Untersuchungen zum Einfluss von Weidensträuchern auf den Bodenwasserhaushalt eines Hochwasserschutzdammes anhand von Lysimeterversuchen

Studies on the effect of willow shrubs on the soil water balance of a flood control dam on the basis of Lysimeterexperiments

Diplomarbeit

eingereicht von
Bettina Lukas

H87 Department für Bautechnik und Naturgefahren
Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau (IBLB)

Betreuung:

O. Univ. Prof. Dr. Florin Florineth
Univ. Ass. Dipl. Ing. Walter Lammeranner

Masterstudium Landschaftsplanung und Landschaftsarchitektur

Inhaltsverzeichnis

Danksagung **4**

Zusammenfassung **5**

Abstract **6**

1. Einleitung **7**

2. Ziele **8**

3. Grundlagen **9**

3.1. Wasserkreislauf 9

3.2. Wasserbilanz 10

3.3. Bodenphysikalische Grundlagen 10

3.3.1. Porosität (Porenvolumen) 11

3.3.2. Porengrößenverteilung 12

3.3.3. Bodengefüge (Bodenstruktur) 12

3.3.3.1. Makrogefüge 13

3.3.4. Wasserdurchlässigkeit des Bodens 14

3.3.5. Bodenluft 14

3.3.6. Bodentemperatur 14

3.3.7. Bodenwasser 15

3.3.7.1. Potentialkonzept 15

3.3.7.2. Bodenkennwerte des Wasserhaushaltes 17

3.4. Scherfestigkeit von Böden 19

3.5. Verdunstung 20

3.5.1. Potentielle und reale Verdunstung 21

3.5.2. Evaporation 21

3.5.3. Transpiration 21

3.5.4. Evapotranspiration 24

3.6. Bestimmung der Verdunstung 25

3.6.1. Messung der Evaporation 26

3.6.2. Messung der Transpiration 26

3.6.3. Messmethoden der Evapotranspiration 26

3.6.3.1. Lysimeter 26

3.6.4. Berechnungsmethoden der Evapotranspiration 29

3.6.4.1. HAUDE - Gleichung 29

3.6.4.2. Potentielle Verdunstung nach Penman-Monteith 30

4. Methodik **32**

4.1. Lysimeteranlage 32

4.2. Aufbau der Versuchsbehälter ... 33
4.3. Messtechnik ... 34
4.3.1. Wassergehaltssensoren ... 35
4.3.2. Tensiometer ... 35
4.3.3. Sickerwassermessung ... 36
4.3.4. Wiegeelektronik ... 37
4.3.5. Wetterstation ... 37
4.4. Bepflanzungen ... 38
4.4.1. Gräser & Kräuter ... 38
4.4.2. Weidenspreitlage ... 40
4.5. Vegetationsaufnahmen ... 41
4.5.1. Oberirdische Biomasse ... 41
4.5.1.1. Längen – Durchmesser – Verhältnis ... 41
4.5.1.2. Biomasse ... 42
4.5.1.3. Blattflächenindex (Leaf area Index) ... 43
4.5.2. Unterirdische Biomasse ... 43
4.5.2.1. Wurzelvolumen ... 43
4.5.2.2. Abtragen der Wurzeln ... 44
4.5.2.3. Auswaschen der Wurzeln ... 46
4.5.2.4. Aussortieren der Wurzeln ... 47
4.5.2.5. Messen des Wurzelvolumens ... 48
4.5.3. Zeitlicher Ablauf der Arbeiten ... 49

5. Ergebnisse ... 50

5.1. Vegetationsentwicklung ... 50
5.1.1. Weidenspreitlage ... 50
5.1.1.1. Durchmesser- Längen - Verhältnis ... 51
5.1.1.2. Biomasse ... 53
5.1.1.3. Blattflächenindex ... 58
5.1.1.4. Wurzeln ... 59
5.1.1.5. Wurzel- Sprossverhältnis ... 62
5.1.2. Gräser & Kräutermischung ... 63
5.1.2.1. Wurzeln ... 64
5.1.3. Vergleich der Wurzelmassen - Gräser & Kräuter mit Weiden ... 65
5.2. Meteorologische Kenngrößen des Untersuchungszeitraumes ... 67
5.2.1. Temperatur und Niederschlag ... 67
5.2.2. Wind und Strahlung ... 70
5.3. Wasserhaushalt des gesamten Untersuchungszeitraumes ... 70
5.3.1. Wasserspannung (G&K, Weiden, ohne Bewuchs) ... 70
5.3.1.1. Wasserspannung Zeitraum 1: (März) – Mai (2010) ... 71
5.3.1.2. Wasserspannung Zeitraum 2: Juni – August (2010) ... 73

5.3.1.3. Wasserspannung Zeitraum 3: September bis Oktober 76
5.3.2. Wassergehalt (G&K, Weiden, ohne Bewuchs) 78
5.3.2.1. Wassergehalt Zeitraum 1: März bis Mai 78
5.3.2.2. Wassergehalt Zeitraum 2: Juni bis August 80
5.3.2.3. Wassergehalt Zeitraum 1: September bis Oktober 81
5.3.3. Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt 82
5.3.4. Sickerwassermenge 87
5.4. Berechnung Evapotranspiration 88
5.4.1. Reale Evapotranspiration 88
5.4.2. potentielle Evapotranspiration 90

6. Diskussion 93

7. Quellenverzeichnis 95

7.1. Literaturverzeichnis 95
7.2. PDFs 96
7.3. Internetquellen 97

8. Abbildungsverzeichnis 98

9. Tabellenverzeichnis 104

Danksagung

Zu aller erst möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, die mir dieses Studium erst ermöglicht und mich während der ganzen Studienzeit stets unterstützt haben.

Auch meiner Schwester gilt großer Dank, da sie mich immer aufgebaut und motiviert hat wenn es mit dem Studium einmal nicht so gut gelaufen ist.

Ganz besonderer Dank kommt jedoch meinem Studienkollegen Jarek zu, der mir immer zur Seite gestanden ist und geholfen hat, wenn ich ihn gebraucht habe. Ohne ihn hätte ich dieses Studium nicht so schnell abschließen können.

Außerdem bedanke ich mich bei den zwei Betreuern dieser Diplomarbeit, Walter Lammeraner und Florin Florineth. Sie beide haben mich während des Schreibens dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt.

Zu guter Letzt danke ich allen, die mir während des Studiums zur Seite gestanden sind und mir eine so schöne Studienzeit ermöglicht haben.

Zusammenfassung

Zurzeit gibt es noch wenige wissenschaftliche Untersuchungen über den Einsatz und die Auswirkungen von Gehölzpflanzungen auf die Standsicherheit von Hochwasserschutzdämmen.

Im Zuge dieser Arbeit wurde auf der Versuchsanlage in Deutsch Wagram (Niederösterreich) über Lysimeterversuche der Einfluss von zwei verschiedenen Bewuchsvarianten auf den Wasserhaushalt von Dämmen untersucht. Durch eine Reduktion des Bodenwassergehalts werden die Bodenstabilität und die Scherfestigkeit erhöht.
Daher soll ermittelt werden, wie schnell und gut sich Bepflanzungen mit Weidensträuchern oder Gräsern und Kräutern auf den schweren Bedingungen die auf einem Damm herrschen, entwickeln und wie sehr diese dann zur Senkung der Bodenfeuchte und in weiterer Folge zur Erhöhung der Dammstabilität beitragen. Zusätzlich werden Daten über ober- und unterirdische Biomasse der bewachsenen Lysimeter erhoben.
Die Ergebnisse der ersten zwei Vegetationsperioden werden miteinander verglichen, wobei diese Masterarbeit auf der von Michael OBRIEJETAN (2010) aufbaut, dessen Diplomarbeit die erste Vegetationsperiode sowie den Aufbau der Lysimeteranlage genauer behandelt.

Die Weidensträucher entwickeln sich im ersten Jahr besser als im zweiten. Ihr Blattflächenindex sinkt von der ersten auf die zweite Vegetationsperiode um mehr als die Hälfte. Die Gräser und Kräuter hingegen wachsen in beiden Vegetationsperioden sehr gut. Beide Bewuchsformen zeigen schon nach dem ersten Jahr ein starkes Wurzelwachstum. Nach zwei Vegetationsperioden reichen die Wurzeln beider Bewuchsformen bereits bis zu 96 cm tief.
Bei der Weidenspreitlage macht die unterirdische Biomasse nach 15 Monaten mehr als die Hälfte der Gesamtbiomasse aus. Durch den Trockenstress in der zweiten Vegetationsperiode ist ihre Wurzelentwicklung also deutlich stärker als im ersten Jahr. Die Blätter der Weidensträucher sind hingegen im trockenen Jahr viel kleiner.
Nach zwei Vegetationsperioden ist das Wurzelvolumen der Gräser und Kräuter in den ersten 10 cm Bodentiefe höher als das der Weidensträucher. Die Gehölze dominieren hingegen in den tieferen Schichten ab 10 cm an ihrer Wurzelmasse, wobei ab 60 cm das Wurzelvolumen der Gräser und Kräuter vergleichsweise nur mehr sehr gering ist.

Bei den Gehölzen sowie bei den Gräsern und Kräutern treten während des gesamten Untersuchungszeitraumes von März bis Oktober 2010 kaum Sickerwasseraustritte auf.
Der Bodenwassergehalt ist deutlich geringer als bei der unbewachsenen Fläche. Dies ist auf die starke Evapotranspiration beider Bewuchsformen zurückzuführen, welche nach 15 Monaten um ein Vielfaches höher ist als die Evaporation der unbewachsenen Fläche.
Die Wasserspannung im Boden wiederum ist bei den Bepflanzungen deutlich größer, wodurch eine bessere Bodenstabilität gegeben ist.

