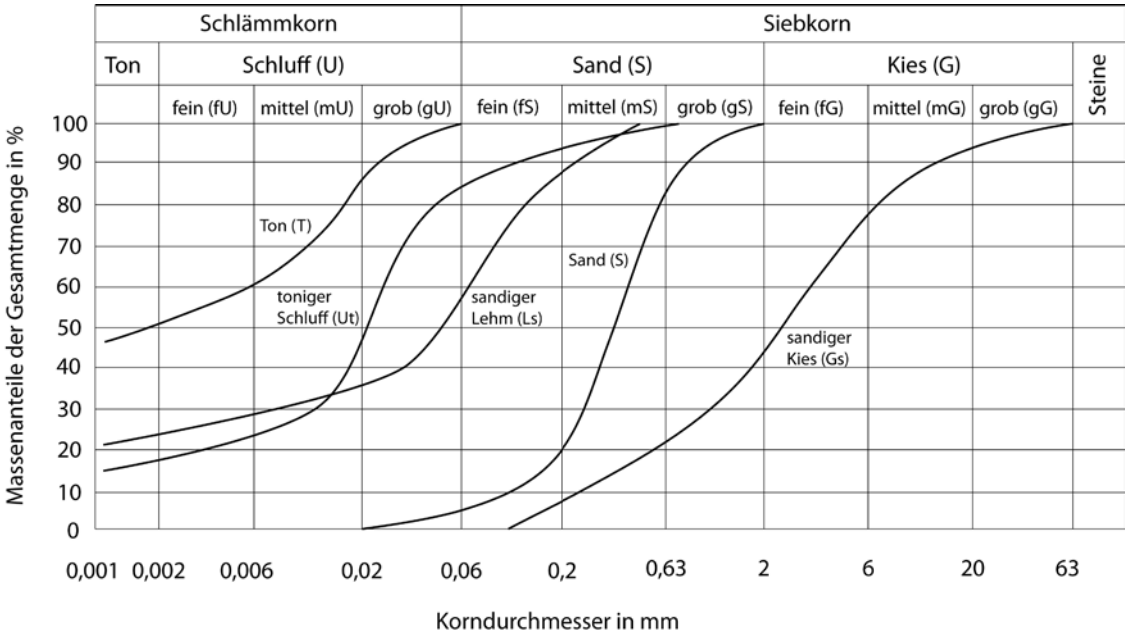

Abb. 3.1 Körnungssummenkurven

Abbildung 3.1 zeigt typische Korngrößenverteilungen verschiedener Bodenarten. Bei der Benennung der Bodenart werden häufig die Kurzbezeichnungen der Kornfraktionen verwendet, wobei die Hauptfraktion als Großbuchstabe, die Nebenfraktion als Kleinbuchstabe angegeben wird. Zusätzliche Signaturen zur Nebenfraktion werden eingesetzt, um einen besonders hohen oder niedrigen Anteil der Nebenfraktion hervorzuheben (KUNTZE et al., 1994). So deutet z.B. die Angabe $\bar{s}$ T auf einen stark sandigen Ton hin, die Bezeichnung s´T kennzeichnet hingegen einen nur schwach sandigen Ton. Als Lehm (L) wird die Bodenart bezeichnet, wenn S, U und T in etwa gleich großen Anteilen vorhanden sind.

Eine einfache Form der Darstellung von Körnungsmischungen des Feinbodens bilden Dreiecksdiagramme (Abbildung 3.2). Hierbei kann die vorhandene Bodenart bei bekannten Körnungsanteilen anhand der Diagrammgliederung schnell bestimmt werden.

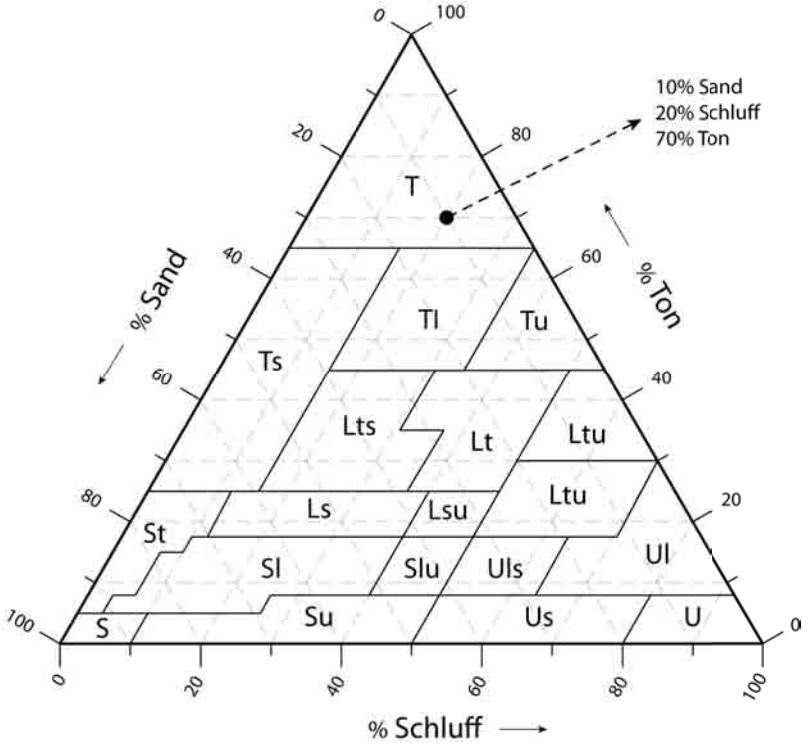

Abb. 3.2 Körnungsdreieck nach DIN 4220

3.1.3 Bodenporen

Der Porenraum im Boden ist derjenige Teil des Gesamtvolumens, der mit Wasser und Luft gefüllt ist und in dem sich alle Wasserbewegungs- und Belüftungsvorgänge abspielen. Alle Bodenkörper werden gleichsam von einem labyrinthartigen Porensystem durchzogen, da auf Grund der Formenvielfalt der Primärteilchen eine gänzlich lückenlose Lagerung nicht möglich ist und Hohlräume bzw. Poren frei bleiben. Das Porenvolumen im Boden wird somit maßgeblich von seiner Korngrößenverteilung bzw. dem Gehalt an organischer Substanz bestimmt und steht weiter in engem Zusammenhang zur Bodendichte (vgl. Kapitel 3.1.4).

Es existieren mehrere Kennziffern, um den Zustand des Bodens hinsichtlich seines Porenraumes zu beschreiben. Die zwei bedeutendsten sind das Porenvolumen und die Porenziffer:

Das Porenvolumen PV oder n, auch als Porosität bezeichnet, gibt das Verhältnis des Porenanteils in Bezug auf das Gesamtvolumen des Bodens an und ist folgendermaßen definiert:

$$PV = n = \frac{V_p}{V_g} \qquad [\%\,vol]$$

V_p *Porenvolumen*
V_g *Gesamtvolumen*

Wenn die Änderung des Gefüges (z.B. Verdichtung, Lockerung) im Vordergrund steht, wird in der Bodenmechanik häufiger die Porenziffer PZ bzw. ε verwendet, die das Verhältnis des Porenvolumens zum Feststoffvolumen beschreibt:

$$PZ = \varepsilon = \frac{V_g}{V_f} \qquad [-]$$

V_f *Feststoffvolumen*

In der nachfolgenden Tabelle 3.3 sind typische Porenkennwerte der Hauptbodenarten Sand, Schluff und Ton dargestellt:

	Porenvolumen (%)	Porenziffer (-)
Sande	46 ± 10	1,27 - 0,56
Schluffe	47 ± 9	1,27 - 0,62
Tone	50 ± 15	1,85 - 0,54

Tab. 3.3 Porenvolumen und Porenziffer verschiedener Bodenarten (SCHEFFER et al., 2002)

Die Tabelle zeigt, dass das Porenvolumen mit abnehmender Korngröße ansteigt. Einer relativ stabilen und engen Lagerung von kugelförmigen (Sand-) Körnern steht eine "kartenhausähnliche", instabilere Schichtung der Tonteilchen gegenüber, die den Gesamtporenraum vergrößert (SCHEFFER et al., 2002). Diese Kartenhausstruktur ist gegenüber Wassereinfluss und Verdichtung sehr reaktiv, was die relativ hohe Schwankungsbreite des Porenvolumens erklärt. Als Faustregel bei Mineralböden gilt ein Wert von 40 – 50 % Porenvolumen, Werte < 40 % PV sind absolut verdichtet (KUNTZE et al., 1994).

Bei der hydrogeologischen Betrachtung des Porenraumes erweist sich die Porengröße und deren Anteil am Gesamtporenvolumen als wichtiges Kriterium. Dies zeigt sich beispielsweise an der Einteilung der Porengrößenbereiche, die an charakteristische Kennwerte des Wasserhaushaltes angelehnt sind (vgl. Abschnitt 3.2.4).

Tabelle 3.4 zeigt sowohl die Gliederung der Porengrößenbereiche in Grob-, Mittel- und Feinporen, als auch deren zahlenmäßige Anteile an den Hauptbodenarten unter Angabe der üblichen Schwankungsbreiten:

Porengrößenbereich		Porendurchmesser (µm)	Anteil in Sanden (%)	Anteil in Schluffen (%)	Anteil in Tonen (%)
Grobporen	weit	> 50	30 ± 10	15 ± 10	8 ± 5
	eng	50 - 10			
Mittelporen		10 – 0,2	7 ± 5	15 ± 7	10 ± 5
Feinporen		< 0,2	5 ± 3	15 ± 5	35 ± 10

Tab. 3.4 Einteilung der Porengröße und Anteile der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen (nach SCHEFFER et al., 2002)

Der Tabelle zufolge ist der Anteil an Grobporen in Sandböden am höchsten. Dem entgegengesetzt wird in feinkörnigen Tonböden der Hauptanteil des Porenvolumens durch die Feinporen bestimmt. Bei Schluffböden sind die Porengrößen annähernd gleich verteilt. Das pflanzenverfügbare Wasser liegt in den Mittelporen. Die Grobporen sind maßgeblich für die Wasserdurchlässigkeit verantwortlich. Das Wasser in den Feinporen ist für Pflanzen nicht erreichbar.

3.1.4 Bodendichte

Da das Volumen eines Bodens oder dessen Bestandteile in der Regel nur schwer zu erfassen sind, werden stattdessen häufig Dichtewerte verwendet. Die Bodendichte beschreibt das Verhältnis der Bodenmasse zu ihrem Volumen. Hierbei muss jedoch unterschieden werden, ob der Porenraum bei der Kennzeichnung berücksichtigt wird oder nicht. *„[Die Bodendichte] ist daher keine Materialkonstante, sondern ein Kennzeichen eines veränderlichen Gefügezustandes"* (HARTGE und HORN, 2009, 43).

So bezeichnet beispielsweise die Feststoffdichte ρ_f (auch spezifisches Gewicht oder Massendichte) das Verhältnis der Feststoffmasse zum Feststoffvolumen und liegt bei mineralischer Bodensubstanz üblicherweise zwischen 2,60 und 2,75 g pro cm³. Quarz als häufigstes Mineral in Böden hat einen Wert von 2,65 g pro cm³. Die Feststoffdichte ist folgendermaßen definiert:

$$\rho_f = \frac{m_f}{V_f} \qquad \left[g / cm^3\right]$$

m_f *Feststoffmasse*
V_f *Feststoffvolumen*

Bei der Lagerungsdichte ρ_d (auch Trockendichte oder Volumengewicht) werden die Hohlräume miteinbezogen. Sie wird über das Verhältnis der getrockneten Feststoffmasse zum Gesamtvolumen definiert, wobei üblicherweise Größen zwischen 1,1 und 1,8 g pro cm³ als Richtwerte angegeben werden.

$$\rho_d = \frac{m_f}{V_g} \qquad \left[g/cm^3\right]$$

V_g *Gesamtvolumen*

Ein weiterer Dichtekennwert, der häufig im Bauwesen Verwendung findet, ist die Proctordichte ρ_{Pr}. Beim Proctorversuch wird die größtmögliche Dichte eines Bodens ermittelt, die bei optimalem Wassergehalt erreicht werden kann. Dazu werden Bodenproben in einem Stahlzylinder mit festgelegten Abmessungen durch ein Fallgewicht mit bekannter Verdichtungsarbeit nach einem standardisierten Verfahren gemäß ÖN B4418 verdichtet (PREGL, 2000). Das Versuchsverfahren sieht mehrere Testreihen vor, bei denen die Verdichtbarkeit der Proben unter stetiger Zugabe von geringen Mengen Wasser gemessen wird.

Bei der Darstellung der Versuchsergebnisse wird die beim Proctorversuch erzielte Lagerungsdichte eines Bodens als Funktion des Wassergehalts grafisch dargestellt. Aus dieser Proctorkurve lässt sich schließlich ableiten, bei welchem Wassergehalt sich der Boden am besten verdichten lässt. Der zugehörige optimale Wassergehalt wird als Proctorwassergehalt w_{pr} bezeichnet.

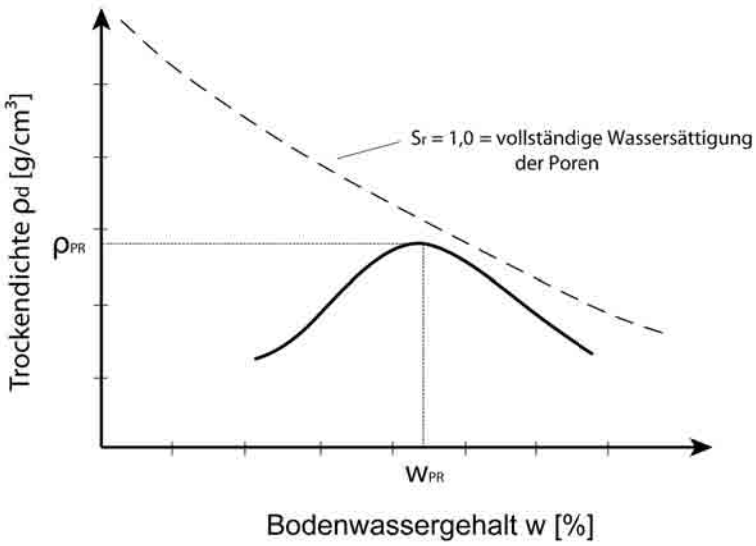

Abb. 3.3 Proctorkurve (nach SOOS, 1980)

Abbildung 3.3 zeigt, dass die Lagerungsdichte ρ_b mit zunehmendem Wassergehalt w zunächst zunimmt. Dies lässt sich durch die Verringerung der Reibungskräfte zwischen den Feststoffteilchen erklären, die durch das Bodenwasser bewirkt wird

(BORGWARDT, 2000). Wird der optimale Wassergehalt schließlich überschritten, kippt dieser Effekt, da die eingebrachte Energie nicht zur dichteren Lagerung der Körner, sondern zur Verdrängung des überschüssigen Wassers aufgewendet wird. Zumeist werden im Proctordiagramm auch Sättigungskurven eingetragen, die den Grad der Porensättigung angeben. Ein S_r-Wert von 1,0 bedeutet eine vollständige Wassersättigung der Poren, bei $S_r = 0{,}8$ sind demnach 80 % des Porenraums mit Wasser gefüllt.

Der Verdichtungsgrad D_{Pr} wird in Prozent angegeben und lässt sich über das Verhältnis zwischen der Trockendichte ρ_d des Bodens und der größten im Labor erreichbaren Dichte, der Proctordichte ρ_{pr}, ausdrücken:

$$D_{PR} = \frac{\rho_d}{\rho_{PR}} \cdot 100\% \qquad [\%]$$

Die im Labor bestimmte Proctordichte kann unter Umständen bei Verdichtungsarbeiten im Feld oder auf Baustellen überschritten werden, wodurch auch Werte über 100 % möglich sind.

3.2 Bodenwasser

Als Bodenwasser wird das gesamte im Boden enthaltene Wasser bezeichnet, das über atmosphärische Niederschläge (Regen, Schnee, Tau) zugeführt wird. Natürlicher Boden enthält stets eine gewisse Menge an Wasser, dessen Eigenschaften und Wirkungen für bodenbildende Prozesse wie Verwitterung oder Verlagerung gleichermaßen bedeutsam sind wie für Bodenlebewesen und höhere Pflanzen.

Unter der Bezeichnung Bodenwasserhaushalt wird der tages- bzw. jahreszeitliche Verlauf von Schwankungen des Bodenwassers durch Wasserzufuhr zum Boden und Wasserverlusten aus dem Boden zusammengefasst (HINTERMAIER-ERHARD und ZECH, 1997). Die wesentlichen Steuerungsgrößen dieser Wassergehaltsänderungen sind die wechselnden Witterungsbedingungen im Verlauf des Jahres und die damit verbundene Stoffwechselintensität des Bewuchses (vgl. Abschnitt 3.3). Bodenwasser ist demzufolge integraler Bestandteil des globalen Wasserkreislaufes, der über die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung ausgedrückt werden kann:

$$N = V + A + \Delta s$$

N *Niederschlag*
V *Verdunstung*
A *Abfluss*
Δs *Speicheränderung im Boden*

3.2.1 Formen von Bodenwasser

Das auf den Boden auftreffende Niederschlagswasser läuft entweder als Oberflächenwasser ab oder dringt in den Bodenkörper ein (Infiltration). Die Infiltrationsfähigkeit eines Bodens wird hierbei maßgeblich durch die Intensität des Niederschlags, die Bodenverdichtung und die Wassersättigung bestimmt. Abbildung 3.4 zeigt eine schematische Darstellung der Bodenwasserarten und deren Interaktion mit dem Niederschlag und dem Grundwasser:

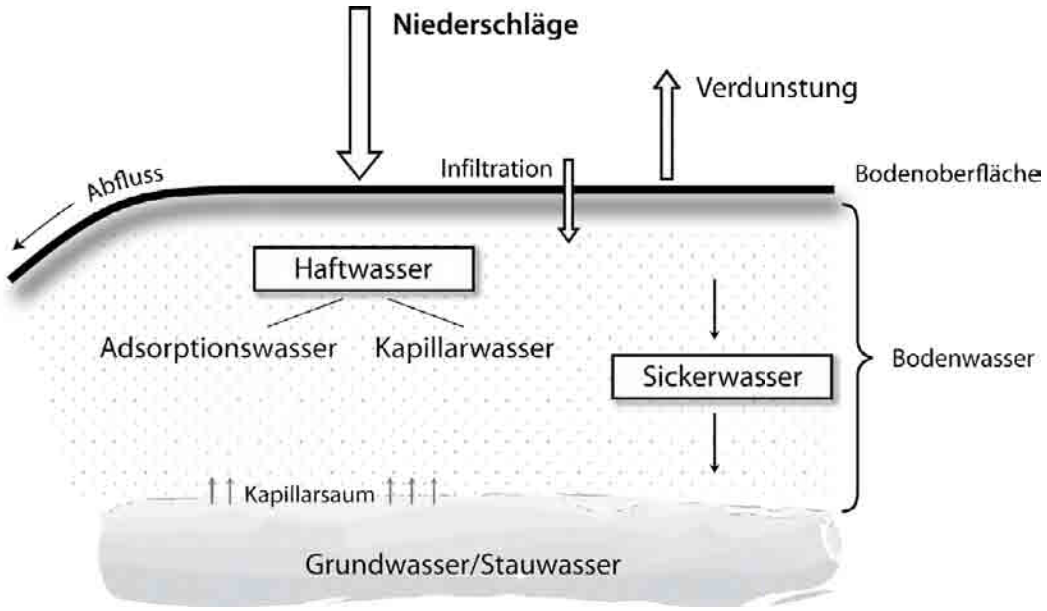

Abb. 3.4 Einteilung des Bodenwasser (nach KUNTZE et al., 1994)

Ein Teil des Niederschlagswassers, das in den Boden eindringt, durchläuft diesen unter dem Einfluss der Schwerkraft als Sickerwasser. Stößt das Sickerwasser auf eine undurchlässige Bodenschicht, so sammelt es sich über dieser an. Bei temporärer Ansammlung spricht man von Stauwasser, bei anhaltender Stauung bildet sich das Grundwasser (ACHTNICH, 1980).

Das Wasser im ungesättigten Bodenbereich wird als Haftwasser oder auch als Bodenfeuchte bezeichnet und wird über verschiedene Kräfte zwischen den Primärteilchen und den Wassermolekülen entgegen der Schwerkraft gehalten. Nach der Art der Bindung lässt sich das Haftwasser wie folgt unterteilen:

- Adsorptionswasser wird unter der Wirkung von Adsorptionskräften („Van-Der-Waals-Kräfte“) und osmotischen Kräften an die feste Oberfläche der Bodenteilchen gebunden. Die Bodenpartikel werden dabei mit einem Film aus Wassermolekülen benetzt, ohne dass Menisken (konkav gewölbte Wasserflächen) gebildet werden (BAUMHAUER et al., 2008).

- Als Kapillarwasser wird jener Teil des Bodenwassers bezeichnet, der durch das Zusammenwirken von Kohäsionskräften zwischen den Wassermolekülen und Adhäsionskräften zwischen Bodenteilchen und Wassermolekülen in den Kapillaren und Bodenporen gebunden ist. Das Zusammenspiel dieser Kräfte führt zur Ausbildung ringförmiger Menisken an den Berührungsstellen der festen Teilchen (FIEDLER, 2001).