Abstract

At this time there are less scientific analysis about the use and impact of grove – plantations on the stability of flood protection dams.

In the course of this thesis, the influence of two different plant cover variants on the water supply of dams has been investigated, in the form of Lysimeterexperiments on the test plant in Deutsch – Wagram (Lower Austria).
Reducing the soil water content increases soil stability and consequently the shear strength.
Therefore it was determined how quickly and well plantations with willow shrubs or grasses and herbs are and how they develop in serious conditions that prevail on a dam and how much they will be to lower the soil moisture and subsequently, to increase the dam stability.
In addition, data from the biomass above and below the ground, of the vegetated lysimeters, are collected.
The results of the second growing season were compared with those of the first, which were treated in more detail on the work of Michael OBRIEJETAN (2009), whose thesis acts about the first growing season and the exact construction of the lysimeter-plant.

The willow shrubs develop in the first year better than in the second. Their leaf area index decreases from the first to the second growing season by more than half. The grasses and herbs grow in both growing seasons, however, very good. Both growth forms are already in the first year after a strong root growth. After two growing seasons, the roots of both vegetation types already range up to 96 cm depth.
At the willow shrubs the underground biomass after 15 months makes up more than half of the total biomass. Because of the drought in the second growing season, their roots have developed so much stronger than in the first year. The leaves of the willow bushes in the dry year, however, are much smaller.
After two growing seasons, the root volume of grasses and herbs in the first 10 cm soil depth is greater than that of the willow shrubs. The woods dominate on the other hand in the deeper layers of under 10 cm at its root-mass. Below 60 cm the root volume of grasses and herbs is very low compared to the shrubs.

The amount of leachate of both plantings is while the entire study period, from March to October 2010, very low. The soil water content is significantly lower than in the non-planted surface. This is caused by the strong evapotranspiration, which is higher after 15 months by a multiple, than the evaporation of the unvegetated area.
The soil water tension in turn is higher among the planting so many times, resulting in improved soil stability.

1. Einleitung

Der Einsatz von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen ist ein sehr umstrittenes Thema. Problematisch kann es werden, wenn ungeeignete Arten zum Einsatz kommen.
Es gibt nur wenige Befürworter, da Bepflanzungen mit Gehölzen unter anderem folgende negative Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Dammes haben können:
(HASELSTEINER und STROBL, 2005)

- Entstehung von Hohlräumen durch lebendes oder abgestorbenes Wurzelmaterial
- Auflockerung des Bodenmaterials bei Belastung durch Wind
- Eindringen von Wurzeln in Entwässerungseinrichtungen
- Erschwerte Dammüberwachung und Pflege

Gehölze beeinflussen die Bodeneigenschaften jedoch nicht nur in negativer Hinsicht.
Beim richtigen Einsatz bestimmter Arten gibt es auch positive Aspekte wie
(FLORINETH, 2004):

- Entzug von Bodenwasser und in Folge Erhöhung der Scherfestigkeit des Dammes
- Erosionsschutz der Oberflächen durch Sprosse und Wurzeln
- Ökologisch wertvoll – Vernetzung von Biotopen

Gehölze sollen als lebende Baustoffe auf Dämmen zur dauerhaften Sicherung und Erhaltung der Schutzfunktionen beitragen. Dämme sind jedoch sehr spezifische Standorte, da der Boden stark verdichtet ist.
Ein Damm muss bei Inbetriebnahme, also in noch unbepflanztem Zustand, standsicher sein. Die Vegetation hat dann die Aufgabe die allgemeine Standsicherheit noch zu erhöhen.
So ist durch geeignete Bau- und Pflegemaßnahmen das Wachstum der Pflanzen zu sichern, damit diese ihre Schutzfunktionen, wie Verhinderung von Bodenabtrag durch Wasser und Wind, gut und dauerhaft erfüllen können.
(HASELSTEINER, 2002)
Im Zuge dieser Arbeit sollen die positiven Eigenschaften sowie die Eignung von Gehölzen an Hochwasserschutzdämmen untersucht werden.
Weiden haben sich für den Einsatz an Flussufern bewährt, da sie elastisch und hochwasserbeständig sind und sich gut vegetativ vermehren lassen. Daher wurden bei unseren Versuchen Purpur-Weiden (*Salix purpurea*) zur Bepflanzung der Dämme eingesetzt.

2. Ziele

Im Hinblick auf die Eignung von Gehölzen auf Hochwasserschutzdämmen gibt es noch viele ungeklärte Aspekte. Diese Arbeit soll anhand selbst durchgeführter Untersuchungen zur Erweiterung des Wissens auf diesem Gebiet beitragen.
Die Untersuchung der Wasserverhältnisse im Boden ist dabei ein wichtiger Faktor, da diese großen Einfluss auf die Stabilität eines Bodens haben.

Anhand einer Lysimeteranlage soll untersucht werden, welche Auswirkungen Weidensträucher und eine Gräser-Kräutervegetation auf den Wasserhaushalt eines Dammes haben. Dazu werden die Verdunstungsleistungen beider Bewuchsformen ermittelt und mit einem unbewachsenen Boden verglichen.
Dabei gilt es festzustellen, welche Unterschiede sich in Hinblick auf die Evapotranspiration, den Bodenwassergehalt sowie die Sickerwassermenge ergeben.
Die Weidensträucher sowie der Gräser- Kräuterbewuchs werden außerdem auf ihre ober- und unterirdische Vegetationsentwicklung untersucht.
Über aufgenommene meteorologische Daten sowie Ergebnisse der Wasserverhältnisse im Boden der Lysimeter wird die potentielle sowie reale Evapotranspirationsrate ermittelt.

In der folgenden Masterarbeit sollen über Berechnungen und ausgewertete Daten die Auswirkungen der Gräser - Kräuterbegrünung sowie der Weidensträucher auf den Bodenwasserhaushalt und in weiterer Folge auf die Stabilität des Dammbodens untersucht werden.

3. Grundlagen

3.1. Wasserkreislauf

Durch den ständigen Austausch des Wassers zwischen Meer, Land und Luft bleibt das Wasservolumen der Erde ständig konstant.
Dieser hydrologische Kreislauf besteht aus folgenden Hauptprozessen:

- Niederschlag
- Verdunstung
- Infiltration
- unterirdischer Abfluss
- Wiederaustritt des Grundwassers
- oberirdischer Abfluss
- Bodenwasser

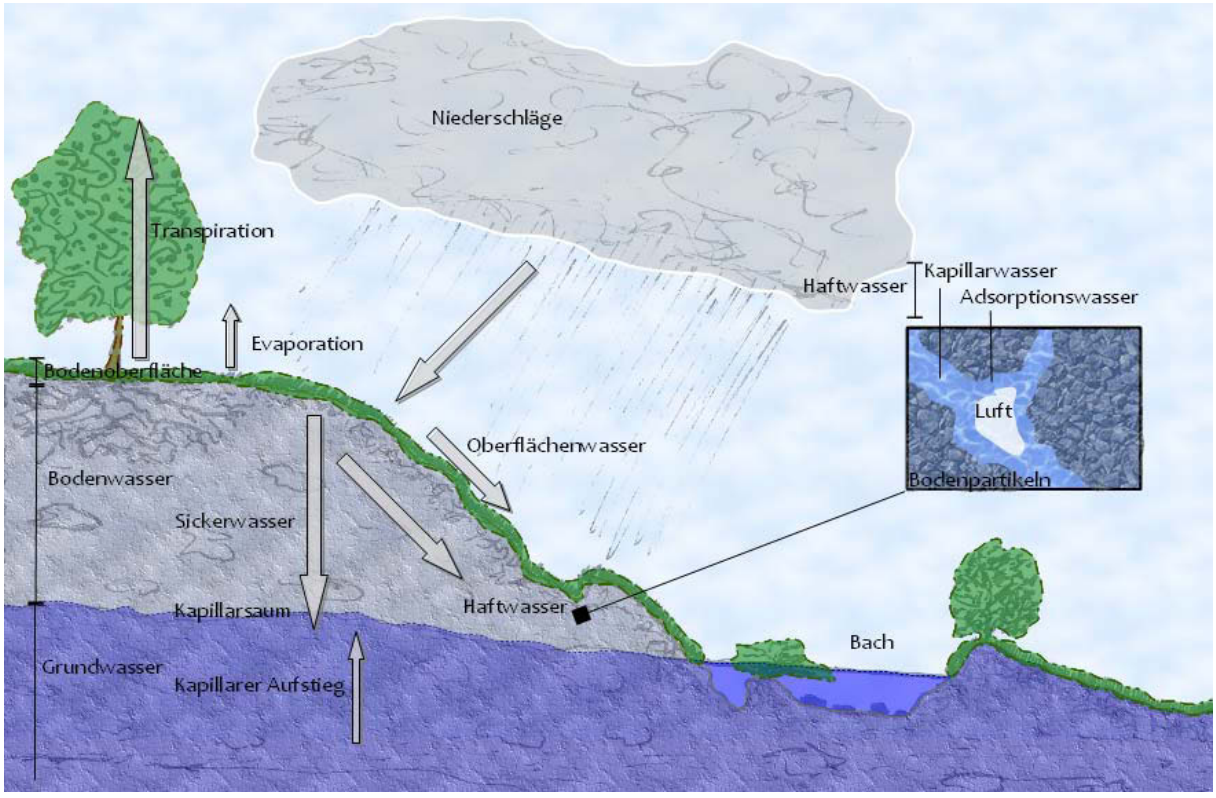

Abbildung 1: Wasserkreislauf (Jaroslaw LESZCZYNSKI, 2011)

Global gesehen herrscht zwischen Verdunstung und Niederschlag ein Gleichgewicht.
Im Zuge dieser Arbeit soll hauptsächlich auf die Verdunstung, die in Form von Evaporation, Transpiration und Evapotranspiration auftreten kann, näher eingegangen werden. (MATTHEß und UBELL, 1983)

3.2. Wasserbilanz

Sie ist die Bilanz aus Niederschlag, Abfluss, Verdunstung und Speicheränderungen und ist bezogen auf ein Gebiet und einen bestimmten Zeitraum. Durch die Wasserbilanz lässt sich ermitteln, wie viel Wasser einer Region für die Nutzung zur Verfügung steht. Bei einer negativen Wasserbilanz ist die potentielle jährliche Verdunstung höher als der Niederschlag, während bei einer positiven Wasserbilanz die reale Verdunstung kleiner als der Niederschlag ist, wodurch Oberflächenabfluss und Infiltration des Wassers im Boden stattfinden kann. (MATTHEß und UBELL, 1983)

Wasserhaushaltsgleichung (SCHMIDT, 2003)

$$N = A_o + A_u + V$$

N = Niederschlagsmenge
A_u = oberirdischer Abfluss
A_o = unterirdischer Abfluss
V = Verdunstung

3.3. Bodenphysikalische Grundlagen

Der Wasserhaushalt im Boden ist unter anderem von folgenden bodenphysikalischen Eigenschaften abhängig:

- Porosität
- Porengrößenverteilung
- Bodengefüge
- Bodendurchlässigkeit
- Bodenluft
- Bodentemperatur
- Bodenwasser

Diese aufgezählten Eigenschaften werden in weiterer Folge näher betrachtet.
(MATTHEß und UBELL, 1983)

3.3.1. Porosität (Porenvolumen)

Die Porosität gibt das Verhältnis des Hohlraumvolumens zum Gesamtvolumen des Bodens an. Sie zeigt also auf wie viel Wasser ein Boden maximal aufnehmen kann, wenn alle Poren gefüllt sind (HARTGE und HORN , 1999).

Sie ist abhängig von Form und Größe der Körner ihrer Verteilung und dem Gehalt des Bodens an organischer Substanz. Diese Hohlräume (oder auch Poren genannt), können gefüllt mit Gasen, Wasser oder organischer Substanz sein.
Je besser die Teilchen zusammenpassen (siehe Abbildung 2), umso niedriger ist der Hohlraumanteil. Sind die Körner hingegen locker und ungeordnet (siehe Abbildung 3), so steigt das Porenvolumen. Bei lockeren Sand- und Kiesschichten ist die Porosität mit bis zu 40% sehr hoch (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

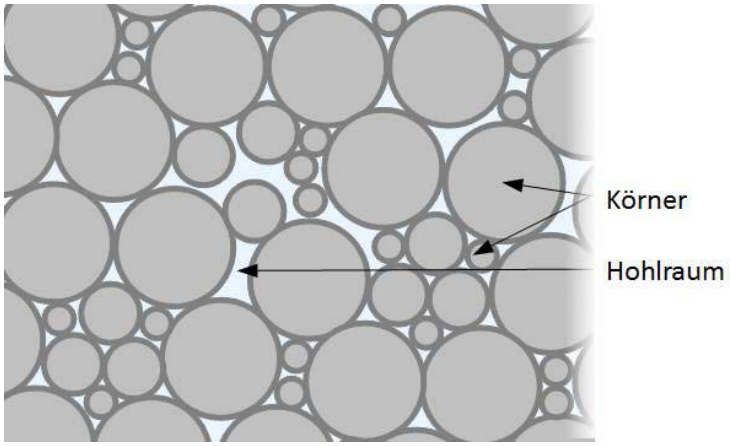

Abbildung 2: kleiner Hohlraumanteil – Körner passen gut zusammen

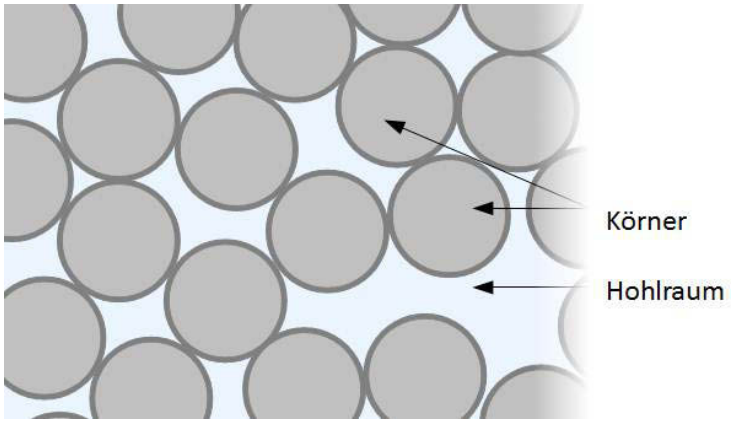

Abbildung 3: Größerer Hohlraumanteil – lockere ungeordnete Körner

Der Hohlraumanteil (n) ergibt sich aus dem Hohlraumvolumen (V_h) des Bodens, gerechnet durch das Feststoffvolumen (V_o). Dies lässt sich durch folgende Formel darstellen:

$$n = V_h/V_o$$

Der Hohlraumanteil wird anschließend mit 100 multipliziert und in Prozent angegeben. (MATTHEß und UBELL, 1983)

3.3.2. Porengrößenverteilung

Bei den Poren im Boden gibt es verschiedene Größen und Formen. Wasser aus Feinporen ist in der Regel für Pflanzen nicht verfügbar, Wasser aus Mittelporen hingegen schon. Grobporen in terrestrischen Böden sind normalerweise wasserfrei und daher für die Belüftung von Bedeutung. Die Porengröße ist auch für das Wurzelwachstum sowie die mikrobielle Aktivität von Bedeutung (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

Die Porengrößenverteilung ist von Körnung, Kornform und dem Bodengefüge abhängig. Der Anteil an Grobporen ist in grobkörnigen sandig- und kiesreichen Böden am höchsten.
Hingegen gibt es umso mehr Feinporen, je feinkörniger ein Boden ist. Bei Tonböden beträgt der Grobporengehalt manchmal nur 2-3%. Der Tongehalt steht also mit dem Anteil an Feinporen in engem Zusammenhang, was sich im Porenvolumen widerspiegelt.
In frisch abgelagerten Ton kann der Feinporenanteil bis zu 70% betragen.
Den größten Anteil an Mittelporen (15 plusminus 7%) findet man bei Schluffböden. Eine Zunahme an organischer Substanz im Boden führt vor allem bei Sandböden zu einer Erhöhung des Mittelporenanteils sowie der Feinporen, wobei das Ausmaß von Form und dem Zersetzungsgrad der organischen Stoffe abhängig ist (MATTHEß und UBELL, 1983).

3.3.3. Bodengefüge (Bodenstruktur)

Als Bodenstruktur versteht man die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile. Die Korngrößenverteilung (Abbildung 4), welche den Anteil an bestimmten Kornfraktionen im Boden angibt, sowie die Kornformen können sehr variieren, wodurch verschiedene räumliche Anordnungen entstehen. Das Bodengefüge beeinflusst direkt den Wasser-, Luft- und Wärmehaushalt und ist ein wichtiger Faktor für die biologische Aktivität, die Bodenentwicklung und die Ertragfähigkeit. Außerdem wirkt sie sich auf die Stabilität des Bodens aus. Beim Bodengefüge kann zwischen dem Makro (im Gelände erkennbar) und dem Mikrogefüge (nur unter Mikroskop erkennbar) unterschieden werden.

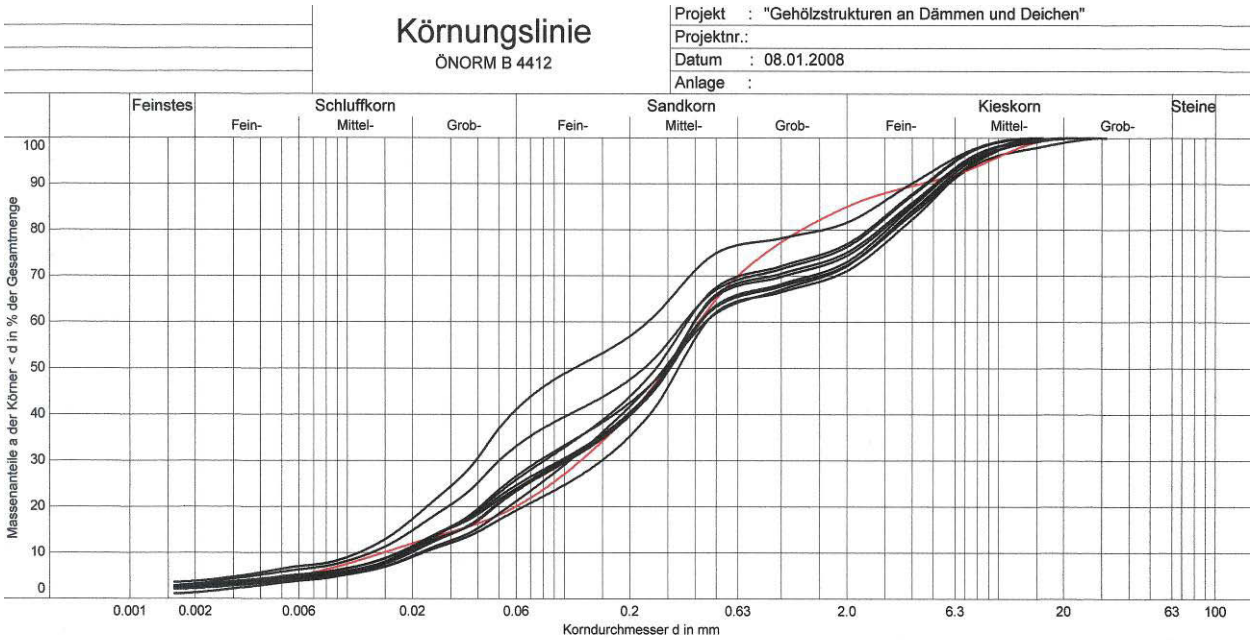

Abbildung 4: Darstellung der Korngrößenverteilung in Form einer Körnungslinie (rot ist die angestrebte Körnungsverteilung der Hochwasserschutzdämme in Deutsch Wagram, schwarz sind die eingesetzten Material – Kennwerte)