Abbildung 3.5 illustriert die verschiedenen Arten des Haftwassers und deren Bindungsform:

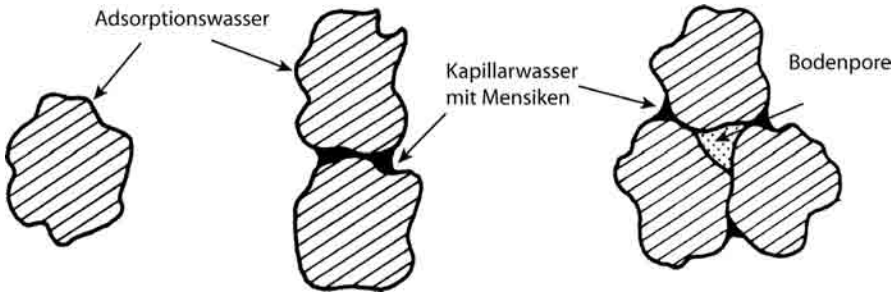

Abb. 3.5 Bindungsformen des Haftwassers (nach KUNTZE et al., 1994)

3.2.2 Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt gilt als wichtiges bodenphysikalisches Charakteristikum, das auch als Grundlage für weiterführende Bodenuntersuchungen herangezogen wird. Eine bewährte Methode zur Bestimmung des Wassergehalts ist die Bestimmung des Gewichtsverlusts durch Trocknung einer Bodenprobe bei 105 °C in einem Trockenschrank (gravimetrische Methode). Der Massenwassergehalt w_{gw} wird hierbei über das Verhältnis des Wasseranteils einer Probe zum Gewicht des getrockneten Bodens ausgedrückt:

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

w_{gw} *Wassergehalt [g]*
m_w *Masse des Wassers [g]*
m_d *Masse der trockenen Probe [g]*
m *Masse der feuchten Probe [g]*

Die Ergebnisse werden je nach Bezugsgröße in Gewichtsprozent oder unter zusätzlicher Beachtung der Lagerungsdichte volumetrisch angegeben:

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

$$\text{Vol}\,\% = \text{Gew}\,\% \cdot \text{Lagerungsdichte}\ d_b$$

Neben dieser (destruktiven) Methode der Wassergehaltsbestimmung im Labor kann dieser auch in situ über im Boden eingebaute Messgeräte bestimmt werden. Der Vorteil dieses nicht destruktiven Verfahrens besteht darin, dass auch Wassergehaltsänderungen fortlaufend registriert werden können. Die hierbei häufig eingesetzten TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry) sind in Kapitel 4.4.1 genauer beschrieben.

3.2.3 Potentialkonzept

Die Bindungskräfte, mit denen das Wasser im Boden gehalten wird, variieren in ihrer Intensität und werden maßgeblich vom Wassergehalt im Boden, der Bodenart (Korngröße) und durch die Porendurchmesser bestimmt. Die Erhebung der Kräfte mittels Messgeräten ist auf Grund des komplexen und zumeist heterogenen Bodenaufbaus schwierig. Deshalb wird anstelle der herrschenden Kräfte selbst das Potential, d.h. die gespeicherte Arbeitsfähigkeit betrachtet (SCHEFFER et al., 2002). Wasser bewegt sich im Boden in den Hohlräumen (Porenraum) stets von Stellen höheren Potentials (höhere potentielle Energie) in Richtung des niedrigsten Potentials (SCHÖNIGER und DIETRICH, 2010).

Das Potential des Bodenwassers Ψ ist durch nachfolgende Formel definiert und entspricht dem Produkt aus der Masse des Wassers, der Erdbeschleunigung und der Höhe über der Grundwasseroberfläche als Bezugsniveau:

$$\Psi = m \cdot g \cdot h$$

Ψ	*Bodenwasser-Potential*
m	*Masse des Wassers*
g	*Erdbeschleunigung*
h	*Höhe über Grundwasseroberfläche*

Direkte Messungen des Gesamtpotentials sind schwierig und größtenteils ungenau, weshalb das Potential des Bodens meist anhand dessen Teilpotentiale erhoben wird:

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

Ψ_g *Gesamtpotential*
Ψ_z *Gravitationspotential*
Ψ_m *Matrixpotential*
Ψ_o *osmotisches Potential*

Da dem Matrixpotential in Bezug auf die Fragestellung dieser Arbeit eine besondere Rolle zukommt, wird dieses Teilpotential im Folgekapitel genauer erläutert.

3.2.4 Matrixpotential

Das Matrixpotential beschreibt den Einfluss der Bodenmatrix (feste Bodensubstanz) auf die Bindung von Wasser in der ungesättigten Bodenzone. Die Adhäsions- und Kapillarkräfte, mit denen das Haftwasser an die festen Bodenteilchen gebunden wird, üben Saugspannungen auf das Bodenwasser aus. Da die Kräfte dieses Potentials der Schwerkraft entgegenwirken und somit Energie zugeführt werden muss um die Bindung zu lösen, kommt dem Matrixpotential ein negatives Vorzeichen zu. Häufig wird die Kraft jedoch als Maß der Wasserspannung positiv in Hektopascal bzw. über den pF-Wert ausgedrückt. Der pF-Wert entspricht dem dekadischen Logarithmus der Wasserspannung:

$$pF = \log \left| hPa, cm\ WS \right|$$

Dieser Zusammenhang ist in der nachfolgenden Tabelle 3.5 anhand von Beispielen dargestellt:

pF-Wert	Saugspannung in hPa
pF 1	10 Hpa
pF 2	100 hPa
pF 3	1 000 hPa
pF 4	10 000 hPa

Tab. 3.5 Umrechnungstabelle pF Wert – hPa (nach KUNTZE et al., 1994)

Die Wasserspannung hängt insbesondere vom Wassergehalt des Bodens und der Körnung bzw. der Porengrößenverteilung ab. In Abbildung 3.6 sind Wasserspannungskurven dargestellt, die den Zusammenhang zwischen der Wasserspannung und dem Wassergehalt für mehrere Bodenarten zeigen:

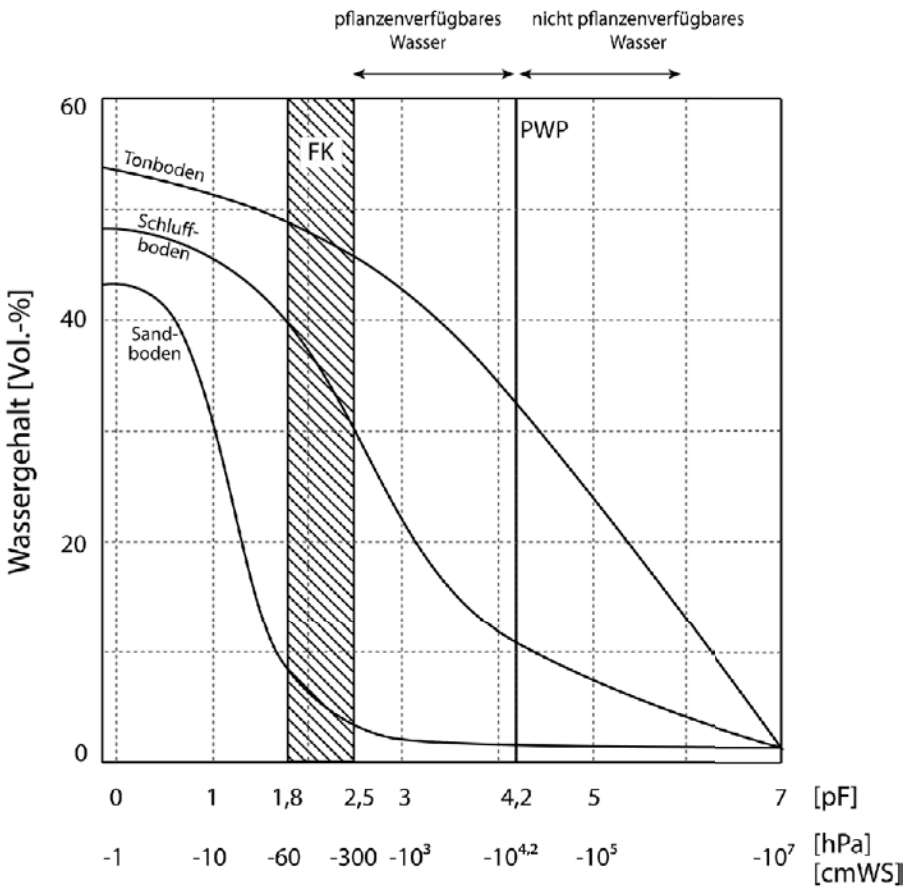

Abb. 3.6 Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung (nach SCHEFFER et al., 2002)

Man erkennt, dass die Saugspannungskräfte bei gleichem Wassergehalt verschieden stark ausgeprägt sind und mit zunehmendem Tonanteil ansteigen. Dies hängt von dem Umstand ab, dass die Bindungskräfte umso stärker sind, je kleiner der Durchmesser der Poren und je geringer der Wassergehalt ist.

Als Feldkapazität FK wird jene Wassermenge bezeichnet, die in einem Boden nach intensiver Durchfeuchtung durch Adhäsionskräfte gehalten werden kann. Diese maximale Haftwassermenge setzt einen freien Wasserabzug voraus und wird gewöhnlich zwei Tage nach einem starken Regenereignis gemessen. Die Höhe der FK variiert je nach Bodenart zwischen pF 1,8 (Sand) und pF 2,5 (Ton) (EHLERS, 1996). Aus Abbildung 3.6 geht zudem hervor, dass der Wassergehalt bei FK in einem sandigen Boden deutlich geringer ist als in Ton- und Schluffböden.

Der permanente Welkepunkt PWP kennzeichnet jene Grenze, bei der das Restwasser mit einer Adhäsionskraft von 15 000 hPa oder pF 4,2 an die Bodenteilchen gebunden und somit für Pflanzen nicht mehr verfügbar ist (Totwasser).

Die Bestimmung des Matrixpotentials erfolgt über Tensiometer, deren Messbereich bis etwa 850 hPa entsprechend pF 2,9 reicht. Nähere Erläuterungen zur Funktionsweise von Tensiometern finden sich in Abschnitt 4.4.2.

3.2.5 Wasserbewegung im Boden

Die Eigenschaft des Wassers, sich von höherem Potential in Richtung des niedrigsten Potentials zu bewegen, resultiert in permanenten Bewegungsflüssen in einem Bodenkörper. Das Ausmaß der Wasserbewegung ist abhängig von der Höhe des Potentialgefälles und von der Durchlässigkeit bzw. der Wasserleitfähigkeit des Bodens (SCHEFFER et al., 2002).

Die Wasserbewegungen unterliegen hydraulischen Gesetzmäßigkeiten und können über die Darcy-Gleichung, benannt nach dem französischen Ingenieur Henry Darcy, beschrieben werden:

$$Q = k_f \cdot F \cdot i$$

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

Hierbei bezeichnet Q die Menge an Wasser, die pro Zeiteinheit durch einen bestimmten Bodenquerschnitt F hindurchströmt. Die Wasserdurchlässigkeit fließt über den Durchlässigkeitskoeffizient k_f in die Gleichung ein und kennzeichnet den Einfluss der Bodenmatrix auf die Wasserströmung. Die Gültigkeit der Darcy-Gleichung setzt laminare Strömungen ohne Turbulenzen oder Verwirbelungen voraus, was in natürlichen Böden in der Regel gegeben ist (SCHEFFER et al., 2002). In Abbildung 3.7 sind die Parameter des Darcy-Gesetzes grafisch dargestellt:

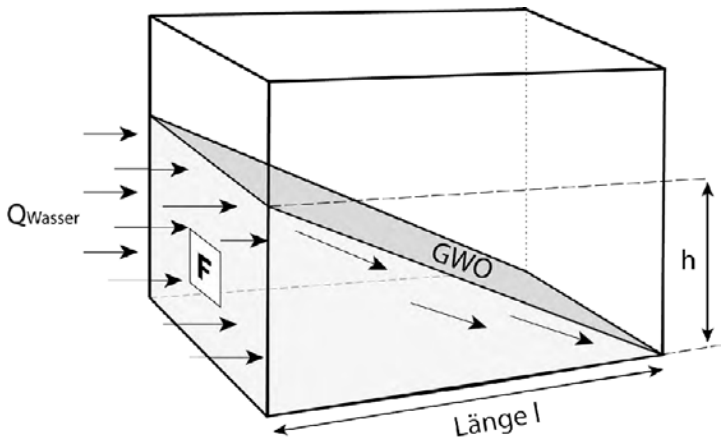

Abb. 3.7 Illustration der Darcy Gleichung (nach HINTERMAIER-ERHARD und ZECH, 1997)

F	*durchströmte Fläche*
h	*Höhe*
GWO	*Grundwasseroberfläche*

Grundsätzlich muss bei der Betrachtung von Wasserbewegungen unterschieden werden, ob der Boden wassergesättigt ist oder sich in ungesättigtem Zustand befindet.

- Im Zustand voller Wassersättigung, wie sie im Grundwasser vorherrscht, sind alle Poren gefüllt und die Wasserleitfähigkeit wird maßgeblich von der Menge, der Größenverteilung und der Kontinuität der Bodenporen bestimmt. Die Wasserbewegung findet fast ausschließlich in den Grobporen statt, wodurch sich die Permeabilität hinsichtlich der Bodenarten deutlich unterscheiden kann. Gut durchlässige Sande zeigen k_f-Werte um und über 5 cm/h, dicht gelagerte Tone dagegen Werte um 0,5 cm/h oder weniger (SCHRÖDER, 1992).

- Der überwiegende Teil des terrestrischen Bodens liegt jedoch in ungesättigtem Zustand oberhalb der Grundwasseroberfläche vor (HARTGE und HORN, 2009). Wasserbewegungen in dieser Zone werden vorwiegend durch den Wassergehalt und die damit verbundene Saugspannung bestimmt. Die weiten Poren sind bei voller Sättigung für einen Großteil der Wasserbewegung verantwortlich und werden bei Abnahme des Wassergehalts als erste entwässert. Dies hat zur Folge, dass Bewegungsvorgänge auf immer engere Poren bis hin zum Adsorptionswasser beschränkt werden.

Eine Übersicht über die Durchlässigkeitswerte verschiedener Bodenarten zeigt Abbildung 3.8:

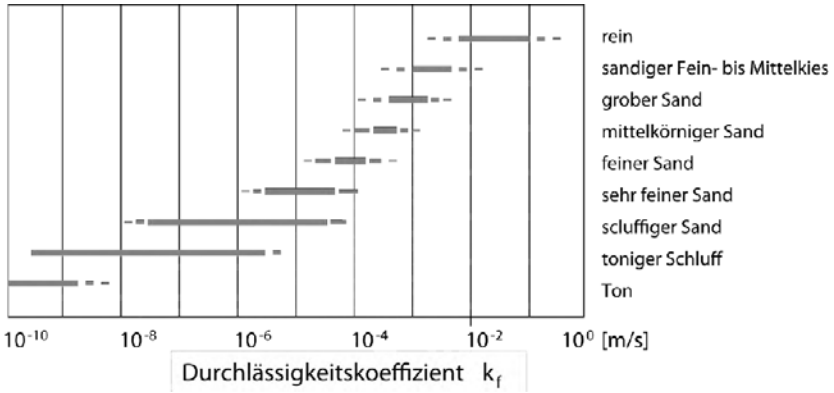

Abb. 3.8 k_f-Werte nach Bodenarten (nach BENTZ und MARTINI, 1969)

3.3 Wasserhaushalt der Pflanzen

Sämtliche Pflanzen sind auf Grund ihrer Ortsgebundenheit unmittelbar vom Bodenwasservorrat des Standortes abhängig. Wie in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, wird das Speichervermögen von Wasser und somit die Qualität eines Standortes primär durch die Bodenstruktur bestimmt.

Die entscheidenden Abläufe und Vorgänge bei der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Boden, Atmosphäre und Pflanze sind in der nachfolgenden Abbildung 3.9 dargestellt:

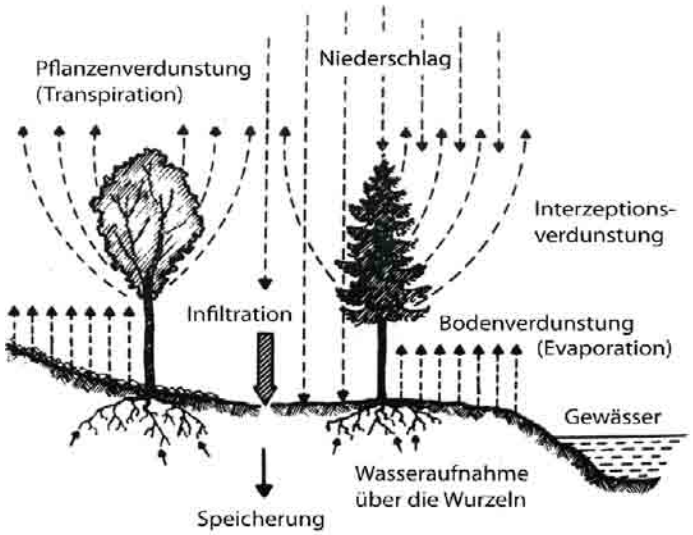

Abb. 3.9 System Boden-Pflanze-Atmosphäre (nach BRECHTEL und HAMMES, 1986)

Die Abbildung zeigt, dass in diesem System mehrere Verdunstungs- und Transportvorgänge beteiligt sind. Ein Teil des Niederschlages wird von den Blättern zurückgehalten und verdunstet ohne den Boden zu erreichen. Diese Interzeptionsverdunstung ist ein bedeutender Faktor des Wasserhaushalts und ist von der Vegetationsform bzw. –entwicklung, dem Ausmaß der Blattoberfläche und der Bestandesdichte abhängig. Der Interzeptionsverlust kann in Nadelwäldern bis zu 40 % des jährlichen Gesamtniederschlags ausmachen (BRECHTEL, 1990). Ein Teil des Niederschlags kann in den Boden eindringen und steht den Pflanzen durch die Speicherwirkung des Bodens zur Verfügung. Die weiteren Verdunstungsvorgänge sind im nächsten Abschnitt genauer behandelt.

3.3.1 Evapotranspiration

Der Begriff Evapotranspiration (ET) ist eine Kombination aus zwei Prozessen, bei denen Wasser unter Energiezufuhr in Wasserdampf umgewandelt und an die Atmosphäre abgegeben wird. Dies geschieht einerseits bei der Evaporation durch Verdunstung an Oberflächen ohne Einfluss aktiver Lebensvorgänge, andererseits durch die Abgabe des in Pflanzen enthaltenen Wassers bei der Transpiration. Beide Vorgänge laufen bei bewachsenen Böden nebeneinander ab und sind nur schwer voneinander zu trennen, weshalb sie oft zur Evapotranspiration zusammengefasst werden. Die Evapotranspiration wird in die potentielle Evapotranspiration ET_p und in die aktuelle Verdunstung ET_a unterschieden. Die folgenden Begriffsdefinitionen beruhen auf DIN 4049, Teil 3 "Begriffe zur quantitativen Hydrologie" (DVWK 238, 1996):

Als potentielle Evapotranspiration ET_p wird die Verdunstung bezeichnet, die bei ausreichender Wasserversorgung maximal möglich ist und ist direkt von klimatischen Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchte, Wind, Strahlungsintensität) abhängig.

Die aktuelle Evapotranspiration ET_a, auch als reale Evapotranspiration bezeichnet, gibt hingegen Aufschluss über die tatsächliche Verdunstung einer natürlich bewachsenen Fläche. Naturgemäß wird die Höhe der Wasserabgabe auch durch pflanzeneigene Größen bestimmt (EHLERS, 1996). Hierbei sind v.a. die Pflanzenart, die Vegetationsentwicklung, der Grad der Bodenbedeckung und die verfügbare Wassermenge die entscheidenden Faktoren. Die aktuelle Evapotranspiration als Summe mehrerer Verdunstungsprozesse kann über die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$ET_a = E_a + E_i + T_a$$

ET_a aktuelle Evapotranspiration [mm]
E_a Evaporation [mm]
E_i Interzeptionsverdunstung [mm]
T_a Transpiration [mm]

Abhängig vom Pflanzenbestand liegen die Verdunstungswerte zwischen 50 und 3000 l/m² und Jahr. Die Verdunstungsleistung von 1-3 jährigen Weiden wird von MARTIN und STEPHENS (2005) mit 300-1200 l pro Pflanze und Jahr angegeben.

3.3.2 Verfahren zur Bestimmung der Evapotranspiration

Es existiert eine Reihe von Verfahren, mit denen die Evapotranspiration erhoben werden kann. Die Bestimmung kann z.B. direkt über die Bilanzierung des Wasserkreislaufes mit einem Lysimeter erfolgen. Neben der direkten Bestimmung der Evapotranspiration gibt es eine Vielzahl an indirekten Methoden, anhand derer die Verdunstungsleistung abgeschätzt werden kann. Hierzu zählen neben Versuchen mit Verdunstungswannen auch Verdunstungsformeln und –modelle, deren Ansätze von einfachen empirischen Verfahren bis hin zu komplexen physikalischen Modellen reichen (MONTEITH, 1965).