3.3.3.1. Makrogefüge

Gefügeformen, die mit bloßem Auge erkennbar sind werden als Makrogefüge bezeichnet. Nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) wird hierbei zwischen drei übergeordneten Gefügeformen unterschieden:

- Einzelkorngefüge

Hierbei sind die Minerale und organischen Teilchen nicht miteinander verklebt, sondern liegen lose und unabhängig voneinander.

- Kohärentgefüge

Durch Kohäsionskräfte verkleben sich die Teilchen zu einer homogenen Masse. Kohärentgefüge findet man in Schluff-, Ton- oder Lehmböden in Unterboden. Sie sind dafür zuständig, das Böschungen und Profilwände beim Austrocknen nicht einfach zerfallen (HARTGE und HORN , 1999).

- Aggregatgefüge

Teile der Bodenmatrix sind hierbei deutlich von ihrer Umgebung abgesetzt und bilden so genannte Aggregate, welche stark in ihrer Form und Größe variieren können. Im Extremfall kann die Aggregierung so stark ausgeprägt sein, dass Böden feinkörniger Struktur Eigenschaften von grobkörnigen Böden annehmen.

3.3.4. Wasserdurchlässigkeit des Bodens

Der so genannte Durchlässigkeitsbeiwert (*k)* ist ein Maß für die Wasserdurchlässigkeit eines Bodens. Er beschreibt die Geschwindigkeit, mit der Wasser den Boden durchsickert und ist abhängig von Lagerungsdichte und Bodenstruktur. Je gröber ein Boden ist, desto stärker ist seine Wasserdurchlässigkeit. Schotter und Kiese sind somit stark durchlässig, während stark tonhaltige Böden sehr schwach durchlässig sind.
Die Geschwindigkeit des durchsickernden Wassers, in m/s angegeben, wird bei vollständig wassergesättigtem Boden gemessen.
Die Wasserdurchlässigkeit ist ein wichtiger Faktor für die Beurteilung von Drainwirksamkeit, Erosionsanfälligkeit und Filtereigenschaften eines Bodens (BONK, 2010).

3.3.5. Bodenluft

Die Bodenluft ist die gasförmige Komponente des Bodens. Die Bodenporen sind mit Luft, anderen Gasen oder wässriger Bodenlösung gefüllt. Steigt also der Wassergehalt im Boden, sinkt automatisch der Luftgehalt. Für zahlreiche Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln ist die Bodenluft (vor allem der enthaltene Sauerstoff) überlebensnotwendig. Abgesehen davon ist sie durch Oxidations- und Reduktionsprozesse an der Bodenentwicklung beteiligt.
Zwischen Atmosphäre und Boden findet ein ständiger Gasaustausch statt, der sich zum Teil auf die Druckunterschiede zwischen den zwei Komponenten zurückführen lässt.
Die Bodendurchlüftung ist unter anderem abhängig von Körnung, Gefüge und Wassergehalt des Bodens. In einem grobkörnigen Gefüge befindet sich mehr Bodenluft als in einem dichten und feinporigen. Eine gute Bodendurchlüftung wirkt sich positiv auf die Bodenorganismen aus. Die biologische Aktivität des Bodens wird dadurch gefördert (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

3.3.6. Bodentemperatur

Die Wärmeenergie in einem Boden wird als Bodentemperatur bezeichnet. Steigt diese an, werden die chemischen Reaktionen sowie alle Lebensvorgänge und Entwicklungsprozesse eines Bodens, wie Verwitterung oder Zersetzung, beschleunigt. Auch die Keimung und das Wachstum der Pflanzen werden dadurch begünstigt. Bei einer Temperaturerhöhung ändern sich die Materialeigenschaften der Bodenbestandteile, wie die Zusammensetzung der Bodenluft. Die Bodentemperatur ist ein stark variierender Bodenfaktor, der sich aus der Wechselwirkung von Wärmezufuhr und Wärmeverlust sowie Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit ergibt. Wärmezufuhr erfolgt durch Sonneneinstrahlung, Wärmeverlust durch Evaporation und Wärmeabstrahlung von der Bodenoberfläche. Die Wärmekapazität steht mit dem Wassergehalt des Bodens in Zusammenhang, da die Wärmekapazität von Wasser deutlich höher ist als die von mineralischen und organischen Substanzen.

Die Wärmeleitfähigkeit, in Joule gemessen, wird Großteils durch den Luftgehalt des Bodens bestimmt, da Luft eine geringe Wärmeleitfähigkeit aufweist.
Feuchte Böden nehmen weniger Wärme auf als trockene. Sie können die Wärme aber besser speichern, wodurch sie langsamer auskühlen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

3.3.7. Bodenwasser

Der Teil des Wassers, der bei 105°C aus dem Boden entfernt werden kann, wird als Bodenwasser bezeichnet. Der Wassergehalt eines Bodens wird hierzu gravimetrisch bestimmt, indem man diesen bei 105° bis zur Trockenkonstanz (wenn sich das Gewicht nicht mehr ändert) trocknet und das Gewicht vor und nach der Trocknung misst. Die Differenz ergibt dann den Wassergehalt. Dies ist jedoch äußerst arbeitsaufwendig und kann bei häufiger Probeentnahme an der gleichen Stelle zu einer Veränderung des Wasserhaushaltes führen.
Wenn so viel Niederschlag fällt, dass der Boden kein Wasser mehr aufnehmen kann, dann fließt der Überschuss als Oberflächenwasser ab. Je Wasser-gesättigter der Boden ist, umso größer ist der Anteil des Oberflächenwassers. Ein Boden ist dann Wasser-gesättigt, wenn das Wasser den gesamten Porenraum ausgefüllt hat und daher kein weiteres Wasser mehr aufgenommen werden kann (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

Ein Teil des Niederschlages wird im Boden festgehalten, während der Rest als Sickerwasser in tiefere Zonen verlagert wird. Der Teil, der dabei im Boden bleibt, ist das sogenannte Haftwasser (Bodenfeuchte), welches jedoch nicht vollständig für Pflanzen verfügbar ist.
Das Sickerwasser wird durch schwer wasserdurchlässige Schichten (z.B. aus Ton) zurückgehalten, Wasser reichert sich darüber an. Ist diese Wasseransammlung dauerhaft, so wird dies als Grundwasser bezeichnet. Ist sie jedoch nur zeitweise im Jahr vorhanden, spricht man von Stauwasser (HARTGE und HORN, 1999).

3.3.7.1. Potentialkonzept

Im Boden gibt es verschiedene Kräfte, die zusammen mit anderen von außen einwirkenden Kräften die Bewegung des Wassers und somit auch die Aufnahmefähigkeit für Pflanzen beeinflussen. Da diese Kräfte jedoch schwer zu definieren sind, ist es üblich stattdessen ihre Arbeitsfähigkeit, also das Potential zu betrachten.
Das Potential ist die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einem gegebenen Punkt eines Kraftfeldes zu einem Bezugspunkt zu transportieren.
Dieses Potentialkonzept lässt sich auch auf das Bodenwasser anwenden. Alle Bewegungsvorgänge im Boden, wie Infiltration oder Dränung, kann man so zusammenfassen. Das Wasser bewegt sich von Stellen höheren Potentials zu solchem mit niedrigerem Potential, bis an allen Stellen das Gesamtpotential den gleichen Wert erreicht

hat. Das Bodenwasser-Potential (Ψ) ergibt sich aus der Masse (m), der Erdbeschleunigung (g) und der Höhe über ein Bezugsniveau (h) (DVWK Merkblätter, 1996).

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

- Gesamtpotential

Es ist die Summe aller Teilpotentiale aus den im Boden auftretenden Kräften (Gravitationspotential, Matrixpotential, osmotisches Potential).
Das Gesamtpotential des Bodenwassers ist jene Arbeit, die aufgebracht werden muss, um eine bestimmte Menge Wasser zu einer bestimmten Stelle im Boden zu transportieren. Angegeben werden die Potentiale als im Normalfall spezifische Arbeit in J/kg oder als hydrostatischer Druck in Hektopascal (hPa) (DVWK Merkblätter, 1996).

- Gravitationspotential

Bodenwasser wird von dem Gravitationsfeld der Erde beeinflusst. Aus diesem Grund kann ein Gravitationspotential definiert werden.
Laut SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) entspricht das Gravitationspotential der Arbeit, die aufgewendet werden muss, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe aufzuheben.
Es ergibt sich aus der Lage der betrachteten Stelle im Schwerkraftfeld der Erde (meist Bodenoberfläche als Referenzniveau).

- Matrixpotential

Das Matrixpotential wird unter anderem als Saugspannung (in hPa angegeben) oder Bodenwasserpotential bezeichnet. Jeder Boden kann Wasser entgegen der Schwerkraft nur bei einer bestimmten Saugspannung halten.
Das Matrixpotential wird durch Adhäsions- sowie Kohäsionsspannungen im Boden-Wasser-Luft System hervorgerufen. Es ist ein negativer hydrostatischer Druckwert und kann zum Beispiel durch Tensiometer erfasst werden.
Die matrixbedingten Kräfte (Wasserspannung) variieren abhängig von der Bodenfeuchte. Nimmt der Bodenwassergehalt ab, so steigt in Folge die Wasserspannung. Dieses Verhältnis wird in so genannten Wasserspannungskurven bzw. pF-Kurven (siehe Abbildung 5) dargestellt. Je weniger Wasser sich im Boden befindet, desto stärker wird es von den Kräften festgehalten und umso schwerer ist es dem Boden zu entziehen. Findet keine Wasserbewegung im Boden statt (energetische Gleichgewichtszustand), ist das Matrixpotential umso negativer, je größer der Abstand von der Grundwasseroberfläche (die als Bezugsebene gilt) ist (DVWK Merkblätter, 1996; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

- osmotisches Potential

Im Boden liegt niemals reines Wasser vor. Daher ist auch das osmotische Potential (Lösungspotential) zu berücksichtigen. Der Anteil am Gesamtpotential ist von der Menge der gelösten Salze im Wasser abhängig, weshalb dieses Potential, vor allem in Gebieten hoher Salzkonzentrationen (z.B. ariden Gebieten), von erheblicher Bedeutung ist (DVWK Merkblätter, 1996; SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

3.3.7.2. Bodenkennwerte des Wasserhaushaltes

Diese Bodenkennwerte sind von Bedeutung für die Beurteilung des Wasserhaushaltes von Böden und entsprechen charakteristischen Wassergehalten aus einzelnen Bodenschichten und -horizonten (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002).

- Feldkapazität

Die Feldkapazität (=Matrixpotential) entspricht der maximalen Menge des Haftwassers in einer bestimmten Bodenschicht. Sie wird angegeben als Bodenfeuchte in Vol.-% oder als Wasservorrat in mm.
Nach starkem Regen (und wassergesättigtem Boden) stellt sie sich ca. 3-4 Tage später ein.
Die Feldkapazität ist abhängig von Porengrößenverteilung, der Profiltiefe, der Körnung, dem Anteil an organischer Substanz und dem Gleichgewichtszustand des Bodenwassers.
Sie gibt Auskunft über Wasserversorgung der Pflanzen, die Pflanzenverfügbarkeit von wasserlöslichen Nährstoffen und die Auswaschung wasserlöslicher Stoffe.
Im Freiland kann man die Feldkapazität bestimmen, indem man den Boden zuerst intensiv bewässert und dann zum Schutz gegen Evaporation abdeckt.
Die Feldkapazität wird meist aus mehrjährigen Bodenfeuchte-Messreihen aus dem Frühjahr entnommen (DVWK Merkblätter, 1996).

- Permanenter Welkepunkt (PWP)

Wenn durch Austrocknung die Bodenfeuchte so weit zurückgeht, dass die Pflanze nicht mehr genügend Wasser aufnehmen kann, dann führt dies zum Welken und Absterben. Der permanente Welkepunkt ist dann unterschritten. Im Normallfall passiert dies jedoch nur in sehr trockenen Jahren. Der permanente Welkepunkt schwankt je nach Bodenstruktur, Pflanzenbestand und Dauer der Austrocknung.
Man bestimmt ihn experimentell aus Bodenproben und er stellt die Bodenfeuchte dar, die bei einer Saugspannung von -15 000 hPa noch im Boden enthalten ist. Bei tonreichen Böden beträgt der Wassergehalt beim Welkepunkt bis zu 75% der Feldkapazität, während er bei lehmigen, sandreichen und schluffigen Böden nur 25% ausmacht (DVWK Merkblätter, 1996).

- Pflanzenverfügbares Wasser (nutzbare Feldkapazität – nFK)

Der Bodenwasservorrat ist der Teil der Feldkapazität, der von den Pflanzen durch die Wurzeln aufgenommen werden kann, und wird auch als nutzbare Feldkapazität bezeichnet. Die nutzbare Feldkapazität ergibt sich aus der Feldkapazität minus den permanenten Welkepunkt (LOISKANDL, 2001).

$$nFK = FK - PWP$$

Es lässt sich aus folgender Grafik (Abbildung 5) also das pflanzenverfügbare Wasser für verschiedene Bodenarten, wie folgt, bestimmen (KATZENSTEINER, 2009).
Als Beispiel für die Berechnung wurde die Bodenart Schluff ausgewählt.
Die Fragestellung lautet:
Wie viel Liter pflanzenverfügbares Wasser befindet sich in einem m³ Schluffboden?

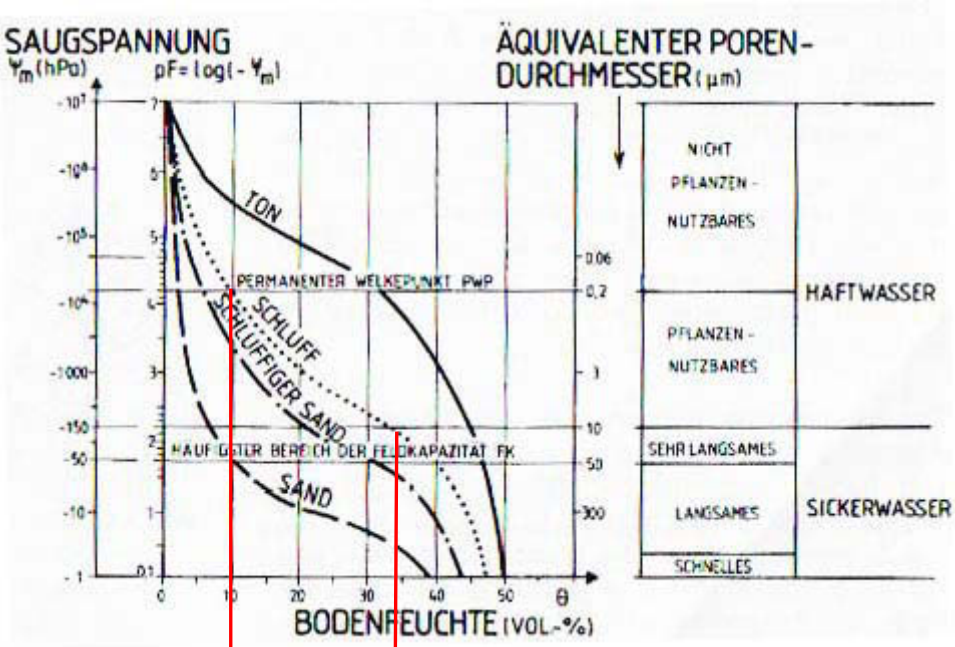

Abbildung 5: pF-Kurve (Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt)
vgl. DVWK Merkblätter 238 (1996)

PWP Schluff
10% Bodenfeuchte

FK Schluff
35% Bodenfeuchte

nFK = 35 – 10
nFK = 25 Vol% Bodenfeuchte

Dieses Ergebnis ist nun (in diesem Beispiel) noch auf einem m³ zu beziehen.

nFK = 25 Vol% von 1 m³
nFK = 250 mm Wasser = 250 l/m³ Boden

Es befinden sich also in einem Meter Schluffboden 250 l pflanzenverfügbares Wasser.

3.4. Scherfestigkeit von Böden

„Unter der Scherfestigkeit eines Stoffes versteht man dessen Eigenschaft, im ruhenden Zustand Schubspannungen aufnehmen zu können“ (PREGL, 1998, S.130).
Sie ist von verschiedenen Bodenfaktoren wie Bodenwassergehalt, Struktur, Wurzeldichte (im Fall einer vorhandenen Vegetationsdecke), Zusammensetzung und mineralogischer Beschaffenheit der Bodenteilchen abhängig und setzt sich aus einem Reibung- und einem Kohäsionsanteil zusammen. Die Kohäsion ist diejenige Scherfestigkeit eines Bodens, die bei fehlender Normalspannung vorhanden ist (WU, 2007).

Physikalische Ursachen der Scherfestigkeit (PREGL, 1998):

- Innere Reibung - Reibungswinkel
- Kapillardruck (p_k) - Kapillarkohäsion
- Binnendruck (p_c) – Kohäsion
- Faserbewehrung - Faserkohäsion

Aufgrund der Oberflächenspannung des Wassers entsteht der Kapillardruck, welcher bei Austrocknung oder Überflutung verloren geht (WU, 2007).
Der Binnendruck (Spannungszustand) in Böden kann nur auf Dauer wirken, wenn alle Normalspannungen als Druckspannungen auftreten.
Fasern (wie Wurzeln) erzeugen über Zugspannungen einen Scherwiderstand, den man als Faserkohäsion bezeichnet. Diese ist durch die Verankerungskraft sowie durch die Zugfestigkeit der Fasern begrenzt. Die Verankerungskraft nimmt mit wachsender Normalspannung zu, wobei die Zunahme nur bis zur Zugfestigkeit der Fasern möglich ist.
Die Scherfestigkeit des Bodens nimmt mit fortschreitender Verformung bis zur Restscherfestigkeit ab. Diesen Abfall nennt man Entfestigung. Die Restscherfestigkeit kann aus einem Scherversuch bestimmt werden (PREGL, 1998).