3.3.2.1 Lysimeter

Als Lysimeter wird eine Messanlage zur Erfassung des Wasserhaushalts eines bewachsenen Bodenvolumens bezeichnet. Die Erfassung erfolgt durch Bestimmung der durch Niederschlag, Tau und Beregnung zugeführten sowie der durch Abfluss und Verdunstung abgegebenen Wassermengen (BROCKHAUS, 2000). Abhängig von den Untersuchungszielen können Lysimeter wägbar oder nicht wägbar konstruiert sein. Abbildung 3.10 zeigt eine schematische Darstellung der Funktionsweise eines Lysimeters:

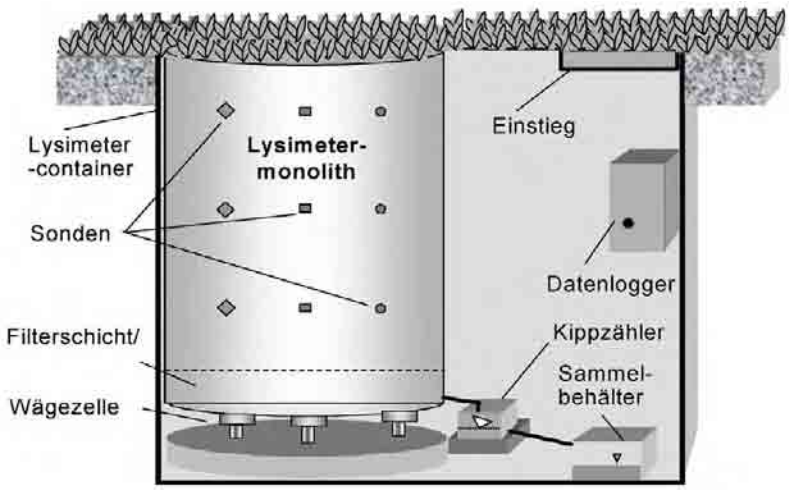

Abb. 3.10 Schema eines Lysimeters (nach MEISSNER et al., 2007)

Durch die räumliche Isolation des Bodenkörpers werden sowohl Oberflächenabflüsse als auch laterale (seitliche) Wasserflüsse verhindert (EHLERS, 1996). Daraus ergibt sich ein geschlossenes System, wonach Wasserhaushaltsgrößen über die Lysimeter-Wasserbilanz quantifiziert werden können:

$$N + I = ET_a - D - \Delta s$$

N	*Niederschlag*
I	*Bewässerung*
ET_a	*Evapotranspiration*
D	*Sickerwassermenge*
Δs	*Speicheränderung im Boden*

Wägbare Lysimeter zeichnen sich dadurch aus, dass durch die Erfassung der Gewichtsänderung des Bodenkörpers die Wasserbilanz eines Lysimeters nach der Transpiration auflösbar ist:

$$ET_a = N + I - D - \Delta s$$

Dieser recht aufwändigen und kostspieligen direkten Bestimmung der ET_a stehen diverse Rechenmodelle gegenüber, wovon eine Auswahl im nachfolgenden Kapitel dargestellt wird.

3.3.2.2 Berechnung der Verdunstung

Bei der in Kapitel 3.3.1 angeführten potentiellen Evapotranspiration ET_p werden jedoch die artspezifischen Einflüsse der Vegetation nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund wurde durch die Food and Agriculture Organization der Vereinten Nationen (FAO) ein einheitlicher Standard verabschiedet, der einen Vergleich zwischen verschiedenen Standorten erlaubt. Hierzu wird die potentielle Evapotranspiration durch den Begriff der Gras-Referenzverdunstung ET_0 ersetzt, der die aktuelle Verdunstungsleistung eines Gräserbestandes von 12 cm Wuchshöhe klar definiert. Nachfolgend sind zwei verbreitete Verdunstungs-Formeln genauer erklärt:

– *Penman-Monteith-Formel*

Die Verdunstungsformel nach Penman-Monteith ist eine Erweiterung des Ansatzes nach Penman und folgendermaßen definiert:

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

$\lambda \cdot ET_{crop}$	*latenter Wärmestrom der Verdunstung*	*[J/kg]*
R_n	*Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche*	*[W/m²]*
G	*Bodenwärmestrahlung*	*[W/m²]*
$(R_n - G)$	*effektive Strahlungsbilanz*	*[W/m²]*
ρ	*Atmosphärendichte*	*[kg/cm³]*
C_p	*spezif. Wärme der feuchten Luft*	*[kJ kg °C)]*
e_a	*Sättigungsdampfdruck*	*[hPa]*
e_d	*aktueller Dampfdruck*	*[hPa]*
$(e_a - e_d)$	*Sättigungsdefizit*	*[hPa]*
Δ	*Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve*	*[hPa °C]*
r_a	*aerodynamischer Widerstand*	*[s/m]*
r_c	*Widerstand innerhalb der Pflanzendecke*	*[s/m]*
γ	*Psychrometerkonstante*	*[hPa °C]*
λ	*latente Verdunstungsenergie*	*[kJ kg]*

Dieser theoretische Ansatz muss jedoch für Verdunstungsberechnungen entsprechend angepasst werden:

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

wobei:

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

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

Nach weiterem Umformen und Einsetzen der Randbedingungen ergibt sich für die Gras-Referenzverdunstung ET_0:

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

Auf Grund Komplexität dieser theoretisch fundierten Gleichung wird zu ihrer Lösung idealerweise spezielle Software eingesetzt. Ein großer Vorteil der computerunterstützten Berrechnung besteht auch darin, dass nicht alle oben angeführten Messwerte bekannt sein müssen und dennoch gute Ergebnisse erzielt werden können. Die minimal erforderlichen Messdaten für die Penman-Monteith Formel sind Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung.

– *Haude-Formel*

Eine relativ einfache Möglichkeit zur Berechnung der Referenzerdunstung bietet hingegen die Verdunstungsformel nach Haude. In seinem empirischen Ansatz verwendet Haude das Sättigungsdefizit der Luft, welches über die relative Luftfeuchtigkeit hergeleitet werden kann:

$$ET_{p\ Haude} = f \cdot \left(e_{s14} - e_{14}\right) \qquad [mm/d]$$

e_{s14} temperaturabhängiger Sättigungsdampfdruck, gemessen um 14h [hPa]
e_{14} zur gleichen Zeit gemessener Dampfdruck [hPa]
f empirischer Haude-Faktor

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

Der Dampfdruck e_{14} ist direkt schwer zu messen, weshalb dieser über die relative Luftfeuchtigkeit mit folgender Formel bestimmt wird:

$$RH = \frac{e_{14} \cdot 100}{e_s} \qquad [\%]$$

Die Referenzverdunstung ET_0 kann bestimmt werden, wenn die Haude-Formel durch den gerade dargestellten Zusammenhang folgendermaßen umgewandelt wird:

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

Für die Bestimmung von ET_0 nach Haude sind demnach nur Messdaten der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit erforderlich. Dies wirkt sich jedoch auch auf die Genauigkeit der Ergebnisse aus.

Auf weitere Berechnungsmethoden wie die Strahlungsformel oder die Formel nach Blaney-Criddle wird an dieser Stelle nicht näher eingegangen.

3.3.2.3 Berechnung des Pflanzenwasserverbrauchs

Der spezifische Wasserverbrauch eines Pflanzenbestandes kann mit Hilfe des Pflanzenkoeffizienten K_c bestimmt werden (ACHTNICH, 1980). Hierzu wird die Referenzverdunstung eines Standortes mit empirischen K_c-Werten multipliziert:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0$$

ET_c Pflanzenwasserverbrauch [mm/Tag]
K_c Pflanzenkoeffizient
ET_0 Gras-Referenzverdunstung [mm/Tag]

Daten über den Pflanzenwasserverbrauch sind vornehmlich für Nutzpflanzen des landwirtschaftlichen Bereichs vorhanden. Einige dieser K_c-Werte, die mit Lysimetern erhoben wurden, sind für die Sommermonate in Abbildung 3.11 dargestellt:

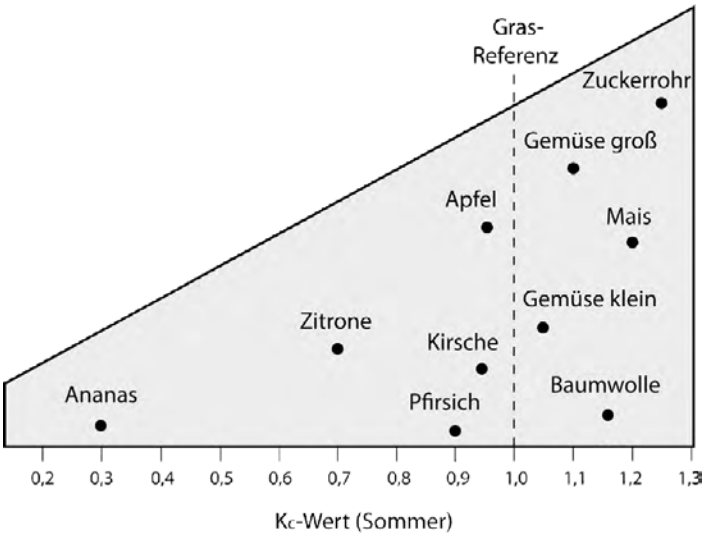

Abb. 3.11 K_c-Werte einiger Nutzpflanzen (nach ALLEN et al., 1998)

3.4 Vegetation und Standsicherheit

3.4.1 Überblick

Die Frage nach den Auswirkungen von Gehölzen auf die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen wurde und wird sehr kontrovers diskutiert. Die stabilisierende Wirkung von Gehölzen steht in der Ingenieurbiologie außer Frage und wird in einer Vielzahl von Anwendungsbereichen wie z.B. der Hang- und Ufersicherung genutzt. Die wichtigsten positiven Wirkungen aus ingenieurbiologischer Sicht sind nachfolgend angeführt (vgl. HASELSTEINER, 2007; DIN 19712, 1997):

- Wurzeln können die Standsicherheit erhöhen, indem sie ungünstige Gleit- und Rutschflächen durchdringen. Dieser Verdübelungseffekt wirkt bodenstabilisierend

- Gehölzwurzeln tragen zur Entwässerung des Bodens bei; dadurch wird der Boden verfestigt und stabilisiert
- Gehölze, besonders wurzelintensive Sträucher, können zum Schutz vor Oberflächenerosion beitragen

Auf und an Hochwasserschutzdämmen können Gehölze aber auch negative Auswirkungen zeigen und deren Standsicherheit gefährden. Insbesondere große Bäume und sehr dichte Vegetationsbestände auf Dämmen sind sicherheitstechnisch als bedenklich einzuschätzen. HASELSTEINER (2007) führt diesbezüglich u.a. folgende nachteiligen Auswirkungen an:

- Bodenlockerung durch die Baumwurzeln bei Sturm bzw. Dammbeschädigungen bei Windwurf
- Begünstigung von Oberflächenerosion durch Wellenschlag und Strömung
- Ausbildung von Hohlräumen und Sickerwegen durch verrottende Wurzeln
- Beschattung vermindert den Grasbewuchs bzw. die Grasnarbe
- Erschwernis der Dammüberwachung bzw. Behinderung des Unterhalts
- Erhöhung der statischen Belastung des Dammkörpers

Auch in Normen und Regelwerken wird der Bewuchs auf Hochwasserschutzdämmen thematisiert: So heißt es beispielsweise in der DIN 19712-11 "Flussdeiche" (1997) bezüglich Gehölzen auf S. 23: *„Auf Deichen dürfen sie [Sträucher und Bäume] nur unter besonderen Bedingungen geduldet werden (...)“*. Die Konsequenz ist die in den Folgekapiteln der Norm ablesbare Empfehlung einer weitgehenden Vermeidung von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen.

3.4.2 Bodenentwässerung und Standsicherheit

Die Stabilität von Hängen und Böschungen hängt von verschiedenen Einflussfaktoren ab. Neben den strukturellen Eigenschaften des Bodens spielen auch dynamische Einflussfaktoren des Wasserhaushaltes (Niederschlag, Evapotranspiration) eine wichtige Rolle (RAHARDJO, 2007).

Der Entzug von Bodenwasser durch die Verdunstung von Pflanzenbeständen wirkt in mehrerer Hinsicht stabilitätsfördernd (FLORINETH, 2004):

- zunehmende Kohäsion der Bodenpartikel
- geringerer Porenwasserdruck bzw. erhöhte Bodenwasserspannung
- abnehmende Schubkräfte infolge Gewichtsverminderung

KATZENBACH und WERNER (2007) konnten anhand von Feldversuchen an Dämmen den Wasserentzug durch Wurzeln während der Vegetationszeit bis in eine Tiefe von 3 m nachweisen. Dabei wurden Saugspannungen bis zu 800 hPa registriert. SWEENY (1982) untersuchte in Hong Kong die Wasserspannung von sandigen Hängen über eine Zeitspanne von einem Jahr. Die Ergebnisse zeigten, dass die Saugspannungen während der gesamten Messperiode für die Stabilität der Hänge von Bedeutung sind.

4 Methodik

4.1 Überblick

Die grundlegende Funktionsweise eines Lysimeters wurde bereits in Kapitel 3.3.2.1 behandelt. Die Eigenschaften der 2009 errichteten Lysimeter-Versuchsanlage in Deutsch-Wagram (NÖ) sind Gegenstand dieses Abschnittes.

4.2 Versuchsanordnung

In der ersten Planungsphase im Frühjahr 2009 wurde das Ausmaß der Versuche festgelegt. Demzufolge sollen insgesamt zwanzig Versuchsbehälter errichtet werden und die Beobachtung über mindestens drei Jahre möglich sein.

Vor der Anordnung der Lysimeter im Gelände mussten mehrere Überlegungen angestellt werden. Demnach wurde die Position der Versuchsbehälter im Gelände so gewählt, dass die Kabelleitungen der Messinstrumente zum Datenlogger der Versuchsanlage möglichst kurz gehalten wurden. Weitere Faktoren wie Exposition und etwaige Beschattung der Gräser und Kräuter durch die höherwüchsigen Weiden flossen ebenso in die Planung mit ein.

Die nachfolgende Abbildung 4.1 zeigt die Anordnung der Lysimeter mit den unterschiedlichen Bepflanzungsformen im Grundriss:

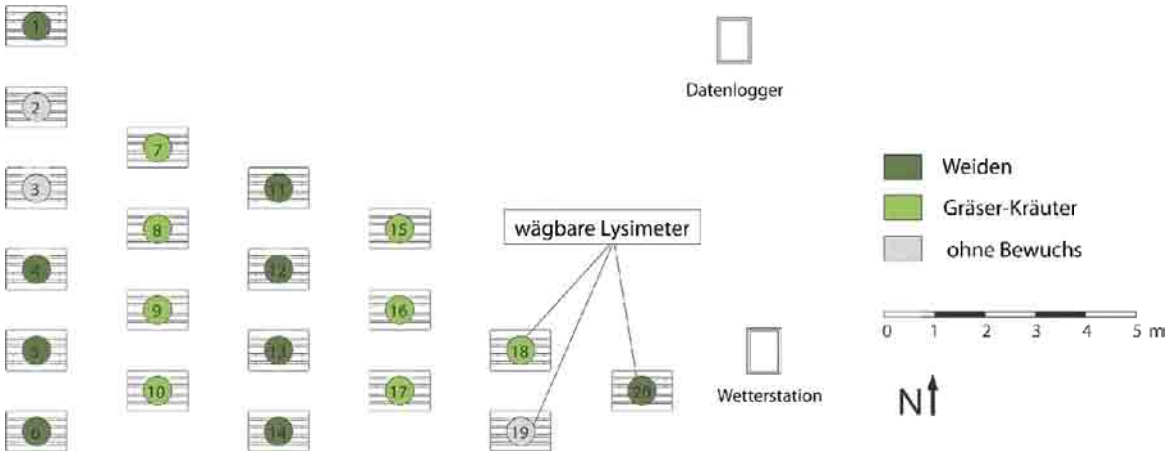

Abb. 4.1 Anordnung und Einteilung der Lysimeter, Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009

Aus dem Plan geht hervor, dass von insgesamt 20 Versuchsbehältern neun mit Weiden und acht mit Gräsern und Kräutern bepflanzt wurden. Drei der Behälter blieben dabei ohne Bewuchs und dienen als Nullvariante zur Überprüfung der Untersuchungsergebnisse. Ein Exemplar jeden Typs wurde mit spezieller Messtechnik ausgestattet und zu einem wägbaren Lysimeter ausgebaut (vgl. Abschnitt 4.4). Die relativ große Anzahl an Untersuchungsbehältern lässt sich

durch weitere geplante Untersuchungen erklären, bei denen Wurzeluntersuchungen und Scherversuche vorgesehen sind, welche die Zerstörung der Behälter notwendig machen.

Nachfolgend wird der Begriff Lysimeter auch für die Versuchsbehälter 1-17 verwendet, wenngleich sich einige der nächsten Abschnitte, z.B über die Messtechnik und die Wasserhaushaltsuntersuchungen (Kapitel 4.4) auf die drei Lysimeter 18-20 beschränken.

4.3 Grundkonstruktion der Lysimeter

Als Versuchsbehälter wurden Kunststofffässer mit 208 Liter Fassungsvermögen verwendet, welche mit einer Abflussvorrichtung aus der Beregnungstechnik versehen wurden. Die Höhe der Behälter beträgt 96 cm bei einem Innendurchmesser von 55,4 cm.

Abb. 4.2 Versuchsbehälter auf Euro-Paletten (Deutsch-Wagram, 20.05.2009)

Abb. 4.3 Abflussvorrichtung der Versuchsbehälter (Deutsch-Wagram, 20.05.2009)

Um einen stabilen und waagrechten Stand sowie die für spätere Untersuchungen benötigte Transportfähigkeit garantieren zu können, wurden je zwei Lagen Euro-Paletten als Unterkonstruktion verwendet und mittels Unterhölzern und einer Wasserwaage waagrecht ausgerichtet. Die Abflüsse sind so platziert, dass sie durch die Zwischenräume der Paletten passen und für den späteren Anschluss der Sickerwasserbehälter bzw. Kippwaagen (bei den wägbaren Lysimetern) und für Wartungsarbeiten erreichbar bleiben.

4.3.1 Bodenaufbau

Für die Lysimeterversuche wurde das gleiche Bodenmaterial wie bei den Versuchsdämmen verwendet und auch in derselben Verdichtung eingebaut. Zur Überprüfung der Verdichtung (vgl. Kapitel 4.3.3) wurden die Behälter sowohl außen als auch innen in regelmäßigen Abständen mit Markierungen versehen. Um eine Verstopfung der Abflüsse zu vermeiden, sorgt eine 10 cm starke Drainschicht

aus gewaschenem Kies (Korngröße 16/32) im untersten Teil der Gefäße für die nötige Entwässerung. Darüber wurde ein dünnes Schutzvlies aufgelegt, welches ausgeschwemmtes, feines Bodenmaterial aus den oberen Schichten zurückhält.

Abbildung 4.4 zeigt einen der Behälter mit den Markierungen und der Kiesschicht, Abbildung 4.5 die schematische Darstellung vom Aufbau des Bodens:

Abb. 4.4 Markierungen und Drainschicht der Versuchsbehälter (Deutsch-Wagram, 20.05.2009)

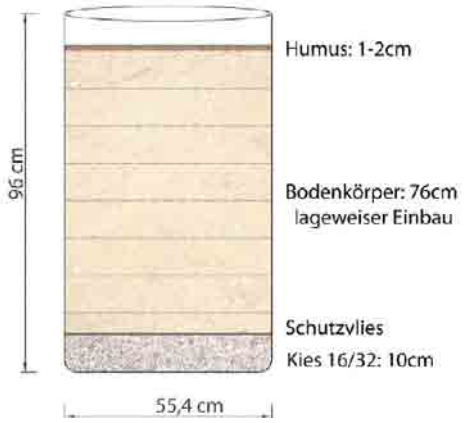

Abb. 4.5 Schichtaufbau des Bodens in den Versuchsbehältern, Deutsch-Wagram, 2009

4.3.2 Bodenmaterial

Die genaue Zusammensetzung des Bodens war für die Planung der weiteren Vorgehensweise von entscheidender Bedeutung, da wesentliche geophysikalische Eigenschaften des Bodens in direktem Zusammenhang mit der Bodenart stehen (vgl. Abschnitt 4.3.3). Da bei dieser Versuchsreihe das gleiche Ausgangsmaterial wie beim Bau der Versuchsdämme verwendet wird, konnten die Ergebnisse der geotechnischen Bodenuntersuchungen auch für die Lysimeter herangezogen werden.

Die Bodenart des Baumaterials der Versuchsdämme wurde gemäß der ÖNORM B4412-Korngrößenverteilung ermittelt und ist in nachfolgendem Diagramm abgebildet:

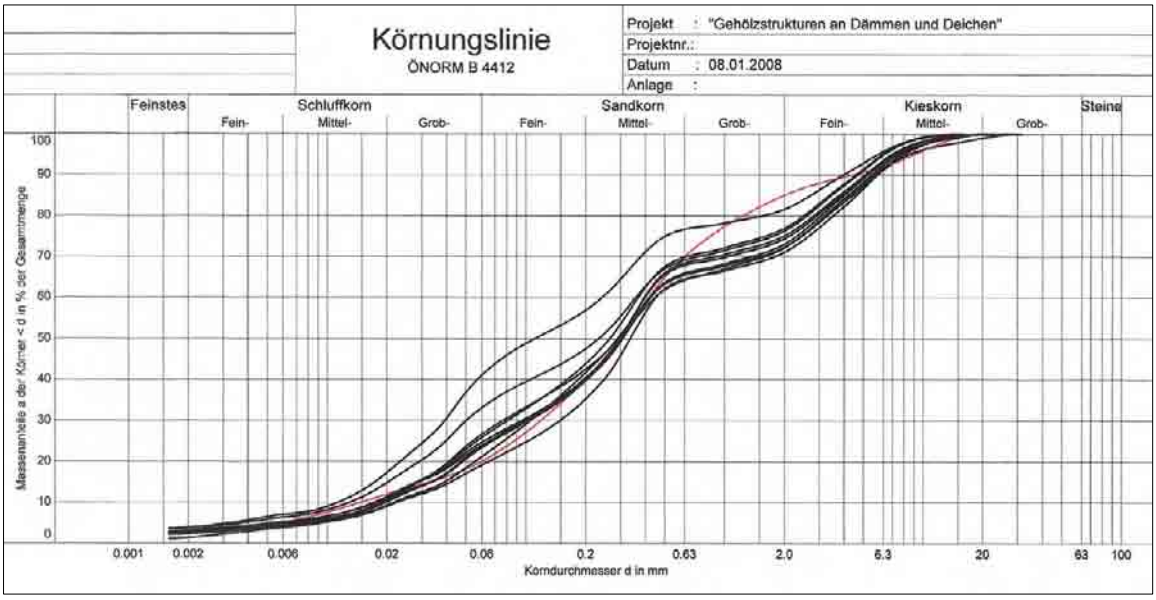

Abb. 4.6 Körnungslinien des Bodenmaterials für die Versuchsdämme in Deutsch-Wagram, 2008 (10 Materialproben)

Es handelt sich demnach um gemischtkörnigen Boden der Bodengruppe SŪ mit der genauen Bodenartbezeichnung S, ū, fg, mg´, in Worten: Sand, stark schluffig, feinkiesig, schwach mittelkiesig.