Ein unbewachsener Boden kann eine bis zu über 50% niedrigere Scherfestigkeit aufweisen als derselbe Boden in bepflanzten Zustand.
Folgende Wirkungen der Vegetation führen zu einer Erhöhung der Scherfestigkeit des Bodens (nach FLORINETH, 2004):

- Mechanische Stabilisierung durch die armierende Wirkung der Pflanzenwurzeln
- Erhöhung der Kapillarkohäsion durch Wasserentzug
- Aggregatbildung durch Wurzelausscheidungen bzw. Bodenaktivität

Da die Scherfestigkeit eines Bodens von seinem Wassergehalt abhängt, trägt der Wasserentzug der Pflanzen über die Evapotranspiration im großen Maße zur Erhöhung der Scherfestigkeit bei (FLORINETH, 2004).

3.5. Verdunstung

„Der physikalische Vorgang der Verdunstung verbindet die Umwandlung von Energie aus Strahlung oder Wärme mit einer Aggregatszustandsänderung von Wasser aus flüssiger oder fester Form in die Gasform.“ (DVWK Merkblätter, 1996, S.4)
Die Verdunstung ist also ein wesentliches Glied des Wasserkreislaufes (Grundwasserhaushaltes). Dabei findet ein physikalischer Prozess statt, bei dem Wasser von flüssigem oder festem Zustand in Wasserdampf übergeht. Die Gesamtverdunstung ergibt sich aus den zwei Hauptkomponenten Evaporation und Transpiration.
Evaporation ist die Verdunstung von unbewachsenen Oberflächen (Wasser, Boden). Die Verdunstung von pflanzlichen Oberflächen wird hingegen als Transpiration bezeichnet. Beides zusammen stellt dann die Evapotranspiration dar, die also auf bepflanzten Landflächen stattfindet (DVWK Merkblätter, 1996).

Die Verdunstung ist auch ein Teil der Energiebilanz und der Wasserbilanz.
Eine Bestimmung der Verdunstung ist über Landflächen deutlich komplizierter als über Wasserflächen. Die Verdunstung ist physikalisch gesehen von folgenden Faktoren abhängig:

- der Differenz zwischen dem Dampfdruck an der Oberfläche und dem der oberflächennahen Luft
- der Energie, die an der Oberfläche zur Verfügung steht
- der Menge des abtransportierten Wasserdampfes in der Luft
- der Menge des Wassers (vorhanden oder dorthin transportiert) an der Oberfläche

Die ersten drei Faktoren gelten auch für die Verdunstung von Wasserflächen, während der letzte ausschließlich für Verdunstungsbedingungen an Landflächen gilt.

Die Oberflächentemperatur, die erforderlich ist für die Berechnung des Sättigungsdampfdruck, ist auf bewachsenen Landflächen nicht leicht zu erfassen.
Wenn man hierbei den Verdunstungsvorgang im Einzelnen erfassen will, braucht man Kenntnisse über Energie- und Wasserstofftransport sowie solche der Bewegung des Wassers im Boden.
Für eine zahlenmäßige Berechnung benutzt man das Bodenwasserpotential (siehe Kapitel 3.3.7. - Bodenwasser). Die Verdunstung wird zahlenmäßig als Menge des verdunsteten Wassers in einem bestimmten Zeitraum angegeben (z.B. als l oder mm/m² und Tag).
(DVWK Merkblätter, 1996)

3.5.1. Potentielle und reale Verdunstung

Es wird unterschieden zwischen realer (aktueller) und potentieller Verdunstung. Bei dieser Unterteilung wird das für den Verdunstungsvorgang zur Verfügung stehende Wasserangebot berücksichtigt.

Die potentielle Verdunstung stellt die unter den gegebenen meteorologischen Bedingungen größtmögliche Verdunstung dar, wobei angenommen wird, dass Wasser unbegrenzt zur Verfügung steht. Sie wird aus gemessenen meteorologischen Werten bestimmt. Die potentielle Verdunstung kann man in potentielle Evaporation, potentielle Transpiration und die potentielle Evapotranspiration unterteilen.
Die reale Verdunstung ist die Verdunstung von Oberflächen bei gegebenen meteorologischen Umständen bei dem tatsächlichen Wasservorrat. Hier unterscheidet man zwischen realer Evaporation, realer Transpiration und realer Evapotranspiration.
(MATTHEß und UBELL, 1983)

3.5.2. Evaporation

Die Evaporation ist die Verdunstung von unbewachsenen Oberflächen, also ohne Beteiligung von biotischen Prozessen (DVWK/Schriften, 1990).
Sie ist nicht nur von meteorologischen Faktoren, sondern in hohem Maße auch von Bodeneigenschaften, wie Wärmespeicherfähigkeit oder Wasserhaltevermögen, abhängig. Ein hoher Wassergehalt im Boden führt zu einer höheren Evaporation.
In tieferen Schichten des Bodens findet Wasserbewegung in flüssiger Phase statt. Dies dient zum Ausgleich der Verdunstung an der Bodenoberfläche, damit diese nicht austrocknet.
In Gebieten mit hohen Grundwasservorräten wird besonders viel Wasser verdunstet.
(HARTGE und HORN, 1999)
Bei Sandböden, die große Poren haben und daher sehr wasserdurchlässig sind, bildet sich schnell eine trockene Oberflächenschicht wodurch sie dann leicht durch Winderosion abgetragen werden können (DVWK/Schriften, 1990).

3.5.3. Transpiration

Die Transpiration ist die Abgabe von Wasserdampf durch Pflanzen in die Atmosphäre. Ihre Hauptaufgabe liegt darin dem Überhitzen der Pflanzenorgane bei Sonneneinstrahlung entgegenzuwirken.
Das Wasser wird durch die Wurzeln aus dem Boden aufgenommen und wird dann durch das Gefäßsystem der Pflanze transportiert. Am Ende des Kreislaufs verdampft das Wasser aus den Spaltöffnungen der Blätter - siehe Abbildung 6 (MATTHEß und UBELL, 1983).

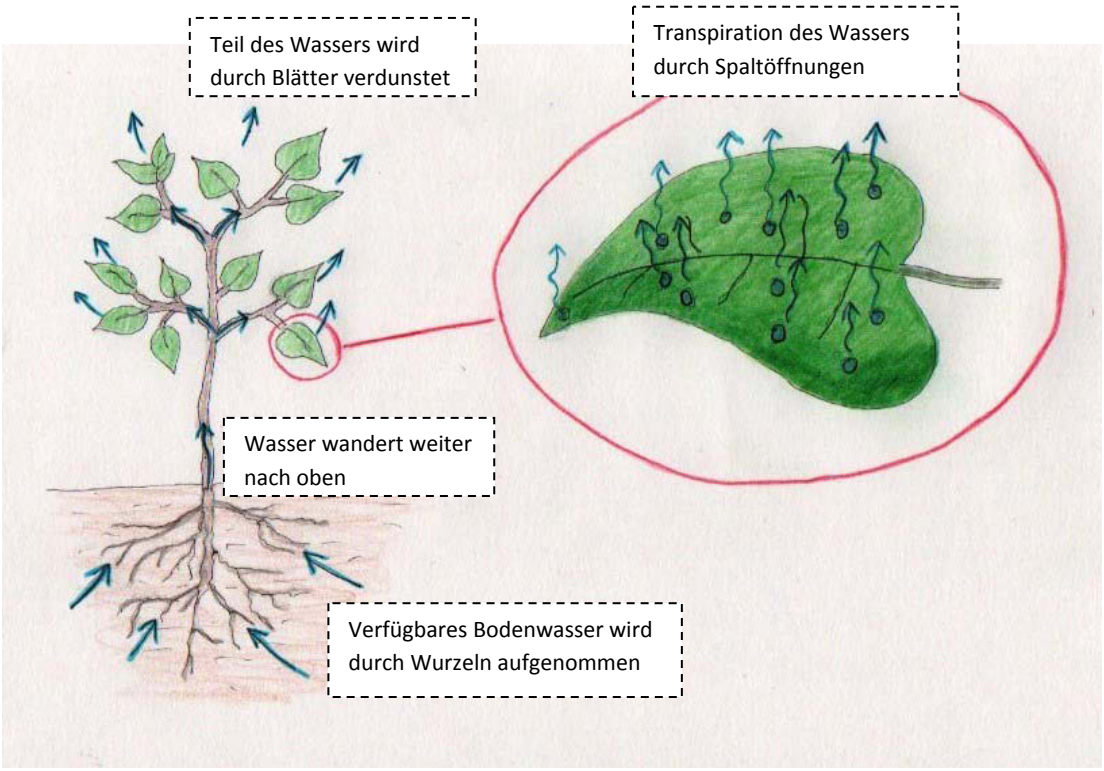

Abbildung 6: Transpiration (modifiziert nach KIKIUTA, S. 2008, Wasserhaushalt der Pflanzen)

Hauptaufgaben des Wassers in der Pflanze (KIKUTA, 2008):

- Transport von gelösten Nährstoffen
- Bildung von Zellen
- Aufrechterhalten des Turgordrucks innerhalb der Zellen
- Abkühlung durch Transpiration

Die Anzahl und Dichte der Spaltöffnungen ist Art-spezifisch. Bei Licht öffnen sich diese Spaltöffnungen und bei Nacht, bei zu wenig Wasserzufuhr oder zu niedrigen Temperaturen schließen sie sich. Nur wenige Pflanzen transpirieren auch in der Nacht und selbst dann nur sehr schwach. Meteorologische Faktoren wie die Sonneneinstrahlung, die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit oder die Sonnenscheindauer beeinflussen die Transpiration der Pflanze.
Die Transpirationshöhe hängt aber auch vom Wasserbedarf der einzelnen Pflanzenarbeiten ab. Eine maximale Transpiration tritt lediglich bei geringer Wasserspannung (ausreichendem Wasserangebot) ein.
Pflanzen können nur einen bestimmten Wasservorrat nutzen. Dieser wird von dem permanenten Welkepunkt begrenzt, der in Kapitel 3.3.7.2 Bodenkennwerte des Wasserhaushalts bereits erläutert worden ist. Steigt der Lösungsinhalt des Wassers sinkt, im Normalfall der Bedarf an Wasser für die Pflanze.