4.3.3 Verdichtung

Neben der Ermittlung der Bodenart, galt den spezifischen Verdichtungseigenschaften des Materials besonderes Interesse. Die maximal mögliche Verdichtung wurde über einen Proctorversuch ermittelt. Dieser ergab eine maximal mögliche Verdichtung ρ_{pr} von 2,028 g/cm³ bei einem Proctorwassergehalt w_{pr} von 9,7 %. Der Verdichtungsgrad D_{pr} = 97 %, in Abbildung 4.7 als gestrichelte Linie kennzeichnet, markiert die geforderte Untergrenze beim Bau der Versuchsdämme.

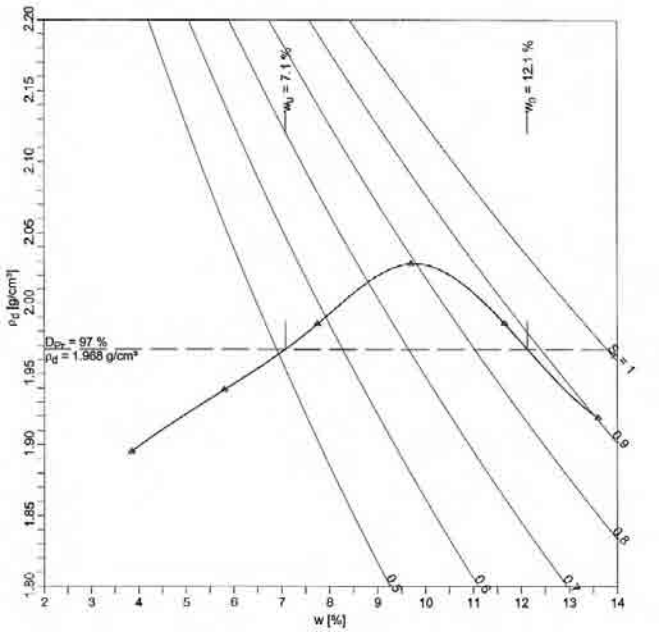

Abb. 4.7 Proctorkurve des Bodenmaterials für die Versuchsdämme in Deutsch-Wagram, 2007

Das Ergebnis des Proctorversuchs wurde als Richtwert herangezogen, um die benötigte Materialmenge für die Lysimeter bestimmen zu können. Die Einteilung der Behälter in die oben erwähnten Schichten ist erforderlich, um durch lageweises Schütten und Verdichten einen möglichst homogen komprimierten Erdkörper zu gewinnen. Die Schichtstärke wurde auf 5 cm festgelegt, wonach der gewichtsmäßige Anteil der einzelnen Lagen wie folgt berechnet werden konnte:

Volumen pro Schicht: $h = 5$ cm; $r = 27{,}7$ cm

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot h = 27{,}7^2 \cdot \pi \cdot 5 = 12.052{,}6\ \text{cm}^3$$

Maximale Verdichtung: $\rho_{pr} = 2$ g/cm³

$$12.052{,}6\ \text{cm}^3 \cdot 2\ \text{g} = 24.105\ \text{g} = 24{,}1\text{kg}$$

Daraus folgt, dass bei einer angestrebten Verdichtung von 2 g/cm³ ein Materialbedarf von 24,1 kg pro Lage erforderlich ist. Die Abbildungen 4.8 bzw. 4.9 zeigen den Wiegevorgang und einen Versuchsbehälter mit lose geschüttetem Material:

Abb. 4.8 Abwägen des Bodenmaterials (Deutsch-Wagram, 15.06.2009)

Abb. 4.9 Einbaumaterial unverdichtet (Deutsch-Wagram, 15.06.2009)

Für die Verdichtungsarbeit wurde eine dynamische Lastplatte mit einem Fallgewicht von 10 kg eingesetzt, die mehrmals pro Verdichtungsschicht im Rotationsprinzip angesetzt und ausgelöst wurde. Abbildung 4.10 zeigt die Lastplatte auf einer verdichteten Bodenschicht, Abbildung 4.11 das Vorgehen bei der Verdichtung:

Abb. 4.10 Lastplatte und verdichteter Boden (Deutsch-Wagram, 15.06.2009)

Abb. 4.11 Verdichtungstätigkeit unter Mithilfe von Walter Lammeranner (links) (Deutsch-Wagram, 15.06.2009)

Durch die Verdichtung mit der Lastplatte konnten erstaunlich hohe Verdichtungswerte erzielt werden. Bei den wägbaren Lysimetern wurde einheitlich eine Lagerungsdichte ρ_d von 1,95 g/cm³ erreicht, was einem Verdichtungsgrad D_{pr} knapp unter 97 % entspricht. Für die Füllung eines Lysimeters mit einem Volumen von 183 l wurden demnach insgesamt 356 kg an Einbaumaterial verwendet.

4.4 Messtechnik

Neben grundlegenden Messgrößen, die bei Lysimeteruntersuchungen erhoben werden müssen (Niederschlag, Sickermenge, Gewicht), wurden drei Versuchsbehälter mit speziellen Messsonden ausgestattet. Diese ermöglichen es, den Wassergehalt, die Bodenwasserpannung und die Temperatur in verschiedenen Lagen der Lysimeter zu registrieren. Die Daten werden dabei alle 10 Minuten abgerufen und auf einem Datenlogger zwischengespeichert, bevor diese über eine Modemverbindung an den Universitätsserver der Universität für Bodenkultur übermittelt werden.

Abbildung 4.12 zeigt den Plan eines Lysimeters mit den verwendeten Messgeräten und den jeweiligen Einbautiefen:

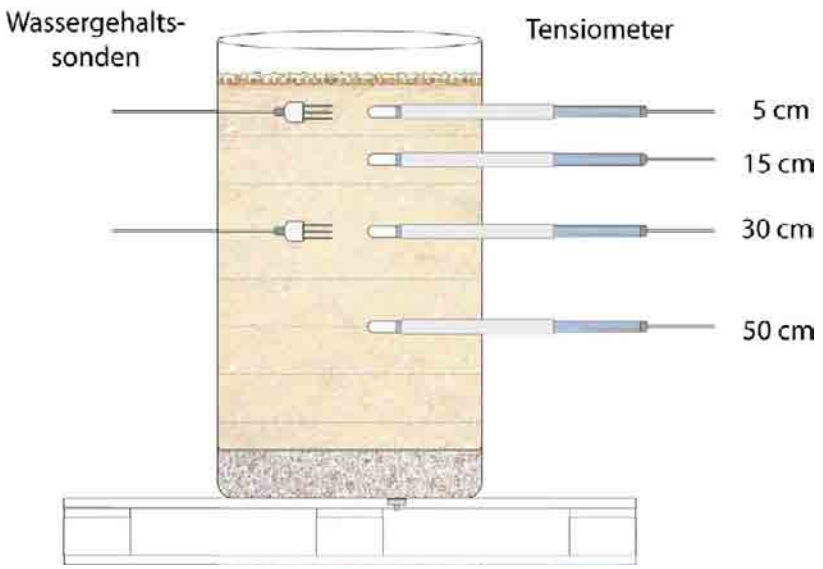

Abb. 4.12 Eingebaute Messtechnik (Lysimeter 18-20), Deutsch-Wagram, 2009

4.4.1 Wassergehaltssensoren

Zur Bestimmung des Wassergehalts wurden die Sensoren Hydra-Probe 12 der Fa. Stevens in den Bodenkörper der Lysimeter eingebaut. Diese multifunktionalen Messinstrumente liefern Daten über den aktuellen Bodenwassergehalt (volumetrisch in %) und die Bodentemperatur.

Die Sensoren funktionieren dabei nach dem Prinzip der TDR-Technologie (Time Domain Reflectometry), bei der die Laufzeit von hochfrequenten, elektromagnetischen Wellen zwischen zwei oder mehreren Elektroden gemessen wird. Die Geschwindigkeit, mit der sich der elektromagnetische Puls in einem Medium ausbreitet, ist abhängig von dessen dielektrischer Leitfähigkeit (Durchlässigkeit für elektrische Felder). Die Dielektrizitätskonstante von Wasser

liegt bei einem Wert um 80 und ist erheblich größer als die Leitfähigkeit der Luft (ca. 1) und der Bodenbestandteile (< 3 - 5). Die durch die Laufzeit indirekt bestimmte Dielektrizitätskonstante ist ein Maß für den Wassergehalt (UMS GmbH, 2010).

Die nachstehenden Abbildungen zeigen einen der Wassergehaltssensoren vor bzw. beim Einbau in den Boden:

Abb. 4.13 TDR-Sonde (Deutsch-Wagram, 12.06.2009)

Abb. 4.14 Einbau der TDR-Sonde (Deutsch-Wagram, 12.06.2009)

Die Sensoren wurden nach Ausmessen der Einbautiefe von der Seite in den bereits verdichteten Boden gesteckt und überschüttet. Um die hochempfindlichen Geräte bei der oberhalb folgenden Verdichtung nicht zu beschädigen, wurde der Boden im Bereich der Elektronik mit einem leichteren Fallgewicht komprimiert.

4.4.2 Tensiometer

Tensiometer werden eingesetzt um die Bodenwasserspannung bzw. das Matrixpotential eines Bodens im Gelände zu bestimmen. Über eine poröse Keramikzelle, die mit entionisiertem bzw. destilliertem Wasser gefüllt wird, steht das Tensiometer in direktem Kontakt zum Bodenwasser. Ein luftdicht eingebautes Manometer registriert Spannungsunterschiede zwischen der porösen Sonde und der Saugspannung des Bodens. Bei trockenem Boden, d.h. hoher Saugspannung, wird dem Tensiometer Wasser entzogen und der entstehende Unterdruck über den Druckaufnehmer in hPa gemessen.

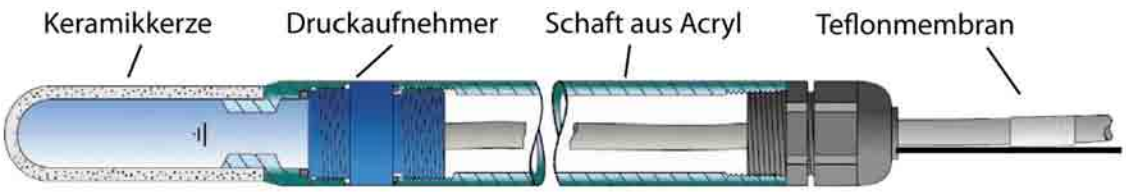

Abb. 4.15 Tensiometer T4 (UMS GmbH, 2010)

Über eine wasserabweisende Teflonmembran am Kabel wird die Saugspannung differenziell gegen den atmosphärischen Referenzdruck gemessen und am Tensiometerkabel zur Referenzseite des Sensors geleitet. Die Membran muss während der Messungen freien Luftkontakt haben um fehlerhafte Messdaten auszuschließen. Der maximale Messbereich der verwendeten Tensiometer T4 der Fa. UMS reicht bis zu einer Wasserspannung von 850 hPa. Prinzipiell können mit diesem Modell auch Werte bis zu 1000 hPa registriert werden, bei der Überschreitung von 850 hPa sollte der Tensiometer jedoch überprüft und gegebenenfalls wiederbefüllt werden. Das Messsignal wird elektronisch (analog) ausgegeben und an den Datenlogger übertragen.

Der Einbau der Tensiometer erfolgte nach der Fertigstellung der Bodenkörpers von außen über Hüllrohre aus PVC-Kunststoff, die bereits beim Füllen der Behälter mit eingebaut wurden. Zum einen werden dadurch die empfindlichen Keramikspitzen vor Beschädigungen bei der Verdichtung bewahrt, zum anderen ermöglichen die Rohre den Ausbau der frostempfindlichen Tensiometer über die Wintermonate.

Abb. 4.16 Hüllrohr und Tensiometerspitze (Deutsch-Wagram, 10.06.2009)

Abb. 4.17 Lysimeter mit installiertenTensiometern (Deutsch-Wagram, 10.06.2009)

4.4.3 Sickerwassermessung

Zur Bestimmung der Sickerwassermenge und der Durchflussrate werden Kippzähler der Fa. UMS verwendet, die kleine Fließmengen mit einer Auflösung von 5 ml je Kippvorgang registrieren. Die maximal messbare Durchflussrate beträgt 300 ml/min.

Abb. 4.18 Kippzähler für die Sickerwassermessung (Deutsch-Wagram, 08.07.2009)

Abb. 4.19 Anschlussschläuche mit Adapter (Deutsch-Wagram, 08.07.2009)

Um die Anschlussöffnung des Kippzählers mit einem Durchmesser von 4 mm mit der Abflussöffnung der Lysimeterbehälter verbinden zu können, wurde ein T-Adapter eingefügt und an einem Ende mit Silikonkleber wasserdicht verschlossen. Bei den Versuchsbehältern wird das Sickerwasser über Kunststoffkanister aufgefangen und regelmäßig gemessen.

4.4.4 Wiegeelektronik

Das Gewicht der Lysimeter wird elektronisch über DMS-Wiegezellen erfasst. Hierbei wird die Auflast über Dehnungsmessstreifen ermittelt, die selbst geringe Verformungen des Aufnehmers durch Änderung ihres Widerstandes messbar machen. Die maximale Gebrauchslast der Wiegezellen liegt bei 600 kg bei einer Auflösung von etwa 200 g. Für eine gleichmäßige Verteilung der Auflast sorgen U-Profile aus Stahl, die sowohl oben als auch unten an die Rahmenkonstruktion angeschweißt wurden. Justierschrauben an der Unterseite des Gestells dienen zur waagrechten Ausrichtung der Lysimeter.

Abb. 4.20 Wiegezelle (Deutsch-Wagram, 16.07.2009)

Abb. 4.21 Rahmenkonstruktion für die Wiegezelle der Lysimeter (BOKU, 02.07.2009)

4.5 Wetterstation

Um die meteorologischen Einflussfaktoren vor Ort zu erfassen, wurde eine kleine Wetterstation eingerichtet, deren Messhöhe sich an der Oberkante der Lysimeter orientiert und bei etwa 1,6 m liegt. Die nächsten zwei Abbildungen zeigen die Wetterstation und den Datenlogger bei der Einrichtung, anschließend werden die einzelnen Messinstrumente bzw. deren Funktionsweise kurz erklärt.

Abb. 4.22 Wetterstation (Deutsch-Wagram, 03.07.2009)

Abb. 4.23 Einrichtung des Datenloggers (Deutsch-Wagram, 03.07.2009)

4.5.1 Niederschlag

Die Erfassung der Niederschlagshöhe erfolgt über einen Kippwaagen-Regenmesser der Fa. Young. Dabei wird die Regenmenge über einen Kippmechanismus ähnlich dem des Sickerwasser-Zählers gemessen (vgl. Kapitel 4.4.3). Die Referenzmessfläche beträgt 200 cm² bei einer Auflösung von 0,1 mm pro Kippbewegung.

Ein Filtereinsatz aus Kunststoff soll Verstopfungen durch eingetragene Fremdkörper verhindern. Trotzdem sind regelmäßige Wartung und Funktionskontrolle von Nöten um etwaige Messfehler auszuschließen.

Abb. 4.24 Niederschlagsmesser (Deutsch-Wagram, 03.07.2009)

Abb. 4.25 Installation der Messgeräte durch Walter Lammeranner und Friedrich Zott (Deutsch-Wagram, 03.07.2009)

4.5.2 Temperatur und Luftfeuchte

Die Umgebungstemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit werden über das Vaisala HMP54 der Fa. Stevens gemessen. Ein Strahlungsschutz in Form mehrerer übereinanderliegender Lamellen schirmt die Sensoren vor der direkten Sonneneinstrahlung ab.

4.5.3 Windgeschwindigkeit

Zur Messung der Windintensität wurde die Wetterstation um einen Windgeschwindigkeitsgeber (Anemometer) der Fa. Kroneis erweitert. Der Schalenstern besteht aus faserverstärktem Kunststoff und ist bis zu einer maximalen Windgeschwindigkeit von 200 km/h zertifiziert.

Abb. 4.26 Windmessgerät (Deutsch-Wagram, 16.07.2009)

4.5.4 Strahlung

Die Intensität der Globalstrahlung wird über einen Pyranometer der Fa. Apogee Instruments gemessen, dessen Messbereich zwischen 300 und 1000 nm liegt. Bei der Einrichtung des Strahlungssensors ist auf eine ebene und freie Ausrichtung zu achten.

Abb. 4.27 Strahlungssensor (Deutsch-Wagram, 16.07.2009)

4.6 Bepflanzung und Begrünung der Lysimeter

4.6.1 Weidenspreitlage

Die Weidenspreitlage ist eine ingenieurbiologische Bauweise, welche zumeist zur Ufersicherung an Fließgewässern eingesetzt wird. Hierbei werden Weidenäste in engem Abstand auf die zu sichernde Böschung quer zur Fließrichtung gelegt und mittels Kokosschnur oder Draht dicht an die Bodenoberfläche niedergebunden (FLORINETH, 2004). Im Folgenden wird der Begriff Spreitlage stellvertretend für die Bepflanzung der Versuchsbehälter verwendet.

Für die Errichtung der Spreitlage wurden ausschließlich Äste der Purpurweide (*Salix purpurea*) verwendet. Diese wurden bereits im März im Versuchsgarten der Universität für Bodenkultur in Essling (Wien) geschnitten und bis zur Verwendung in einem Kühlraum gelagert. Bereits bei der Bepflanzung der Versuchsdämme kam diese Weidenart zum Einsatz, die sich insbesondere durch ihre hohe ökologische Amplitude (feuchte bis trockene Böden und niedere bis hohe Lagen), ihre hohe Elastizität und die ausgezeichnete vegetative Vermehrbarkeit auszeichnet (HÖRANDL und FLORINETH, 2002). Die Purpurweide gilt auf Grund ihrer hohen Resistenz gegen Überstauung und Überschüttung als wertvolle Weide für ingenieurbiologische Bauprojekte und eignet sich demnach sehr gut für die Befestigung von Ufern und Böschungen im Lebendverbau. WARDA (2002)

beschreibt die Hauptwurzel der Purpurweide zudem als tiefreichend, die Nebenwurzeln als flach und dicht verzweigt, teilweise auch verfilzend.

An den Weidenästen waren bereits Wurzelansätze vorhanden, die die Vitalität und Triebkraft dieser Weidenart hervorheben (Abbildung 4.28). Nach dem Zuschneiden entsprechend dem Durchmesser der Behälter (Abbildung 4.29), wurden Länge, Gewicht und Durchmesser der einzelnen Weidenäste gemessen.

Abb. 4.28 Weidenäste mit Wurzelansätzen (Deutsch-Wagram, 22.06.2009)

Abb. 4.29 Zuschnitt der Weidenäste – Elke Ebner und Walter Lammeranner (Deutsch-Wagram, 22.06.2009)

Abbildung 4.30 zeigt einen Lysimeter unmittelbar nach dem Einlegen der insgesamt 33 Weidenäste am 22.06.2009. Die Hohlräume zwischen den dicht verlegten Weidenästen wurden mit Humus gefüllt und 1 cm hoch überschüttet. Die Humusschicht dient zum Schutz vor Austrocknung und wurde nach dem Aufbringen leicht angedrückt (Abbildung 4.31).

Abb. 4.30 Eingelegte Weidenäste (Deutsch-Wagram, 22.06.2009)

Abb. 4.31 Aufbringen der Humusschicht (Deutsch-Wagram, 22.06.2009)

4.6.2 Gräser-Kräuter-Ansaat

Für die Begrünung mit Gräsern und Kräutern wurde die Trockenrasenmischung Nr. 14 des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien in leicht abgewandelter Form verwendet. Diese Saatgutmischung wurde auch bei der Begrünung der Versuchsdämme eingesetzt.

Vor dem Ausbringen des Saatguts mittels Trockensaatmethode (Ausbringen des Saatgutes ohne zusätzliche Hilfsmittel) wurde das Erdreich durch oberflächliche Lockerung und das Aufbringen einer etwa 2 cm hohen Humusschicht vorbereitet. Die nachstehenden Abbildungen zeigen das Verfahren der Ansaat und das Ergebnis nach leichtem Andrücken des Saatguts.

Abb. 4.32 Ausbringen des Saatguts (Deutsch-Wagram, 29.06.2009)

Abb. 4.33 Zustand nach der Ansaat (Deutsch-Wagram, 29.06.2009)

Für die Ansaat am 29. Juni 2009 wurden je Versuchsbehälter 10,6 g Saatgut verwendet. Eine detaillierte Aufstellung der Artenzusammensetzung und deren prozentuellen Anteile sind in der folgenden Tabelle 4.1 ersichtlich dargestellt:

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

Tab. 4.1 Saatgutmischung für die Versuchsbehälter in Deutsch-Wagram, 2009

4.7 Vegetationsaufnahmen

Für die methodische Ermittlung mehrerer Vegetationsparameter wurden verschiedene Verfahren eingesetzt, die teilweise bereits bei den Vegetationsuntersuchungen an den Versuchsdämmen angewendet wurden und nachfolgend erläutert werden.

4.7.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis

Die Entwicklung der Weiden wurde über die Bestimmung der Länge und des Durchmessers an der Stammbasis ermittelt. Die Ergebnisse dieser Erhebungsmethode dienen der Einschätzung der Wuchsleistung und des Entwicklungsverlaufs der Weiden. Wiederholte und längerfristige Aufnahmen eines Pflanzenbestandes können schließlich für Prognosen oder für die Erstellung von Pflegekonzepten herangezogen werden.

Abb. 4.34 Vermessen der Weidenäste (Deutsch-Wagram, 22.09.2009)

4.7.2 Biomasse

Anhand von Biomasseuntersuchungen wird die Menge an organischer Substanz bestimmt. Hierfür wurde die gesamte oberirdische Biomasse eines mit Weiden bepflanzten und eines mit Gräsern und Kräutern begrünten Lysimeters abgeerntet. Die Weiden wurden noch vor Ort vermessen und in Durchmesserklassen eingeteilt. Nach dem Abtrennen der Blätter wurde das Material schließlich für weitere Analysen ins Labor gebracht. Die Gewichtsbestimmung der Biomasse erfolgte nach Trocknung auf Gewichtskonstanz im Trockenschrank bei 105 °C.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen das Abtrennen der Blätter von den Zweigen und die Aufbereitung der erntefrischen Biomasse für die Trocknung im Trockenschrank:

Abb. 4.35 Abtrennen der Blätter von den Zweigen (Deutsch-Wagram, 16.09.2009)

Abb. 4.36 Einteilung in Durchmesserklassen (BOKU, 16.09.2009)

4.7.3 Blattflächenindex

Vor dem Trocknen wurden die abgetrennten Blätter noch für die Bestimmung des Blattflächenindex (BFI oder LAI abgeleitet von Leaf Area Index) herangezogen, der das Verhältnis von der Blattoberfläche zu der Bestandsgrundfläche angibt. Dazu wurde eine repräsentative Anzahl von Blättern aus den unterschiedlichen Durchmesserklassen als Stichproben entnommen und mit einem Scanner eingelesen. Die Analyse der Scans mittels eines Bildbearbeitungsprogrammes ergab schließlich die tatsächliche Blattfläche der Stichprobe. Durch die Kenntnis des Gesamtgewichtes konnte die Gesamtblattfläche des Bestandes hochgerechnet und der BFI bestimmt werden. In Abbildung 4.37 ist der Scanvorgang abgebildet, Abbildung 4.38 zeigt das Scanergebnis einer Stichprobe:

Abb. 4.37 Scanvorgang (BOKU, 23.09.2009)

Abb. 4.38 Gescannte Weidenblätter einer Stichprobe aus Lysimeter 1

4.8 Zeitlicher Ablauf der Untersuchungen

Mai 09	
8.05.	Abdecken des Ausgangsmaterials, Probenentnahme, Einlagerung der Proben in Trockenschrank
12.05.	Einbau der Abflüsse der Lysimeter im Labor
15.05.	Einbau der Abflüsse der Lysimeter im Labor und vor Ort
19.05.	Positionierung der Paletten, Fülllinienmarkierung an Lysimetern, Berechnung der Füllmenge pro Lage
20.05.	Lieferung Drainkies, 2. Lage Paletten, Einbau Drainschicht, Kontrolle der Abflüsse, Lysimeter befüllen und verdichten
22.05.	Lysimeter befüllen und verdichten
31.05.	Lysimeter befüllen und verdichten

Juni 09

5.06.	Lysimeter befüllen und verdichten
09.06.	Lysimeter befüllen und verdichten
10.06.	Ausmessen, Markieren und Bohren der Öffnungen für die Messgeräte, Einbau der Tensiometer-Hüllrohre, Verdichten
12.06.	Einbau Wassergehaltsensoren, Einbau der Tensiometer-Hüllrohre, Lysimeter befüllen und verdichten
15.06.	Einbau Wassergehaltsensoren, Einbau der Tensiometer-Hüllrohre, Lysimeter befüllen und verdichten
18.06.	Abdichten der Hüllrohre und Kabelöffnungen
19.06.	Waagenkalibrierung und Funktionstest der Tensiometer im Labor
22.06.	Einbau Spreitlage (Zuschneiden, Vermessen, Wiegen, Einlegen, Abdecken)
29.06.	Durchsickerungskanister inkl. Anschlüsse, Ansaat Gräser/Kräuter, Abdeckung Null-Lysimeter mit gewaschenem Kies
30.06.	Vorbereitungen Wiegekonstruktion (Zuschnitt, Bohrung, Schweißarbeiten)

Juli 09

01.07.	Waagenkonstruktion Schweißarbeiten
02.07.	Fertigstellung der Waagenkonstruktion
03.07.	Anschlussarbeiten am Datenlogger, Verkabelung (Waagen), Aufbau Wetterstation, Zuschnitt der Unterlagsplatten
08.07.	Vegetationsaufnahmen Sektor 3, Verkabelung Kippwaagen, Installation Windmesser
14.07.	Vegetationsaufnahmen Sektor 9
15.07.	Vegetationsaufnahmen Sektor 9, 11
16.07.	Problembehebung Waagen, Anfertigen der Kippwaagenadapter
20.07.	Vegetationsaufnahmen Sektor 11
21.07.	Problembehebung Waagen, Lysimeter 19 und 20 auf Waagen, Nachsaat Gräser-Kräuter
22.07.	Abdeckung der Lysimeter (Gräser-Kräuter), Anschluss der Kippwaagen
24.07.	Einbau und Anschluss der Tensiometer Lysimeter 19 und 20
29.07.	Einbau und Anschluss der Tensiometer am Damm (Gräser-Kräuter), Bau des Rahmens für Damm-Tensiometer
31.07.	Einbau und Anschluss Tensiometer Lysimeter 18 und Waagenkalibrierung, auf Waage, Befestigung der Kippwaagen

Aug. 09

18.08.	Einbau und Anschluss der restlichen Tensiometer Lysimeter 18-20, Randabdichtung mit Bentonit (Lysimeter 18, 19), Anschluss der neuen Durchsickerungskanister

Sep. 09	
01.09.	Überströmversuche
02.09.	Beirat Präsentation und Überströmversuche
05.09.	Ablassen des Wassers aus Stauversuch an Versuchsdämmen
08.09.	Erweiterung der Stromversorgung (neues Modul, Klemmen),
11.09.	Sicherstellung Stromversorgung Tensiometer, Abflexen der Auflagebereichs an Waage Lysimeter 18
16.09.	Vegetationsaufnahmen (Durchmesser, Länge), Abtrennen der Blätter, Einlagerung in Trockenschrank
22.09.	Vegetationsaufnahmen Lysimeter 1 und 20 (Durchmesser, Länge), Entnahme der Biomasse Lysimeter 1
23.09.	Scannen der Blätter von Lysimeter 1 in Stichproben
24.09.	Vegetationsentnahme Sektor 13
28.09.	Abgrabungen Sektor 13, Wurzelentnahme - Freispülen, Wurzeln abtrennen
29.09.	Wurzeln abtrennen Sektor 13

Okt. 09	
13.10.	Ausbau der Tensiometer (Lysimeter),
30.10.	Wiegen der getrockneten Biomasse (Sektor 13), Dämmung Kippwaagen, Veg.-Aufnahme 17

Tab. 4.2 Zeitlicher Ablauf der Arbeiten in Deutsch-Wagram, 2009

5 Ergebnisse

5.1 Vegetationsentwicklung

Der Entwicklungsverlauf der Vegetation wurde in regelmäßigen Abständen fotografisch dokumentiert. Generell ist festzuhalten, dass sich sowohl die Weiden als auch die Gräser und Kräuter trotz der relativ späten Bepflanzung Ende Juni gut entwickelten, wie auch die nachfolgenden Bilder zeigen.

5.1.1 Weidenspreitlage

Die ersten Weidensprosse begannen bereits wenige Tage nach der Bepflanzung am 22.06.09 zu wachsen. Hierbei sei erwähnt, dass bei einigen der Lysimeter v.a. die Triebe im Randbereich einen deutlichen Entwicklungsvorsprung zeigten. Die folgenden Fotos zeigen die Entwicklung der Weiden zwischen dem 08.07. und dem 22.09.2009.

Abb. 5.1 Weidenspreitlage am 08.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.2 Weidenspreitlage am 16.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.3 Weidenspreitlage am 21.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.4 Weidenspreitlage am 31.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.5 Weidenspreitlage am 01.09.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.6 Weidenspreitlage am 22.09.2009, Deutsch-Wagram

5.1.1.1 Durchmesser/Längen-Verhältnis

In Lysimeter 1 wuchsen insgesamt 305 Jungtriebe bis zu einer maximalen Länge von 77 cm und einem Durchmesser von 4,15 mm heran, in Behälter 20 konnten 316 Jungtriebe bis zu einer maximalen Länge von 88 cm und einem Durchmesser von 4,26 mm gemessen werden. Die folgenden Grafiken zeigen den Zusammenhang zwischen Länge und Durchmesser anhand von Streudiagrammen:

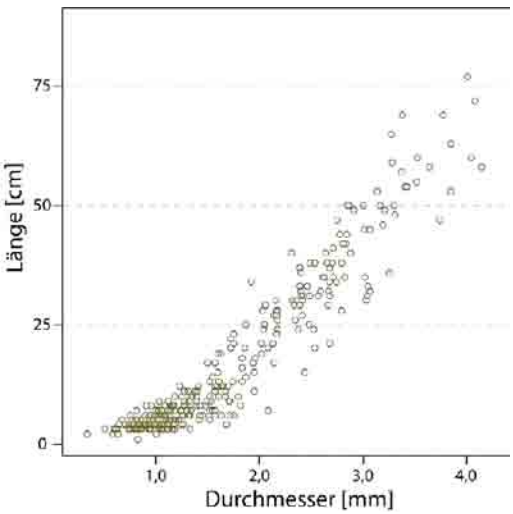

Abb. 5.7 Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidentriebe, Lysimeter 1 Deutsch-Wagram (22.09.09)

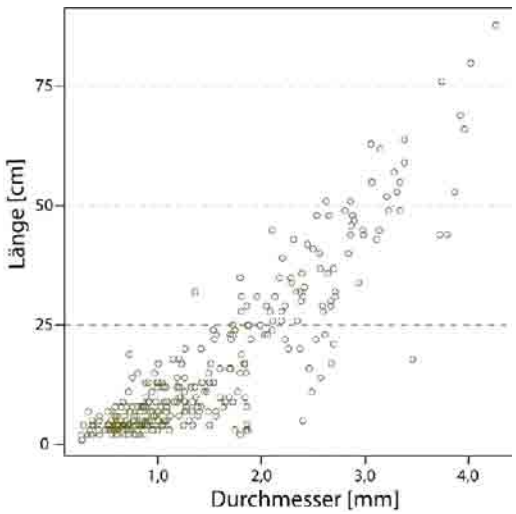

Abb. 5.8 Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidentriebe, Lysimeter 20 Deutsch-Wagram (22.09.09)

Bei der Betrachtung der Grafiken fällt eine Anhäufung der Datenpunkte in den unteren Längen- und Durchmesserbereichen auf. Dies lässt sich durch die relativ kurze Entwicklungszeit von drei Monaten und die hohe Bestandesdichte in den Lysimetern erklären. Die grundsätzlich sehr hohe Wuchsleistung von Salix

purpurea zeigt sich jedoch anhand der Maximalwerte in den Diagrammen. Bei der Darstellung der Messdaten anhand von Boxplot-Diagrammen lässt sich die Verteilung der Längen und Durchmesser rasch ablesen und vergleichen:

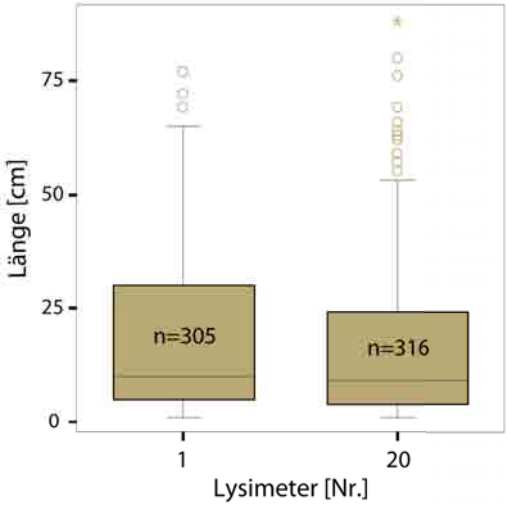

Abb. 5.9 Längenverteilung der Weidenäste, Lysimeter 1 und 20 Deutsch-Wagram (22.09.09)

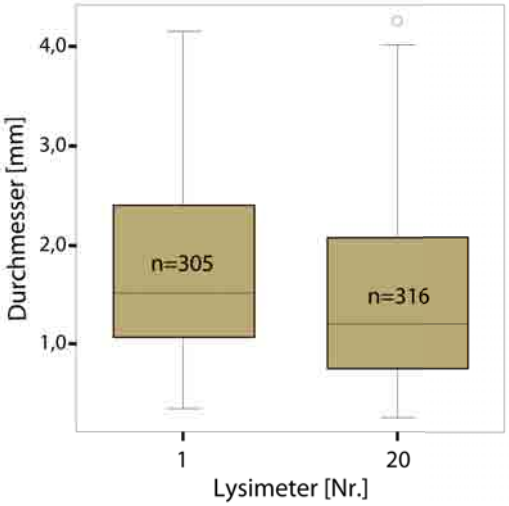

Abb. 5.10 Durchmesserverteilung der Weidenäste Lysimeter 1 und 20 Deutsch-Wagram (22.09.09)

Aus Abbildung 5.9 geht hervor, dass die Längen der Weidenäste unregelmäßig verteilt sind. Der Median liegt in Lysimeter 1 bei 10 cm, in Lysimeter 20 knapp darunter bei 9 cm. Einige wenige Ausreißer, gesehen in Relation zur hohen Gesamtanzahl, sind in beiden Lysimetern vorhanden.

Die Verteilung der Weidendurchmesser zeigt ein ähnliches Bild. Auch hier ist der Großteil der Weidendurchmesser im unteren Größenbereich angesiedelt. Tabelle 5.1 bietet eine zusammenfassende Aufstellung der Messdaten:

	Lysimeter 1		**Lysimeter 20**	
	Länge [cm]	Durchmesser [mm]	Länge [cm]	Durchmesser [mm]
Minimum	1	0,34	1	0,26
Maximum	77	4,15	88	4,26
Mittelwert	17,9	1,74	16	1,47
Median	10	1,42	9	1,20

Tab. 5.1 Statistische Daten der Weidenäste in Lysimeter 1 und 20, Deutsch-Wagram (22.09.09)

5.1.1.2 Biomasse

Die abgetrennte, oberirdische Biomasse der Weiden in Lysimeter 1 wurde im Labor erhoben. Hierzu wurden Durchmesserklassen von 0-1 mm, 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm bzw. 4-5 mm festgesetzt und die Weiden entsprechend aufgeteilt. Neben der Einordnung nach dem Stammdurchmesser wurde die Biomasse weiter in Blätter und Stämme aufgegliedert. Die Ergebnisse aus den Messungen wurden schließlich rechnerisch über die Stammanzahl auf Lysimeter 20 übertragen. Hierfür wurde anhand der Messdaten aus Lysimeter 1 ein Durchschnittswert errechnet, der die Biomasse pro Weidenast und Durchmesserklasse charakterisiert. Dieser Mittelwert diente schließlich als Basis zur Berechnung der Biomasse in Lysimeter 20 anhand der erhobenen Stammanzahl und des jeweiligen Stammdurchmessers.

Das Diagramm in Abbildung 5.11 zeigt das Gewicht der Biomasse differenziert nach den Durchmesserklassen für Lysimeter 1 (gemessen) und 20 (berechnet):

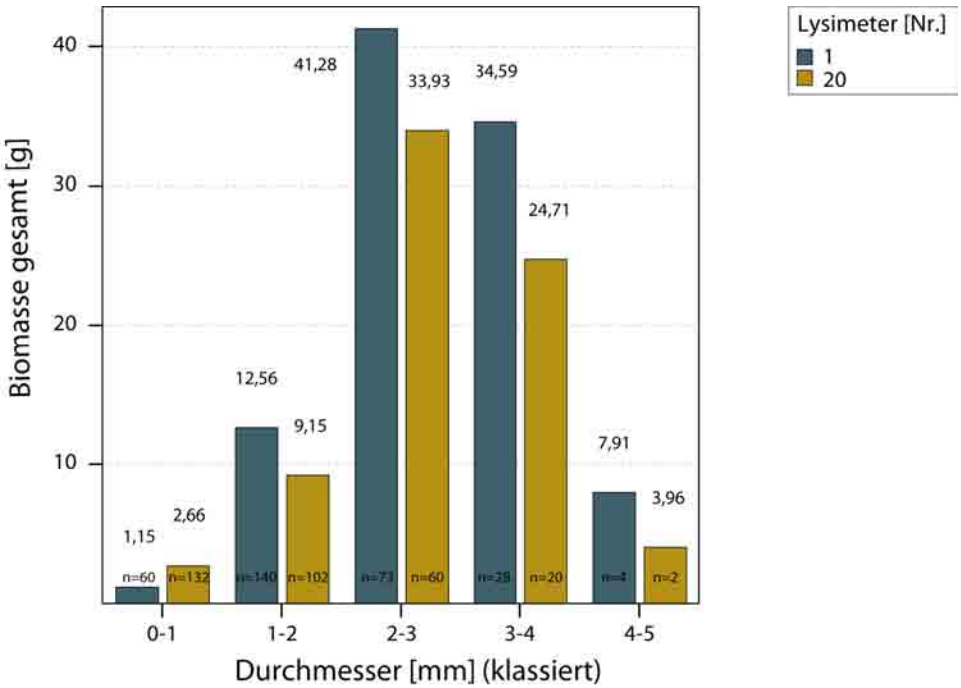

Abb. 5.11 Trockenbiomasse der Weiden in Lysimeter 1 (gemessen) bzw. Lysimeter 20 (berechnet), Deutsch-Wagram, 2009

In der nachfolgenden Tabelle 5.2 sind die Messergebnisse nach Blättern und Stämmen sortiert dargestellt:

Durchmesser-klasse [mm]	Anzahl [Stk.]	Trockenbiomasse Zweige [g]	Trockenbiomasse Blätter [g]	Trockenbiomasse gesamt [g]
0-1	60	0,40	0,75	1,15
1-2	140	4,91	7,65	12,56
2-3	73	26,05	15,23	41,28
3-4	28	25,48	9,11	34,59
4-5	4	5,81	2,10	7,91
Gesamt	305	62,65 (64,3 %)	34,84 (35,7 %)	97,49 (100 %)

Tab. 5.2 Biomassedaten der Weiden in Lysimeter 1, Deutsch-Wagram (22.09.09)

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Stämme bei einem Gesamtgewicht von 97,5 g etwa zwei Drittel (64,3 %) ausmachen. Die Trockenbiomasse der Blätter beläuft sich auf knapp 35 g (≙35,7 %).

5.1.1.3 Blattflächenindex

Die Auswertung der gezogenen Stichproben aus Lysimeter 1 ergab hinsichtlich der relativ kurzen Entwicklungszeit von drei Monaten einen beachtlich hohen Wert von 3,13 (BFI bzw. LAI). Analog zum oben beschriebenen Verfahren wurden die Ergebnisse der Scans herangezogen, um den Blattflächenindex von Lysimeter 20 zu berechnen. Das Ergebnis liegt auf Grund des höheren Stammanteils in den kleineren Durchmesserbereichen bei einem BFI von 2,52.

Bei der Betrachtung der nachstehenden Tabelle muss beachtet werden, dass die Daten aus Berechnungen stammen, die auf den Stichproben basieren.

Ø-Klasse [mm]	Äste [Stk]	Blattanzahl/ Ast [Stk]	Fläche/Blatt [cm²]	Blattfläche gesamt [cm²]	Anteil an Gesamt-blattfläche [%]	Blattfläche/Ast [cm²]
0-1	60	8	0,52	263,2	3,5	4,4
1-2	140	17	0,79	1842,5	24,4	13,2
2-3	73	39	1,13	3199,4	42,4	43,8
3-4	28	52	1,30	1875,1	24,9	67,0
4-5	4	67	1,35	360,6	4,78	90,1

Tab. 5.3 Blattflächenberechnungen – Lysimeter 1, Deutsch-Wagram, 2009

Die errechnete Gesamtblattfläche in Lysimeter 1 beträgt 7 541 cm² bzw. 0,75 m² bei einer Bestandesfläche von 0,24 m². Aus der Tabelle ergibt sich, dass der Großteil (42,4 %) der Gesamtblattfläche den Ästen im mittleren Durchmesser-bereich zwischen 2 und 3 mm zukommt.