Pflanzen entziehen dem unterirdischen Wasservorrat im Normalfall deutlich mehr Wasser als die direkte Bodenevaporation, da ihre Wurzeln oft viele Meter tief in den Boden reichen, während die Evaporation bei Sandböden nur im obersten Meter und bei Lehmböden bis zu 3 Metern wirksam ist.
Wird der Wasserentzug der Pflanze im Hauptwurzelraum nicht durch Niederschlag oder Grundwasser ausgeglichen, steigt die Bodenwasserspannung in der unmittelbaren Wurzelumgebung. Je trockener der Boden ist, umso höher ist die Saugspannung.
Die Wasserleitfähigkeit des Bodens sinkt und dies führt zu einer Verringerung der Wassernachlieferung an die Wurzeln.
(MATTHEß und UBELL, 1983)

Ein kleiner Teil des Niederschlags bleibt als Rückstand auf den Pflanzenteilen liegen, gelangt nicht zu Boden und verdunstet. Diese Verdunstung wird Interzeptionsverdunstung (siehe Abbildung 7) genannt und macht nur einen geringen Teil der Verdunstung aus.
Die Intensität der Interzeptionsverdunstung ist jedoch abhängig von Dauer, Höhe, Intensität und der zeitlichen Verteilung des Niederschlags sowie vom Wind und von den Eigenschaften der Vegetation *(*NÜTZMANN, 2002*).*

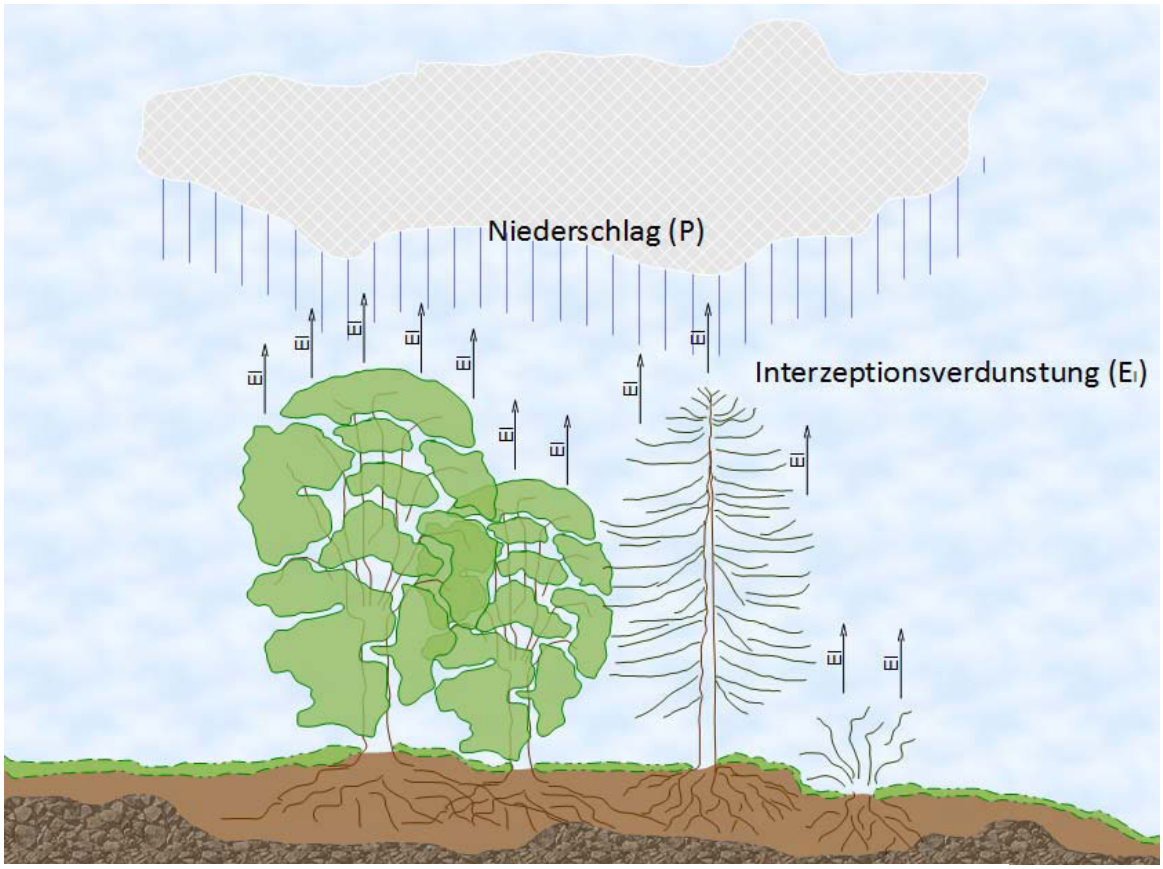

Abbildung 7: Interzeptionsverdunstung

3.5.4. Evapotranspiration

Die Gebietsverdunstung von bewachsenem Boden bezeichnet man als Evapotranspiration. Wasser wird hierbei unter Zufuhr von Energie in Wasserdampf umgewandelt und an die Atmosphäre abgegeben.
Die Evapotranspiration ergibt sich aus dem Zusammenspiel von Evaporation, Transpiration und zu einem kleinen Teil durch die Interzeptionsverdunstung. Diese drei Vorgänge laufen bei bewachsenen Böden parallel nebeneinander ab.

$$ET_a = E_a + E_i + T_a$$

ETa tatsächliche Evapotranspiration [mm]
Ea Evaporation [mm]
Ei Interzeptionsverdunstung [mm]
Ta Transpiration [mm]

Wie schon in Kapitel 3.5.1 potentielle und reale Verdunstung erwähnt, kann man die Evapotranspiration in reale (Et_a) und potentielle Evapotranspiration (ET_p) unterteilen.
Die reale Evapotranspiration gibt die tatsächliche Verdunstung einer bewachsenen Fläche unter Berücksichtigung der physikalischen und biologischen Beschränkungen des Wasservorrats wider.
Bei der potentiellen Evapotranspiration wird angenommen, dass der Wasservorrat unbegrenzt ist. Es wird hierbei die maximal mögliche Verdunstung anhand klimatischer Daten wie Temperatur, Strahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag berechnet.
(NÜTZMANN, 2002)

Folgende Tabelle zeigt eine Aufteilung der Evapotranspiration ET von Beständen in Bodenverdunstung E_B, Interzeption E_I und Transpiration E_T (Angaben in %) auf (NÜTZMANN, 2002):

Tabelle 1: Anteile von Bodenverdunstung, Interzeption und Transpiration bei verschiedenen Beständen

	E_B	E_I	E_T
Wald	10	30	60
Grünland	25	25	50
Ackerkulturen	45	15	40
Brachland	100	-	-

Es lässt sich aus der Tabelle erkennen, dass bei Wäldern eine höhere Transpiration und Interzeptionsverdunstung im Vergleich zu Grasland und Ackerland stattfindet. Die Bodenverdunstung ist hier nur gering, da durch die dichten Baumkronen deutlich weniger Niederschlag zu Boden gelangt als bei Ackerland.

3.6. Bestimmung der Verdunstung

Kenntnisse über die Verdunstung sind für viele wissenschaftliche Bereiche, wie die Ingenieurbiologie, von großer Bedeutung. Die quantitative Erfassung ist jedoch meist sehr schwierig, da eine direkte Messung der Gesamtverdunstung nicht möglich ist.
Aus diesem Grund wird versucht die einzelnen Komponenten der Verdunstung getrennt zu messen (MATTHEß und UBELL, 1983).

Folgende Verfahren kann man in Methoden zur Ermittlung der Verdunstung unterteilen:
(DVWK Merkblätter, 1996)

- direkte Messverfahren
- indirekte Messverfahren
- Berechnungsverfahren

Bei direkten Messmethoden können Ungenauigkeiten auftreten, da bereits die Aufstellung und der Einsatz der Geräte die natürlichen Verhältnisse deutlich ändern können.
Bei den meisten Messgeräten wird nicht die Verdunstung direkt, sondern ein spezielles dazugehöriges Verdunstungsvermögen gemessen.