5.1.2 Gräser-Kräuter Ansaat

Die Gräser und Kräuter entwickelten sich im Vergleich zu den Weiden nicht ganz so schnell. Bei einigen Lysimetern zeigten sich im weiteren Verlauf auch auffällige Unregelmäßigkeiten in der Verteilung. Dies lässt sich auf den Rückstau des Niederschlagwassers zurückführen, der durch die verminderte Permeabilität des stark verdichteten Bodens hervorgerufen wurde. Somit wurde ein Teil des Saatguts ausgeschwemmt und an einigen Stellen konzentriert abgelagert. Das Ziel einer gut ausgebildeten Grasnarbe wurde schließlich durch eine Nachsaat am 21.07.09 erreicht. Der Verlauf der Entwicklung ist in den nachfolgenden Fotos abgebildet:

Abb. 5.12 Gräser und Kräuter am 08.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.13 Gräser und Kräuter am 16.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.14 Gräser und Kräuter am 28.07.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.15 Gräser und Kräuter am 08.08.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.16 Gräser und Kräuter am 01.09.2009, Deutsch-Wagram

Abb. 5.17 Gräser und Kräuter am 24.09.2009, Deutsch-Wagram

Ähnlich der Weidenspreitlage wurde auch hier am Ende der Vegetationsperiode bei einem Versuchsbehälter die oberirdische Biomasse abgeerntet, getrocknet und gewogen. Die Gesamtbiomasse der Gräser und Kräuter aus Lysimeter 17 beläuft sich auf 29,2 g, was etwa einem Drittel der Biomasse bei den Weiden entspricht.

5.2 Meteorologische Daten

Auf Grund wiederholter technischer Probleme des Datenloggers sind die Messdaten leider lückenhaft. Ein größerer Ausfall ereignete sich vom 04. bis einschließlich 17. September, ein kurzzeitiger Datenverlust war gegen Ende des Augusts zu verzeichnen. Dieser Umstand ist auch in Abbildung 5.18 ersichtlich, in der die gemessenen Temperatur- und Niederschlagswerte zwischen dem 22.07.2009 und dem 30.09.2009 abgebildet sind:

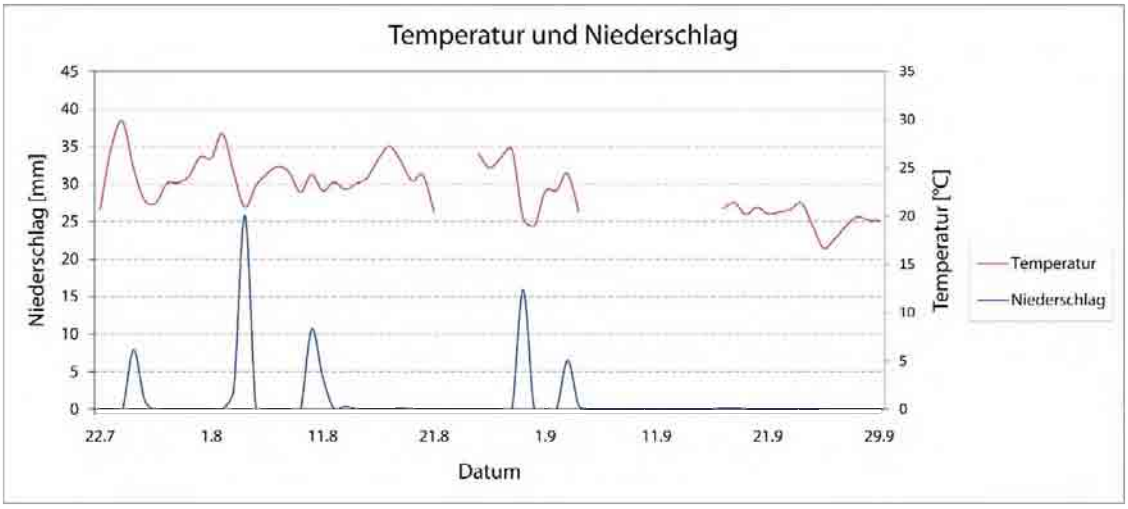

Abb. 5.18 Temperatur und Niederschlagsverteilung in Deutsch-Wagram (Juli-Sept., 2009)

Auf Grund der Ausfälle sind in Tabelle 5.4 die wichtigsten klimatischen Kenngrößen für den Untersuchungszeitraum zusammengefasst. Die Messdaten wurden hierbei aus Aufzeichnungen einer privaten Wetterstation in Deutsch-Wagram übernommen (BERGAUER, 2009):

2009	Niederschlag[mm]	mittlere Temperatur [°C]	mittlere Luftfeuchtigkeit [%]
Juli	91,2	21,6	68,9
August	70,1	21,4	70,4
September	23,2	17,3	73,5

Tab. 5.4 Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Deutsch-Wagram von Juli-September 2009 (BERGAUER, 2009)

5.3 Bodenphysikalische Messergebnisse

Die kontinuierliche Datenerfassung über die Wassergehaltssensoren und Tensiometer ermöglicht es, die hydrogeologischen Verhältnisse und deren Veränderungen über bestimmte Zeitspannen zu beobachten. Der Analysezeitraum dieser Arbeit erstreckt sich von Ende Juli bis Ende September 2009.

5.3.1 Bodenwasserspannung

Die Bodenwasserspannung wurde in mehreren Bodenschichten mit Tensiometern erhoben. Diese wurden speziell in den oberen Schichten des Versuchsbodens platziert um die erwarteten Wirkungen der Vegetation (Wurzeln) möglichst rasch bestimmen zu können. Das Diagramm in Abbildung 5.19 zeigt den Verlauf der Bodenwasserspannung in dem mit Gräsern und Kräutern bepflanzten Lysimeter differenziert nach den unterschiedlichen Messtiefen:

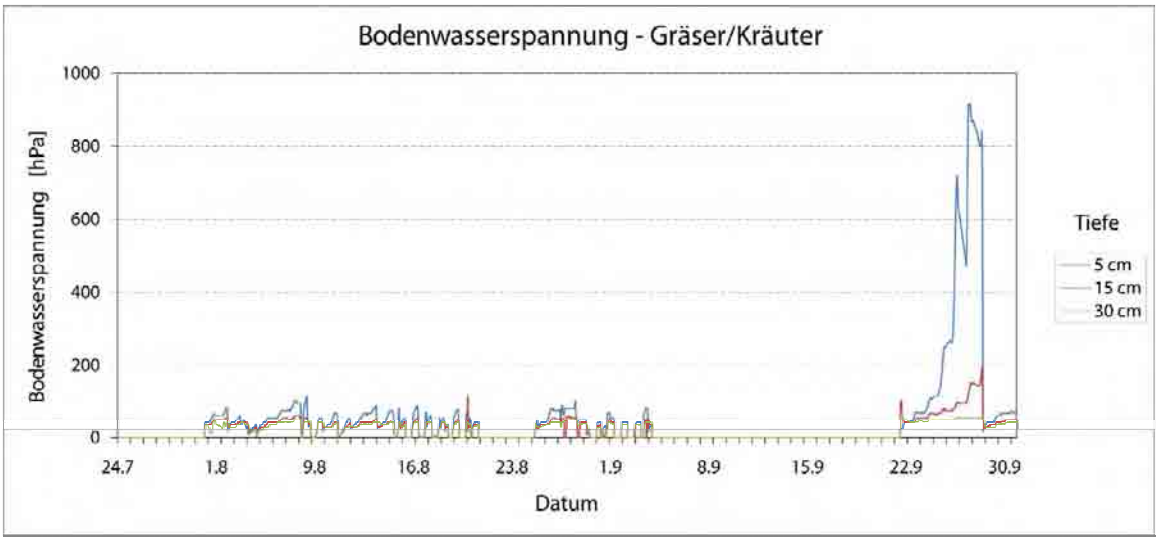

Abb. 5.19 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des Gräser und Kräuter-Bewuchses in Lysimeter 18, Deutsch-Wagram

Man erkennt, dass sich die Spannungskurven bei den Gräsern und Kräutern in allen Messtiefen etwa auf dem gleichen Niveau im Bereich von 0 und 100 hPa bewegen. In der obersten Bodenschicht ist im Vergleich zu den tieferen Schichten eine geringfügig höhere Wasserspannung messbar. Die rhythmischen Schwankungen der Werte sind auf die Bewässerung und Niederschlagsereignisse zurückzuführen.

Hingegen sehr auffallend ist der beachtlicher Anstieg in 5 cm Tiefe gegen Ende September, bei dem die Saugspannungswerte den maximalen Messbereich der verwendeten Tensiometer erreichen. Ein leichter Anstieg der Bodenwasserspannung ist während derselben Zeit auch in 15 cm Tiefe messbar. Daraus lässt ableiten, dass der Einfluss der Gräser- und Kräuterwurzeln etwa drei Monate nach der Ansaat in Bodentiefen bis 15 cm reicht. Der anschließende abrupte Spannungsabfall resultiert aus der intensiven Bewässerung der Lysimeter am 28.09.09.

Die Saugspannungswerte im Weiden-Lysimeter zeigen ein deutlich abweichendes Muster:

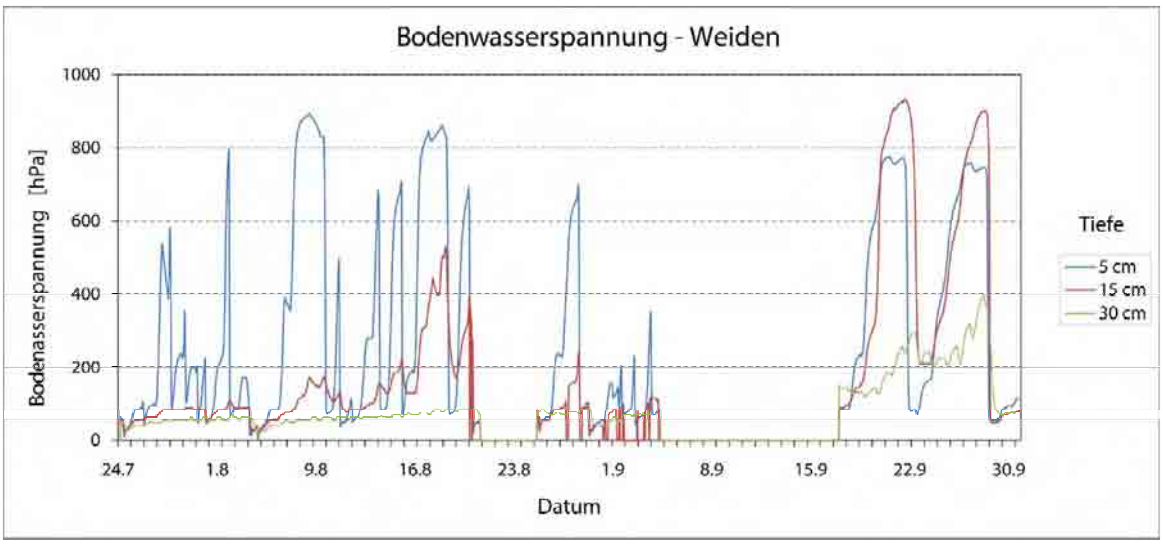

Abb. 5.20 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des Weidenbewuchses in Lysimeter 20, Deutsch-Wagram

Bei den Weiden lassen sich bereits fünf Wochen nach der Bepflanzung erste Reaktionen des Tensiometers in der obersten Bodenschicht messen. Hierbei erreicht die Saugspannung mehrmals sehr hohe Werte zwischen 600 hPa und dem maximalen Messbereich. Wenige Tage später zeigen sich auch erste Veränderungen in 15 cm Messtiefe.

Am Ende der Messperiode sind in 15 cm Tiefe sogar höhere Werte als in der darüber liegenden Bodenschicht messbar. Das Tensiometer in 15 cm Einbautiefe verzeichnete Werte im Grenzbereich der messbaren Saugspannungen. Im weiteren Verlauf kann eine erhöhte Saugspannung bis in eine Tiefe von 30 cm nachgewiesen werden. Im Vergleich zu den Lysimetern mit Bewuchs, registrierten die Messinstrumente im Versuchsbehälter ohne Bewuchs über alle Messtiefen nur geringe Saugspannungsunterschiede:

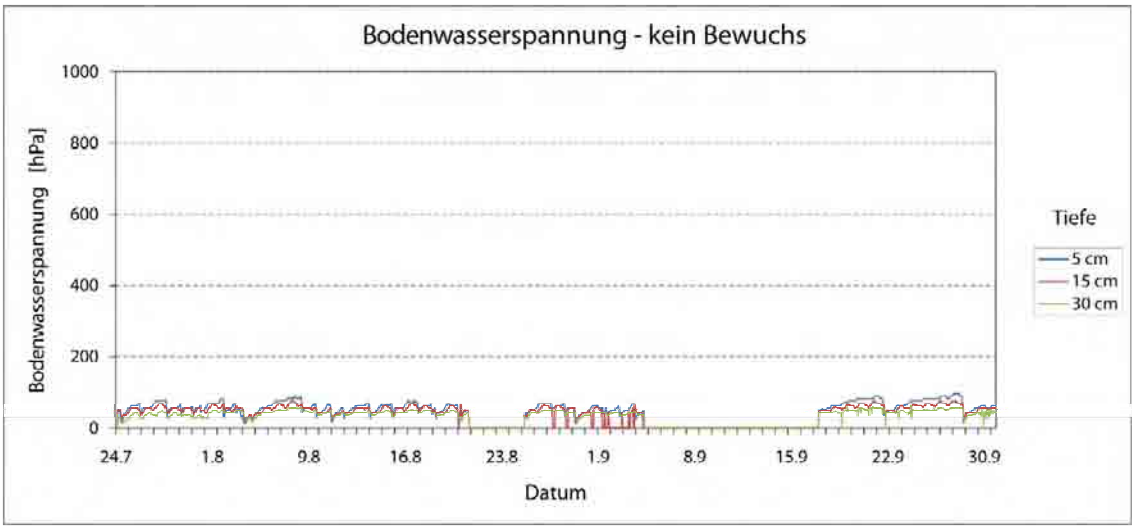

Abb. 5.21 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des unbewachsenen Lysimeter 19, Deutsch-Wagram

Ein direkter Vergleich der Messwerte in 5 cm Tiefe zeigt die nachfolgende Abbildung 5.22:

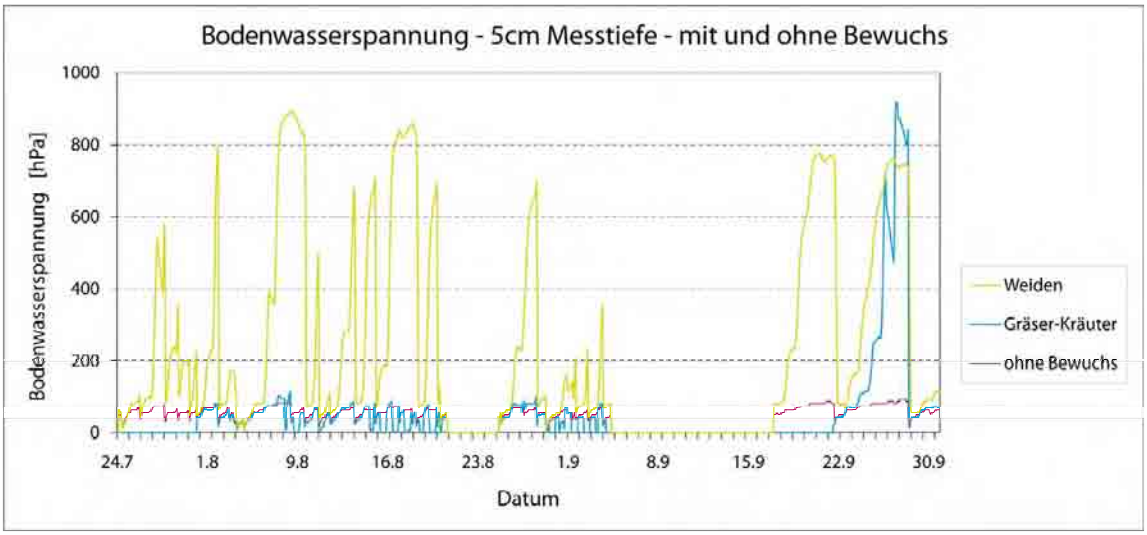

Abb. 5.22 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in 5 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram

Die Grafik verdeutlicht den hohen Anstieg der Saugspannungen bei den Gräsern und Kräutern am Ende des Untersuchungszeitraums. Im Vorfeld sind lediglich bei den Weiden starke Schwankungen erkennbar.

5.3.2 Bodenwassergehalt

Der Bodenwassergehalt wurde bei den drei wägbaren Lysimetern in zwei unterschiedlichen Messtiefen aufgezeichnet. Dabei muss festgehalten werden, dass bislang keine Kalibrierung hinsichtlich des verwendeten Bodens und der Verdichtung erfolgte. Somit sind die Bodenwassergehaltswerte nicht absolut zu sehen und nur relativ untereinander vergleichbar. Die Wassergehaltswerte in 5 cm Bodentiefe sind in der nachfolgenden Abbildung 5.23 dargestellt:

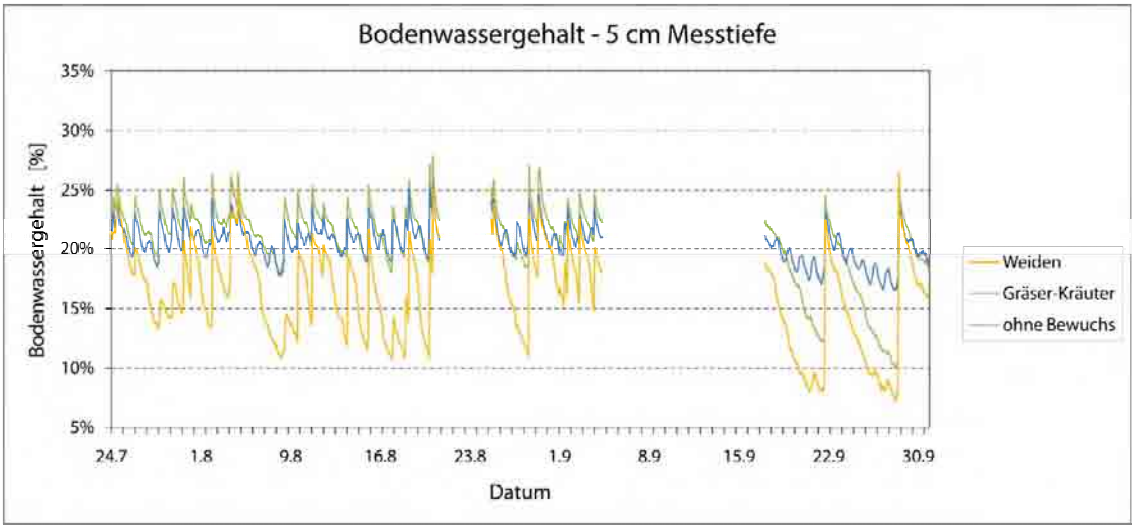

Abb. 5.23 Verlauf der Bodenwassergehalts (24.07.-30.09.09) in 5 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram

Der Verlauf der Messungen zeigt, dass der Bodenwassergehalt bei den Weiden bereits nach kurzer Zeit deutlich niedriger liegt im Vergleich zu den Werten der Gräser und Kräuter bzw. der Nullvariante. Gegen Ende der Versuchsreihe fallen die Unterschiede zwischen den beiden Bepflanzungsformen jedoch relativ gering aus und liegen bei etwa 3 %. Bei der Betrachtung der Messergebnisse in 30 cm Bodentiefe zeigt sich folgender Verlauf:

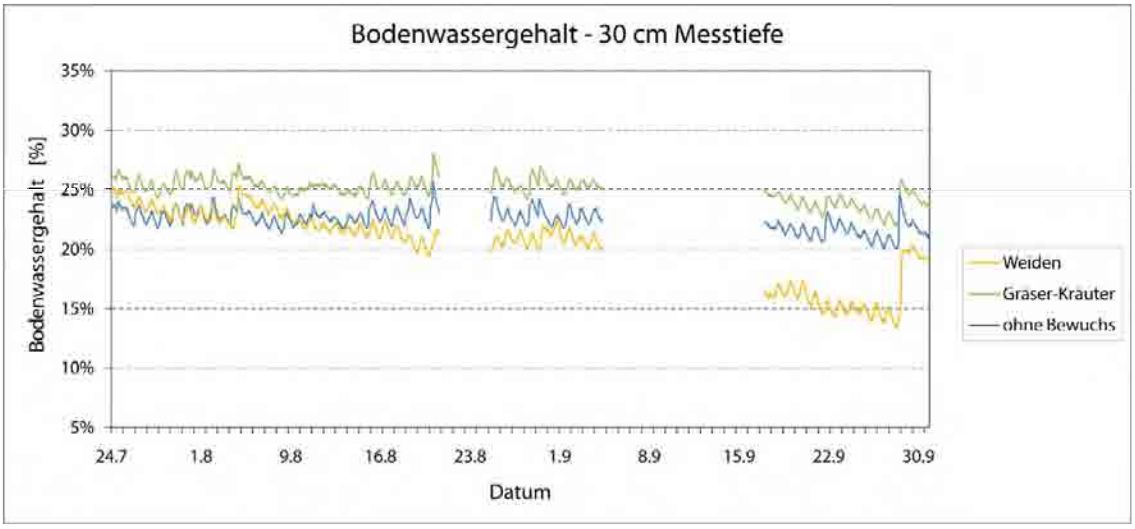

Abb. 5.24 Verlauf der Bodenwassergehalts (24.07.-30.09.09) in 30 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram

In dieser Bodentiefe ist lediglich bei den Weiden im späteren Verlauf der Messperiode ein markanter Einfluss erkennbar. In Bezug auf die Gräser und Kräuter konnte ein Wassergehaltsunterschied von etwa 7 % bestimmt werden.

5.3.3 Bodenwasserspannung und Bodenwassergehalt bei Aufsättigung

Im Laufe der Untersuchungen wurden die Gräser und Kräuter bzw. die Weiden mehrmalig bewässert. Abbildung 5.25 zeigt die Änderungen des Bodenwassergehalts nach der Aufsättigung der Lysimeter am 28.08.2009:

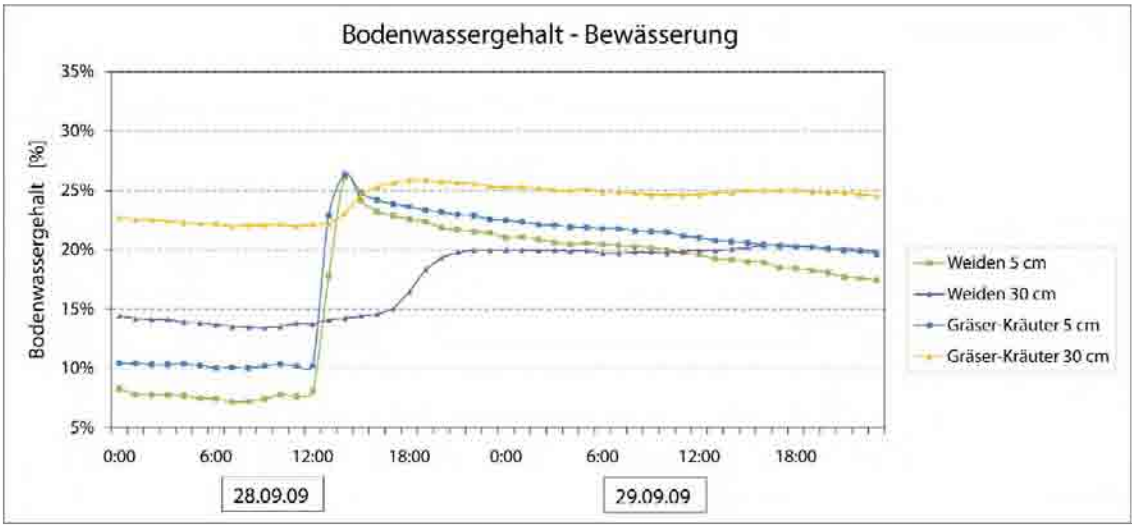

Abb. 5.25 Verlauf des Bodenwassergehalts bei Bewässerung (28.09.-29.09.09) in 5 und 30 cm Messtiefe bei den Weiden bzw. Gräsern und Kräutern, Deutsch-Wagram

Die Abbildung zeigt, dass vor der Bewässerung sehr trockene Bodenverhältnisse vorherrschen. Bei den Weiden bewegt sich der Bodenwassergehalt in 5 cm Messtiefe zwischen 7 und 8 %, bei den Gräsern und Kräutern sind in derselben Messebene Werte um 10 % zu verzeichnen. In 30 cm Tiefe zeigt sich bei den Gräsern und Kräutern ein relativ hoher Wassergehalt, der durch die geringere Bewurzelungstiefe erklärbar ist.

Die Wassergehaltssensoren in der oberen Bodenschicht springen sowohl bei den Weiden als auch bei den Gräsern und Kräutern quasi ohne Verzögerung an und erreichen ein Maximum bei etwa 27 % Wasseranteil im Boden. Man erkennt weiter, dass diese Wassermenge nicht dauerhaft gehalten werden kann. Die Sonden in 30 cm Tiefe reagieren in beiden Lysimetern mit Verzögerung, diese ist jedoch bei den Weiden deutlich stärker ausgebildet.

Aus den Saugspannungsmessungen in Abbildung 5.26 zeigt sich ebenfalls eine verzögerte Reaktion bei den Weiden gegenüber den Gräsern und Kräutern:

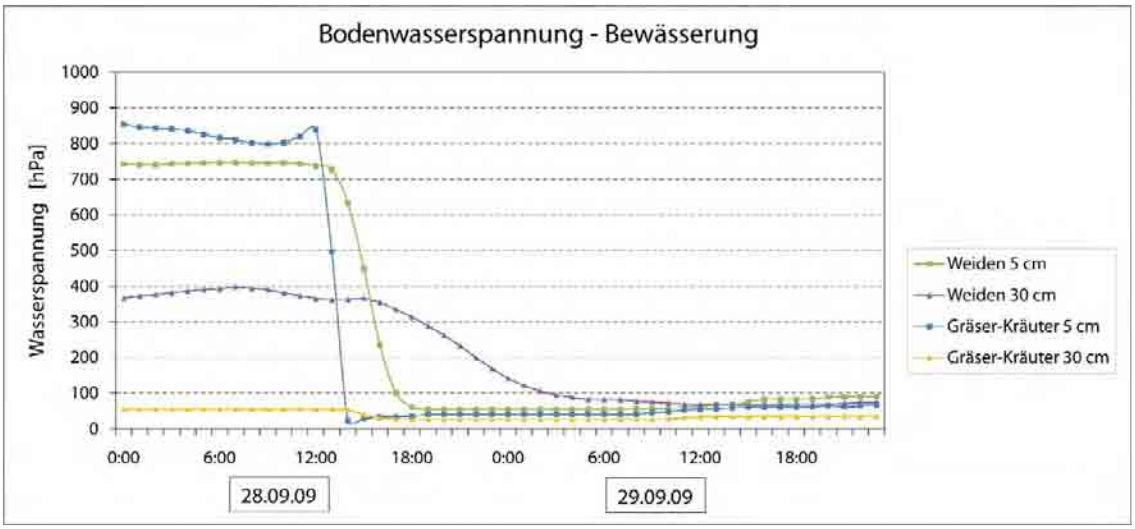

Abb. 5.26 Verlauf der Bodenwasserspannung bei Bewässerung (28.09.-29.09.09) in 5 und 30 cm Messtiefe bei den Weiden bzw. Gräsern und Kräutern, Deutsch-Wagram

5.3.4 Durchsickerung

Mit der Erfassung des Sickerwassers über die Kippzähler kann der zeitliche Verlauf sowie die Menge des durchströmenden Wassers beobachtet werden. Die nachstehende Abbildung 5.27 zeigt die Messungen des Sickerwassers während der gesamten Messperiode, wobei anzumerken ist, dass die Dynamik und die hohe Menge an Sickerwasser auf die großzügige Bewässerung zurückzuführen ist.

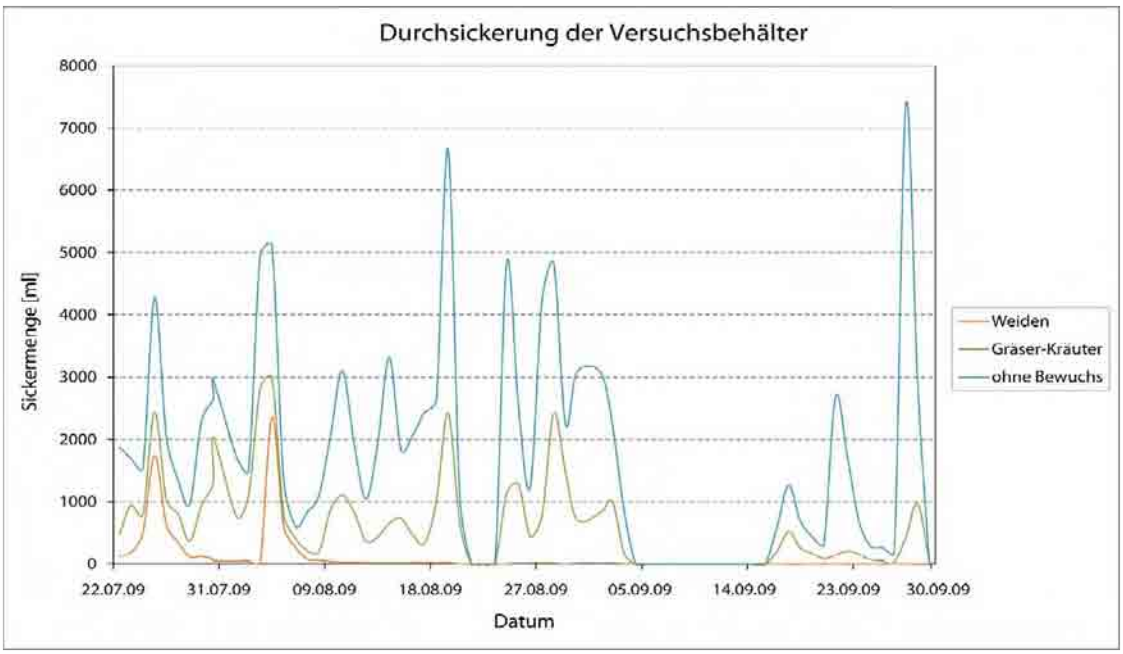

Abb. 5.27 Verlauf der Durchsickerung (24.07.-30.09.09) – Vergleich Weiden/Gräser und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram

Man kann deutlich erkennen, dass trotz der einheitlichen Bewässerung im Lysimeter ohne Bewuchs durchwegs die größten Mengen an Sickerwasser anfallen. Die Unterschiede bei der Durchsickerung der Lysimeter sind vornehmlich auf den geringeren Wassergehalt und die höheren Saugspannungen im Boden der Weiden zurückzuführen, wodurch die Bewegung des Bodenwassers deutlich beeinflusst wird.

Bei den Weiden sind zu Beginn der Messperiode noch größere Mengen an Sickerwasser festzustellen, gegen Ende hin werden trotz weiterer Bewässerung nur noch vereinzelte minimale Sickerwasserflüsse registriert. Die Gräser und Kräuter zeigen bereits nach kurzer Entwicklungszeit Einflüsse auf die Durchsickerung des Bodens, die sich im Laufe der Beobachtungen verstärken.

5.3.5 Evapotranspiration und K_c-Werte

Auf Grund der erwähnten Datenausfälle war es leider nicht möglich, die aktuelle Evapotranspiration ET_a über die gesamte Vegetationsperiode zu bestimmen. Dennoch konnte die Verdunstungsleistung an mehreren Tagen im August und September direkt gemessen werden.

Für die Bestimmung der Referenzverdunstung wurde das Programm ET_0-Calculator verwendet, welches auf der Website der FAO kostenlos zur Verfügung steht. Die Software berechnet die Referenzverdunstung eines Standortes nach der Penman-Monteith Formel (vgl. Abschnitt 3.3.2). Hierzu werden neben Klimadaten

auch Angaben zur geographischen Lage benötigt (Position, Meereshöhe). Wie in Abschnitt 3.3.2.3 beschrieben ist, lässt sich schließlich über die Höhe von ET_a und ET_0 der Pflanzenkoeffizient K_c herleiten.

Tabelle 5.5 zeigt im August gemessene Verdunstungswerte der Weiden unter zusätzlicher Angabe der mittleren Temperatur und der Luftfeuchtigkeit. Weiter ist die an diesen Tagen berechnete Referenzverdunstung bzw. der K_c-Faktor angegeben:

Weiden	ET_a [mm/d]	ET_0 [mm/d]	K_c	Temp. [°C]	Luftfeuchte [%]
11.8.09	5,35	4,4	1,2	22,6	72,5
12.8.09	7,4	5,1	1,5	23,6	64,8
14.8.09	8,17	6,0	1,4	23,4	61,5
15.8.09	8,15	7,2	1,1	24,0	59,8
16.8.09	8,81	7,7	1,1	25,8	61,9
18.8.09	9,93	6,4	1,6	25,8	56,8
19.8.09	9,09	7,4	1,2	23,8	53,9
20.8.09	10,82	7,4	1,5	24,1	54,5
26.8.09	8,65	6,9	1,3	24,9	60,3
27.8.09	9,76	6,9	1,4	26,1	62,2
28.8.09	10,17	8,0	1,3	26,8	59,4
30.8.09	8,26	5,6	1,5	19,1	59,5

Tab. 5.5 Die aktuelle Evapotranspiration ET_a und der Pflanzenkoeffizient K_c der Weiden, August 2009, Deutsch-Wagram

Aus der Tabelle geht hervor, dass die Verdunstung der Weiden am 20.08.2009 mit 10,82 mm den höchsten Wert erreicht. In Bezug zur Referenzverdunstung von 7,4 mm ergibt sich ein K_c-Wert von 1,5. Die Höhe der Verdunstung lässt sich neben der relativ geringen Luftfeuchtigkeit auch durch die Bewässerung an diesem Tag erklären, wodurch eine ausreichende Wasserversorgung der Weiden gewährleistet war. Der höchste K_c-Wert dieser Messreihe konnte am 18.08.2009 mit 1,6 bestimmt werden. Die Durchschnittswerte in der zweiten Augusthälfte liegen bei 9,29 mm/d (ET_a) bzw. 1,33 (K_c). GUIDI et al. (2007) bestimmte für einjährige Silberweiden in einem vergleichbaren Versuch bzw. Zeitraum einen K_c-Wert von 1,25.

Die Verdunstungsleistung der Gräser und Kräuter konnte auf Grund eines Defektes an der Wägekonstruktion nur an einigen Tagen im September bestimmt werden. Die Tabelle 5.6 zeigt die erhobenen Verdunstungswerte der Gräser und Kräuter bzw. der Weiden im Vergleich:

	Weiden		Gräser-Kräuter				
	ET_a [mm/d]	K_c	ET_a [mm/d]	K_c	ET_0 [mm/d]	Temp. [°C]	Luftfeuchte [%]
18.9.09	4,95	1,2	2,4	0,6	4,3	21,4	69,5
19.9.09	6,71	1,5	4,0	0,9	4,6	20,2	66,9
20.9.09	5,79	1,1	3,2	0,6	5,1	20,9	63,8
24.9.09	5,44	1,1	4,8	1,0	4,9	21,4	62,1
27.9.09	4,27	0,8	3,3	0,7	5,1	17,7	60,0
29.9.09	5,39	1,2	4,7	1,0	4,5	19,9	58,0

Tab. 5.6 Die aktuelle Evapotranspiration ET_a und der Pflanzenkoeffizient K_c der Weiden bzw. Gräser-Kräuter, September 2009, Deutsch-Wagram

Im Zeitraum des 18.09.2009 bis zum 29.09.2009 liegen die Verdunstungswerte der Weiden deutlich unter den Werten vom August. Der Höchstwert liegt bei 6,71 mm, gemessen am 19.09.2009. An diesem Tag wurde auch der höchste K_c-Wert mit 1,5 registriert. Der Mittelwert dieser Tage liegt bei 1,15 (K_c).

Die Verdunstung der Gräser und Kräuter liegt im Vergleichszeitraum zwischen 2,4 bis 4,8 mm/Tag. Aus der Tabelle geht zudem hervor, dass die K_c-Werte der Gräser und Kräuter zum Teil deutlich unter dem Niveau der Gras-Referenzverdunstung liegen. Der mittlere Wert der Messtage liegt hier bei 0,8 (K_c).

6 Diskussion und Ausblick

Trotz des Umstandes, dass die Weiden bzw. die Gräser und Kräuter über einen relativ kurzen Zeitraum und in einem sehr frühen Entwicklungsstadium beobachtet wurden, konnte dennoch eine große Zahl an verschiedenen Daten erhoben werden. Die wichtigsten Ergebnisse als auch die Methodik der Untersuchungen werden im Folgenden diskutiert.

Die Untersuchungen zeigen, dass die Weiden bereits vier bis fünf Wochen nach der Bepflanzung deutlich messbare Wirkungen auf die zentralen Größen des Bodenwasserhaushalts aufweisen. In direktem Vergleich zu der Begrünung mit Gräsern und Kräutern konnten durchwegs früher eintretende und stärkere Auswirkungen auf den Bodenwassergehalt, die Bodenwasserspannung und die Durchsickerung des Bodens verzeichnet werden. Weiter konnten die Wurzeln der Weiden tiefere Bodenschichten erschließen.

Durch den Einsatz der Lysimetertechnik wurde zudem die Möglichkeit geschaffen, die Verdunstungsleistung der Pflanzenbestände direkt zu messen und miteinander zu vergleichen. Über die Analyse der lysimetrischen Messdaten konnten bei drei Monate jungen Weiden hohe Verdunstungswerte bis zu 10,8 mm pro Tag gemessen werden. Die maximale Verdunstungsleistung bei den Gräsern und Kräutern lag indessen bei 4,8 mm pro Tag. Ungeachtet der Tatsache, dass derartige Verdunstungsmessungen ausschließlich mittels Lysimetern möglich sind, ist die Planung, Errichtung und Unterhaltung einer Lysimeteranlage mit sehr hohem technischem und zeitlichem Aufwand verbunden. Auf Grund mehrerer Datenausfälle konnten die Erhebungen leider nicht im geplanten Ausmaß stattfinden.

Die in den Zielen dieser Arbeit angeführte Frage nach dem Einfluss der Weiden auf die Standsicherheit eines Hochwasserschutzdamms, lässt sich aus den Messergebnissen nicht direkt beantworten. Für die Beantwortung dieser Frage sind weitere Untersuchungen notwendig, im Rahmen derer die längerfristigen Wirkungen von Weidenbeständen auf den Bodenwasserhaushalt erforscht werden. Die Ergebnisse aus dieser Arbeit bestätigen zumindest das hohe Potential der Weiden zur Entwässerung und somit zur Stabilisierung des Bodens.

Abschließend sei noch erwähnt, dass die Untersuchungen dieser Diplomarbeit fortgeführt und um weiterführende Untersuchungen wie z.B. Scherversuche und ausführliche Wurzelanalysen ergänzt werden.

7 Literatur

ACHTNICH, W. (1980): Bewässerungslandbau. Stuttgart: Ulmer Verlag.

ALLEN, R. et al. (1998): Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm (25.03.2010).

BAUMHAUER, R. et al. (2008): Physische Geographie 2. Klima-, Hydro-, Boden-, Vegetationsgeographie. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

BENTZ, A.; MARTINI, H.J. (1969): Lehrbuch der angewandten Geologie, Band II, Teil 2. Stuttgart: Enke Verlag.

BERGAUER, T (2009): Klimadaten Deutsch-Wagram. www.bergauer.priv.at/toni/dwklima.htm (22.03.2010).

BORGWARDT, S. (2000): Bodenverdichtung: Grundlagen, Geräte, Prüfverfahren. Landsberg am Lech: Moderne Industrie.

BRECHTEL, H. (1990): Interzeption. Lehrbuch der Hydrologie, Band I, Allgemeine Hydrologie. Stuttgart: Borntraeger Verlag.

BRECHTEL, H.M.; HAMMES, W. (1986): Der Einfluss der Vegetation auf den Bodenwasserhaushalt unter besonderer Berücksichtigung von Fragen der Bodenkonsistenz auf Böschungen und Hängen. In: Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V., Aachen: Sepia Verlag, 108-133.

BROCKHAUS (2000): Der Brockhaus in fünf Bänden, 9. neu bearbeitete Auflage, Leipzig: F. A. Brockhaus GmbH (Hrsg.).

DIN 19712 (1997): Flussdeiche. Deutsches Institut für Normung e.V.

DIN 4220 (2008): Bodenkundliche Standortbeurteilung - Kennzeichnung, Klassifizierung und Ableitung von Bodenkennwerten (normative und nominale Skalierungen). Deutsches Institut für Normung e.V.

DVWK 238 (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 238. Bonn: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V.

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. Stuttgart: Ulmer Verlag.

FIEDLER, H.J. (2001): Böden und Bodenfunktionen: in Ökosystemen, Landschaften und Ballungsgebieten. Renningen: Expert Verlag.

FLORINETH, F. (2004): Pflanzen statt Beton: Handbuch zur Ingenieurbiologie und Vegetationstechnik. Berlin-Hannover: Patzer Verlag.

GUIDI, W.; PICCIONI, E.; BONARI, E. (2008): Evapotranspiration and crop coefficient of poplar and willow short-rotation coppice used as vegetation filter. Pisa, Italy: Land Lab.

HARTGE, K.H; HORN, R. (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden: Praxis, Messmethoden, Auswertung, 4. vollständig überarbeitete Auflage, Stuttgart: Schweizerbart Verlag.

HASELSTEINER, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. München: Techn. Univ., Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft im Institut für Wasserwesen.

HINTERMAIER-ERHARD, G.; ZECH, W. (1997): Wörterbuch der Bodenkunde. Stuttgart: Enke Verlag.

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. Wien: Eigenverlag des Arbeitsbereiches Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Institut für Landschaftsplanung und Ingenieurbiologie, Universität für Bodenkultur.

KATZENBACH, R.; WERNER, A. (2007): Erhöhung der Standsicherheit von Deichen und Dämmen durch Bewuchs. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften.

KRAYCHNIKOVA, D. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Überströmungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

KRÖMER, I.; HACKER, E. (1999): Die DIN 19712: 1997-11 „Flussdeiche“. In: Flussdeiche und Flussdämme – Bewuchs und Standsicherheit, Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e. V., Aachen: Pflug und Hacker (Hrsg.), 447-476.

KUNTZE, H. et al. (1994): Bodenkunde, 5. neubearbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart: Ulmer Verlag.

MARTIN, P.J., STEPHENS, W. (2005): Willow growth in response to nutrients and moisture on a clay landfill cap soil, II, Water use. Orkney, Scotland: Agronomy Institute.

MEISSNER, R. et al. (2009): Accuracy of waterflux measuring with a passive-wick water sampler in comparison to a high-precision gravitation lysimeter. In: Bericht zur 13. Gumpensteiner Lysimetertagung: Lysimeter – Perspektiven in Forschung und Anwendung, Irdning: Lehr- und Forschungszentrum für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (LFZ) (Hrsg.), 21-25.

MONTEITH, J.L. (1965): Evaporation and Environment. In: The state and movement of water in living organisms, 19. Symposium Society for Experimental Biology, Cambridge: University Press, 205-234.

ÖNORM B4412 (1974): Erd- und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Korngrößenverteilung. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

ÖNORM B4418 (1981): Erd- und Grundbau, Untersuchungen von Bodenproben, Proctorversuch. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

PFLUG, W. (1999): Flußdeiche und Flußdämme, Bewuchs und Standsicherheit - eine Einführung in die Jahrestagung 1985 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie in Regensburg. In: Flussdeiche und Flussdämme – Bewuchs und Standsicherheit, Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e. V., Aachen: Pflug und Hacker (Hrsg.), 15-18.

PREGL, O. (2000): Handbuch der Geotechnik: Band 2. Wien: Eigenverlag des Instituts für Geotechnik, Univ. f. Bodenkultur.

RAHARDJO, H. (2007): Der Einfluss von Regen auf die Scherfestigkeit eines Bodens. In: Bautechnik, Volume 84, Heft 5. Berlin: Ernst & Sohn Verlag (Hrsg.), 346-350. Online verfügbar unter: doi:10.1002/bate.200790095 (25.03.2010).

RAJIC, F. (2009): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Vegetationsentwicklung am Überströmungsdamm in Deutsch-Wagram (NÖ). Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.

SCHEFFER, F. et al. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Auflage, Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

SCHIECHTL, H.M. (1985): Pflanzen als Mittel zur Bodenstabilisierung. In: Wurzelwerk und Standsicherheit von Böschungen und Hängen, Jahrbuch 2 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e.V. Aachen: Sepia Verlag, 50-62.

SCHÖNIGER, M.; DIETRICH, J. (2010): Hydrologie. www.hydroskript.de (19.03.2010).

SCHRÖDER, D. (1992): Bodenkunde in Stichworten. 5. revidierte und erweiterte Auflage von BLUM, W. E. H, Berlin: Bornträger.

SEETHALER, L. (1999): Wurzelausbreitung von Gehölzen auf Flussdeichen. In: Flussdeiche und Flussdämme – Bewuchs und Standsicherheit, Jahrbuch 4 der Gesellschaft für Ingenieurbiologie e. V. Aachen: Pflug und Hacker (Hrsg.), 215-232.

SOOS, P. (1980): Eigenschaften von Boden und Fels - Ihre Ermittlung im Labor. In: Grundbau-Taschenbuch, 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn Verlag (Hrsg.), 123-218. Online verfügbar unter: doi:10.1002/9783433600221 .ch3 (28.03.2010).

SWEENEY, D.J. (1982): Some in situ soil suction measurements in Hong Kong´s residual soil slopes. In: Proceedings of the 7th Southeast Asian Geotechnical Conference, Hong Kong, 91-106.

UMS GmbH (Hrsg.) (2010): UMS Katalog Version 2.0. www.ums-muc.de/fileadmin/files/Content/Katalog/UMS%20Katalog-DEU-HQ-V2.pdf (19.03.2010).

WARDA, H.D. (2002): Das große Buch der Garten- und Landschaftsgehölze. Bad Zwischenahn: Bruns Pflanzen Export GmbH.

8 Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1 Körnungssummenkurven 11

Abb. 3.2 Körnungsdreieck nach DIN 4220 12

Abb. 3.3 Proctorkurve (nach SOOS, 1980) 15

Abb. 3.4 Einteilung des Bodenwasser (nach KUNTZE et al., 1994) 17

Abb. 3.5 Bindungsformen des Haftwassers (nach KUNTZE et al., 1994) 18

Abb. 3.6 Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung (nach SCHEFFER et al., 2002) 21

Abb. 3.7 Illustration der Darcy Gleichung (nach HINTERMAIER-ERHARD und ZECH, 1997) 23

Abb. 3.8 k_f-Werte nach Bodenarten (nach BENTZ und MARTINI, 1969) 24

Abb. 3.9 System Boden-Pflanze-Atmosphäre (nach BRECHTEL und HAMMES, 1986) 24

Abb. 3.10 Schema eines Lysimeters (nach MEISSNER et al., 2007) 26

Abb. 3.11 K_c-Werte einiger Nutzpflanzen (nach ALLEN et al., 1998) 30

Abb. 4.1 Anordnung und Einteilung der Lysimeter, Versuchsanlage Deutsch-Wagram, 2009 33

Abb. 4.2 Versuchsbehälter auf Euro-Paletten (Deutsch-Wagram, 20.05.2009) 34

Abb. 4.3 Abflussvorrichtung der Versuchsbehälter (Deutsch-Wagram, 20.05.2009) 34

Abb. 4.4 Markierungen und Drainschicht der Versuchsbehälter (Deutsch-Wagram, 20.05.2009) 35

Abb. 4.5 Schichtaufbau des Bodens in den Versuchsbehältern, Deutsch-Wagram, 2009 35

Abb. 4.6 Körnungslinien des Bodenmaterials für die Versuchsdämme in Deutsch-Wagram, 2008 (10 Materialproben) 36

Abb. 4.7 Proctorkurve des Bodenmaterials für die Versuchsdämme in Deutsch-Wagram, 2007 37

Abb. 4.8 Abwägen des Bodenmaterials (Deutsch-Wagram, 15.06.2009) 38

Abb. 4.9 Einbaumaterial unverdichtet (Deutsch-Wagram, 15.06.2009) 38

Abb. 4.10 Lastplatte und verdichteter Boden (Deutsch-Wagram, 15.06.2009) 38

Abb. 4.11 Verdichtungstätigkeit unter Mithilfe von Walter Lammeranner (links) (Deutsch-Wagram, 15.06.2009) 38

Abb. 4.12 Eingebaute Messtechnik (Lysimeter 18-20), Deutsch-Wagram, 2009 39
Abb. 4.13 TDR-Sonde (Deutsch-Wagram, 12.06.2009) 40
Abb. 4.14 Einbau der TDR-Sonde (Deutsch-Wagram, 12.06.2009) 40
Abb. 4.15 Tensiometer T4 (UMS GmbH, 2010) 40
Abb. 4.16 Hüllrohr und Tensiometerspitze (Deutsch-Wagram, 10.06.2009) 41
Abb. 4.17 Lysimeter mit installiertenTensiometern (Deutsch-Wagram, 10.06.2009) 41
Abb. 4.18 Kippzähler für die Sickerwassermessung (Deutsch-Wagram, 08.07.2009) 42
Abb. 4.19 Anschlussschläuche mit Adapter (Deutsch-Wagram, 08.07.2009) 42
Abb. 4.20 Wiegezelle (Deutsch-Wagram, 16.07.2009) 42
Abb. 4.21 Rahmenkonstruktion für die Wiegezelle der Lysimeter (BOKU, 02.07.2009) 42
Abb. 4.22 Wetterstation (Deutsch-Wagram, 03.07.2009) 43
Abb. 4.23 Einrichtung des Datenloggers (Deutsch-Wagram, 03.07.2009) 43
Abb. 4.24 Niederschlagsmesser (Deutsch-Wagram, 03.07.2009) 44
Abb. 4.25 Installation der Messgeräte durch Walter Lammeranner und Friedrich Zott (Deutsch-Wagram, 03.07.2009) 44
Abb. 4.26 Windmessgerät (Deutsch-Wagram, 16.07.2009) 44
Abb. 4.27 Strahlungssensor (Deutsch-Wagram, 16.07.2009) 45
Abb. 4.28 Weidenäste mit Wurzelansätzen (Deutsch-Wagram, 22.06.2009) 46
Abb. 4.29 Zuschnitt der Weidenäste – Elke Ebner und Walter Lammeranner (Deutsch-Wagram, 22.06.2009) 46
Abb. 4.30 Eingelegte Weidenäste (Deutsch-Wagram, 22.06.2009) 46
Abb. 4.31 Aufbringen der Humusschicht (Deutsch-Wagram, 22.06.2009) 46
Abb. 4.32 Ausbringen des Saatguts (Deutsch-Wagram, 29.06.2009) 47
Abb. 4.33 Zustand nach der Ansaat (Deutsch-Wagram, 29.06.2009) 47
Abb. 4.34 Vermessen der Weidenäste (Deutsch-Wagram, 22.09.2009) 49
Abb. 4.35 Abtrennen der Blätter von den Zweigen (Deutsch-Wagram, 16.09.2009) 49
Abb. 4.36 Einteilung in Durchmesserklassen (BOKU, 16.09.2009) 49
Abb. 4.37 Scanvorgang (BOKU, 23.09.2009) 50
Abb. 4.38 Gescannte Weidenblätter einer Stichprobe aus Lysimeter 1 50
Abb. 5.1 Weidenspreitlage am 08.07.2009, Deutsch-Wagram 53

Abb. 5.2 Weidenspreitlage am 16.07.2009, Deutsch-Wagram 53
Abb. 5.3 Weidenspreitlage am 21.07.2009, Deutsch-Wagram 53
Abb. 5.4 Weidenspreitlage am 31.07.2009, Deutsch-Wagram 53
Abb. 5.5 Weidenspreitlage am 01.09.2009, Deutsch-Wagram 54
Abb. 5.6 Weidenspreitlage am 22.09.2009, Deutsch-Wagram 54
Abb. 5.7 Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidentriebe, Lysimeter 1, Deutsch-Wagram (22.09.09) 54
Abb. 5.8 Durchmesser/Längen-Verhältnis der Weidentriebe, Lysimeter 20, Deutsch-Wagram (22.09.09) 54
Abb. 5.9 Längenverteilung der Weidenäste, Lysimeter 1 und 20 Deutsch-Wagram (22.09.09) 55
Abb. 5.10 Durchmesserverteilung der Weidenäste Lysimeter 1 und 20 Deutsch-Wagram (22.09.09) 55
Abb. 5.11 Trockenbiomasse der Weiden in Lysimeter 1 (gemessen) bzw. Lysimeter 20 (berechnet), Deutsch-Wagram, 2009 56
Abb. 5.12 Gräser und Kräuter am 08.07.2009, Deutsch-Wagram 58
Abb. 5.13 Gräser und Kräuter am 16.07.2009, Deutsch-Wagram 58
Abb. 5.14 Gräser und Kräuter am 28.07.2009, Deutsch-Wagram 58
Abb. 5.15 Gräser und Kräuter am 08.08.2009, Deutsch-Wagram 58
Abb. 5.16 Gräser und Kräuter am 01.09.2009, Deutsch-Wagram 59
Abb. 5.17 Gräser und Kräuter am 24.09.2009, Deutsch-Wagram 59
Abb. 5.18 Temperatur und Niederschlagsverteilung in Deutsch-Wagram (Juli-Sept., 2009) 59
Abb. 5.19 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des Gräser und Kräuter-Bewuchses in Lysimeter 18, Deutsch-Wagram 60
Abb. 5.20 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des Weidenbewuchses in Lysimeter 20, Deutsch-Wagram 61
Abb. 5.21 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in den verschiedenen Messtiefen des unbewachsenen Lysimeter 19, Deutsch-Wagram 62
Abb. 5.22 Verlauf der Bodenwasserspannung (24.07.-30.09.09) in 5 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram 62

Abb. 5.23 Verlauf der Bodenwassergehalts (24.07.-30.09.09) in 5 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram....63

Abb. 5.24 Verlauf der Bodenwassergehalts (24.07.-30.09.09) in 30 cm Messtiefe, Vergleich Weiden/Gräsern und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram....64

Abb. 5.25 Verlauf des Bodenwassergehalts bei Bewässerung (28.09.-29.09.09) in 5 und 30 cm Messtiefe bei den Weiden bzw. Gräsern und Kräutern, Deutsch-Wagram....64

Abb. 5.26 Verlauf der Bodenwasserspannung bei Bewässerung (28.09.-29.09.09) in 5 und 30 cm Messtiefe bei den Weiden bzw. Gräsern und Kräutern, Deutsch-Wagram....65

Abb. 5.27 Verlauf der Durchsickerung (24.07.-30.09.09) – Vergleich Weiden/Gräser und Kräuter/kein Bewuchs, Deutsch-Wagram....66

9 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1 Einteilung und Bezeichnung der Kornfraktionen (nach SCHRÖDER, 1992) 10

Tab. 3.2 Beziehung zwischen Kornfraktion, Partikelzahl und spezif. Oberfläche (SCHRÖDER, 1992) 10

Tab. 3.3 Porenvolumen und Porenziffer verschiedener Bodenarten (SCHEFFER et al., 2002) 13

Tab. 3.4 Einteilung der Porengröße und Anteile der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen (nach SCHEFFER et al., 2002) 14

Tab. 3.5 Umrechnungstabelle pF Wert – hPa (nach KUNTZE et al., 1994)....20

Tab. 4.1 Saatgutmischung für die Versuchsbehälter in Deutsch-Wagram, 2009....48

Tab. 4.2 Zeitlicher Ablauf der Arbeiten in Deutsch-Wagram, 2009....50

Tab. 5.1 Statistische Daten der Weidenäste in Lysimeter 1 und 20, Deutsch-Wagram (22.09.09)....55

Tab. 5.2 Biomassedaten der Weiden in Lysimeter 1, Deutsch-Wagram (22.09.09)....57

Tab. 5.3 Blattflächenberechnungen – Lysimeter 1, Deutsch-Wagram, 2009....57

Tab. 5.4 Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit in Deutsch-Wagram von Juli-September 2009 (BERGAUER, 2009)....60

Tab. 5.5 Die aktuelle Evapotranspiration ET_a und der Pflanzenkoeffizient K_c der Weiden, August 2009, Deutsch-Wagram 67

Tab. 5.6 Die aktuelle Evapotranspiration ET_a und der Pflanzenkoeffizient K_c der Weiden bzw. Gräser-Kräuter, September 2009, Deutsch-Wagram....68

10 Anhang

– Verwendete Materialmengen für den Bodenaufbau der Lysimeter unter der Angabe der jeweils erreichten Trockendichte ρd:

	Lys. 1	Lys. 2	Lys. 3	Lys. 4	Lys. 5	Lys. 6	Lys. 7	Lys. 8	Lys. 9	Lys. 10
Materialmenge [g]	360.000	362.400	355.350	364.050	348.300	365.500	362.400	362.400	355.350	362.400
Trockendichte ρd	1,97	1,98	1,94	1,99	1,90	2,00	1,98	1,98	1,94	1,98

	Lys. 11	Lys. 12	Lys. 13	Lys. 14	Lys. 15	Lys. 16	Lys. 17	Lys. 18	Lys. 19	Lys. 20
Materialmenge [g]	365.400	362.400	364.400	355.400	362.400	358.350	362.400	356.350	356.350	356.350
Trockendichte ρd	1,99	1,98	1,99	1,94	1,98	1,96	1,98	1,95	1,95	1,95

– Vermessungsdaten der in Lysimeter 20 eingelegten Weidenäste:

Versuchsbehälter 20					
Nr.	**Länge [cm]**	**Ø max [mm]**	**Ø min [mm]**	**Ø mean [mm]**	**Gewicht [g]**
1	21,5	12,71	12,1	12,41	25,63
2	27	9,54	8,69	9,12	16,95
3	31,5	10,07	9,67	9,87	21,6
4	34,5	10,8	9,77	10,29	25,16
5	37	8,84	7,97	8,41	17,52
6	40,5	8,59	8,07	8,33	20,63
7	43,5	9,53	7,45	8,49	24,55
8	45	9,99	9,2	9,60	27,86
9	48	10,18	9,27	9,73	32,08
10	49,5	11,1	9,7	10,40	38,15
11	49	11,98	9,64	10,81	43,5
12	52,5	10,5	9,38	9,94	37,96
13	54	11,78	9,53	10,66	45,7
14	52	11,8	10,87	11,34	47,56
15	54	11,59	9,84	10,72	45,2
16	54,5	10,84	11,23	11,04	57,61
17	54,5	15,98	12,69	14,34	78,3
18	55	13,83	11,83	12,83	66,74
19	54,5	12,65	10,57	11,61	51,83
20	53,5	14,05	11,65	12,85	69,83
21	53,5	12,74	10,62	11,68	51,46
22	52,5	10,23	8,08	9,16	28,6
23	49,5	10,86	9,39	10,13	38,25
24	49	10,13	9,02	9,58	29,93
25	47	8,67	7,41	8,04	21,58
26	45,5	12,38	10,78	11,58	43,26
27	43	9,75	7,95	8,85	25,63
28	40	9,59	8,19	8,89	22,04
29	37	8,5	6,92	7,71	18,16
30	34,5	8,11	7,16	7,64	14,21
31	30,5	11,16	9,79	10,48	24,22
32	27	8,93	7,85	8,39	13,26
33	21	10,7	9,46	10,08	15,8
Ø	**43,68**	**10,85**	**9,45**	**10,15**	Ges.: **1140,76**

– Bewässerungsdaten - Die angeführten Mengenangaben beziehen sich auf die Wassergabe pro Versuchsbehälter:

Datum	Uhrzeit	Menge [ml]
26.07.2009	10:00	2000
28.07.2009	09:15	1000
28.07.2009	10:10	1000
29.07.2009	11:30	1000
30.07.2009	09:20	2000
31.07.2009	12:00	1000
31.07.2009	17:45	2000
31.07.2009	18:10	1000
02.08.2009	17:00	3000
08.08.2009	14:20	2000
09.08.2009	16:30	2000
15.08.2009	10:00	3000
18.08.2009	10:00	2000
18.08.2009	17:00	2000
20.08.2009	09:30	3000
20.08.2009	16:00	4000
24.08.2009	10:00	4000
25.08.2009	09:30	2000
25.08.2009	14:15	2000
27.08.2009	------	1000
28.09.2009	11:20	4000
01.09.2009	08:00	1000
01.09.2009	14:50	2000
08.09.2009	11:20	2000
08.09.2009	11:40	2000
11.09.2009	13:50	2000
11.09.2009	14:15	2000
16.09.2009	15:00	4000
22.09.2009	13:00	4000
28.09.2009	------	8000

– Erhebungen der Sickerwassermenge über die Auffanggefäße der Versuchsbehälter 1-17:

Datum	Uhrzeit	Lys. 1 [ml] salix	Lys. 2 [ml] o. Bew.	Lys. 3 [ml] o. Bew.	Lys. 4 [ml] salix	Lys. 5 [ml] salix	Lys. 6 [ml] salix	Lys. 7 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 8 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 9 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 10 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 11 [ml] salix	Lys. 12 [ml] salix	Lys. 13 [ml] salix	Lys. 14 [ml] salix	Lys. 15 [ml] Gräser-Kr.	Lys. 16 [ml] Gräser-Kr.
24.07.2009	12:00	1680	5450	5400	2190	2480	2500	3060	3300	3260	3450	3100	2430	2900	2880	3200	3200
28.07.2009	10:30	3400	5400	5500	3080	2800	2240	4800	4800	5250	4300	2600	2520	2400	3250	4700	4960
31.07.2009	18:00	330	3410	3240	250	810	1000	3010	3100	3080	3600	590	640	610	190	3000	2930
02.08.2009	17:00	100	3200	3800	100	260	500	2900	2900	2700	2920	200	110	150	100	0	2950
05.08.2009	15:45	120	5500	6560	100	500	800	5300	5600	5500	5000	1780	400	1120	1800	5600	450
08.08.2009	14:20	880	2200	2900	10	1100	780	1690	1780	1600	1600	1090	800	1000	980	1720	1800
15.08.2009	10:00	240	5500	6460	80	260	380	3180	3360	3480	3680	240	220	420	200	3560	3620
18.08.2009	16:40	60	3800	4180	0	100	80	0	2020	2600	2600	80	0	40	80	2050	1800
20.08.2009	15:30	0	2760	2650	0	0	0	990	1040	1260	1260	0	0	0	0	1240	920
24.08.2009	10:00	0	5800	5920	0	0	0	4180	4160	2900	3620	0	480	0	0	4000	3620
25.08.2009	14:20	0	2300	3140	0	0	0	0	820	1640	1480	0	0	0	0	800	840
28.08.2009	11:20	0	4000	3600	0	0	0	760	2400	1840	2240	0	0	0	0	2240	2480
01.09.2009	14:50	0	5400	5160	0	0	0	1400	4700	4100	4580	0	0	0	0	4640	4870
04.09.2009	10:20	0	4100	4500	0	100	200	240	2180	2080	2000	0	0	0	0	2000	2280
08.09.2009	11:15	0	2480	2340	0	0	0	0	1480	1420	1480	0	0	0	0	1470	1810
11.09.2009	13:50	0	2940	2040	0	0	0	100	1100	1300	1480	160	40	20	10	1200	1320
16.09.2009	13:50	0	2990	2450	0	30	80	0	900	750	770	0	70	20	0	880	760
22.09.2009	09:45	100	2100	3270+3100	0	0	50	50	1120	800	840	0	0	0	0	1460	1700
24.09.2009	09:45	50	1600	850	0	0	0	0	410	190	330	0	0	0	0	400	610
28.09.2009	11:30	50	1180	2640	0	0	0	50	180	100	170	0	0	0	0	200	200
13.10.2009	11:20	0	4920	3160+3350	0	0	0	1200	1690	930	3220	0	0	0	0	2000	2760