Indirekte Messungen erfordern einen hohen Aufwand, da die Messungen an einzelnen Messpunkten erfolgen.
Die Verdunstung wird mit Hilfe verschiedener Beziehungen, wie den Wirkungszusammenhang zwischen den direkt zu messenden meteorologischen Größen und dem Wasserdampftransport, näherungsweise bestimmt.

Als Alternative zur Messung der Verdunstung gibt es eine Vielzahl an Berechnungsverfahren. Für die rechnerische Bestimmung sind Klimadaten wie Strahlung, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer, Luftdruck, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Bewölkung notwendig.
Die Berechnungsverfahren unterscheiden sich je nach Art der verdunstenden Fläche in Verfahren für Wasser-, Land und Pflanzenoberflächen. Bei bewachsenen Flächen kommen Verfahren zur Berechnung der potentiellen beziehungsweise realen Evapotranspiration zum Einsatz. Hier ist als spezieller Parameter der wechselnde Pflanzenbedeckungsgrad zu berücksichtigen (MATTHEß und UBELL, 1983).

3.6.1. Messung der Evaporation

Ein geläufiges Verfahren zum Messen der Evaporation stellen Verdunstungskessel dar. Bei speziellen Untersuchungen werden Evaporimeter, Atmometer oder die WILDSCHE Waage verwendet. Auf die Messung der Evaporation soll im Zuge dieser Arbeit jedoch nicht genauer eingegangen werden.

3.6.2. Messung der Transpiration

Die Bestimmung der Transpiration als Einzelgröße ist nur schwer möglich, weshalb sie meist mit der Evaporation als Evapotranspiration erfasst wird.
Eine Möglichkeit zur Ermittlung der Transpiration ist den Massenverlust des durch die Pflanze transpirierten Wassers zu bestimmen. Die Wasserabgabe abgepflückter Blätter (Transpiration) kann mit Hilfe von Präzisionswaagen gemessen werden. Die Messung sollte jedoch in den ersten zwei Minuten nach dem Pflücken erfolgen, da sich danach die Spaltöffnungen schließen. Die Messungen erfolgen in verschiedenen Wachstumsphasen und bei unterschiedlichen Wetterbedingungen.
Ein Problem bei diesem Messungsverfahren ist jedoch, dass von sehr kurzen Messzeiten auf ein ganzes Jahr und dass von einer kleinen Blätterprobe auf den gesamten Bestand geschlossen wird. Es werden nur relative Werte geliefert die für eine Wasserbilanzierung nicht unbedingt verwertbar sind (DVWK Merkblätter 238, 1996).

3.6.3. Messmethoden der Evapotranspiration

3.6.3.1. Lysimeter

Lysimeter sind in der Einrichtung aufwendige jedoch im Betrieb überschaubare Messgeräte, die man vielseitig anwenden kann, wie zum Beispiel zur Bestimmung der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit von Bodenart und Pflanzenbewuchs. Je nach ihrer Ausstattung ist es möglich bestimmte Wasserhaushaltsgrößen zu messen. Mit einem Lysimeter lässt sich die Verdunstung von festen Erdoberflächen mit oder ohne Bewuchs messen. Sie dienen zur Untersuchung von Verdunstung und des Bodenwasserhaushalts. Die Verdunstung wird hierbei als Restglied der Wasserbilanzgleichung berechnet, nachdem alle anderen Größen gemessen sind. Bei dem Einbau eines Lysimeters ist es wichtig, die Standortverhältnisse so wenig wie möglich zu verändern. Lysimeter haben eine begrenzte Bautiefe und dienen daher nur dem Erfassen des Wasserhaushaltes von Bodenschichten nahe der Erdoberfläche. Der Lysimeterbehälter ist ein abgegrenztes System, welches an den Seitenwänden und am Boden wasserundurchlässig ist und indem sich ein monolithischer oder eingefüllter Bodenkörper befindet. Sickerwasser wird am Behälterboden abgelassen und gemessen (MATTHEß und UBELL, 1983; DVWK Schriften, 1990).

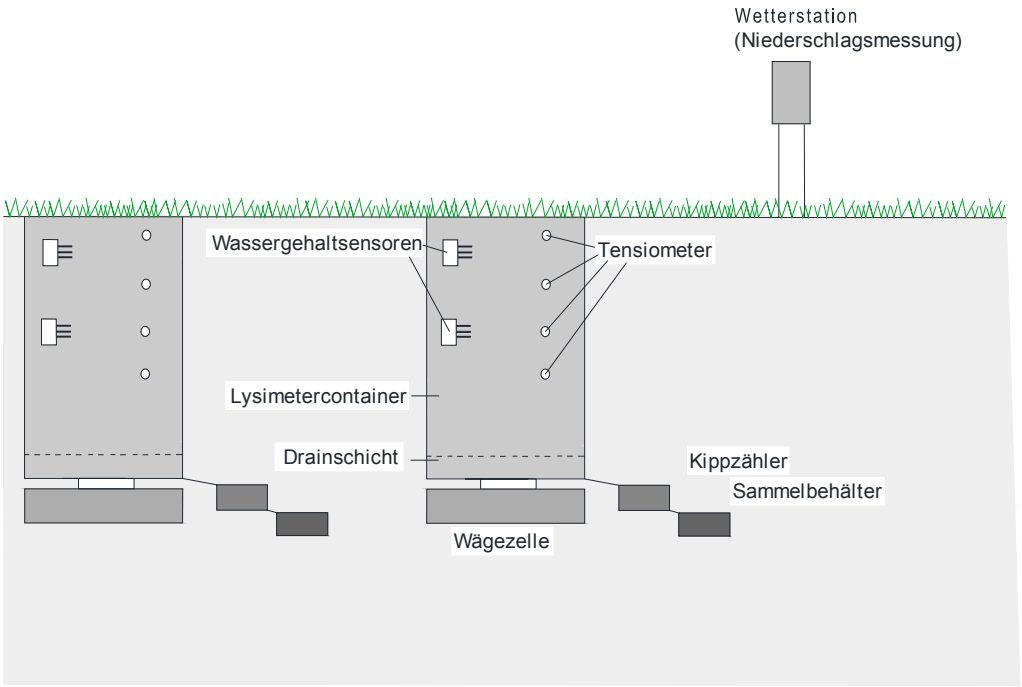

Abbildung 8: Lysimeteranlage

Durch eine simultane Messung des Niederschlages wird die Wasserbilanz für den eingebauten Bodenkörper aufgestellt und dann die Verdunstung seiner Oberfläche ermittelt. Es gibt wägbare und nicht wägbare Lysimeter. Beide Arten haben im Regelfall Messeinrichtungen, wie Waage und Auffanggefäß für das Sickerwasser, unter die Erdoberfläche verlegt damit der Verdunstungsvorgang nicht durch Aufbauten gestört wird. (DVWK Schriften, 1990)

Wird zusätzlich zu Sickerwasser und Bodenwasservorratsänderung der Niederschlag ermittelt, ist es möglich als Restglied der Wasserbilanz die reale Evapotranspiration (ET_a) zu berechnen (NÜTZMANN, 2002).

$$ET_a = P - R_u - R_o - \Delta S \quad in\ mm$$

P Niederschlagshöhe im Erdbodenniveau,
R_o oberirdisch abfließende Wassermenge
R_u Sickerwassermenge aus dem Monolithen
ΔS Wasservorratsänderung

Wenn die oberirdisch-abfließende Wassermenge vernachlässigt werden kann, so ist es möglich die Verdunstung aus der Bodenwasserbilanz abzuschätzen.

$$ET_a = P - S_i - \Delta W_B$$

S_i Sickerwasserabfluss
ΔW_B Bodenwasservorratsänderung

- **nicht wägbare Lysimeter (Versickerungsmesser)**

Mit nicht wägbaren Lysimetern kann man die reale Verdunstung berechnen. Sie eignen sich für eine Bestimmung langjähriger Mittelwerte der Verdunstung.
(DVWK Merkblätter, 1996)
Die Wasservorratsänderung wird gegenüber den anderen Wasserhaushaltsgrößen hierbei vernachlässigt. Auf ein ganzes Jahr betrachtet, geht die Wasservorratsänderung des Bodens gegen Null, weshalb als mittlere Jahressumme der Verdunstung in mm/a gilt:

$$ET_a = P_o - S_i$$

P_o Niederschlag im Bodenniveau
S_i Versickerung

Es wird nur die Sickerwassermenge erfasst, welche am Boden des Lysimeters austritt. Diese wird in einem Behälter aufgefangen und gelangt dann über eine Rohrleitung in den Messschacht. Der gemessene Sickerwasserwert wird nun mit dem gemessenen Niederschlag in Beziehung gesetzt.
(MATTHEß und UBELL, 1983)

- **wägbare Lysimeter**

Um Standortwerte der realen Evapotranspiration zu erhalten, werden meist wägbare Lysimeteranlagen angewendet. Hierbei werden die physikalischen Zusammenhänge der Verdunstung zwischen Kenngrössen des Bodens, der Vegetation und der Meteorologie erfasst. Neben der Versickerung wird auch die Gewichtsänderung des Bodenmonoliths, unter anderem durch mechanische oder hydraulische Wägevorrichtungen, gemessen.
Durch eine Veränderung des Bodenwasservorrats kommt es zur Gewichtsänderung des Lysimeters. Die Bodennwasservorratsänderung kann für Tage, Wochen oder Monate bestimmt werden.
Kann die oberirdisch abfließende Wassermenge vernachlässigt werden, so ergibt sich folgende Gleichung für die Ermittlung der realen Evapotranspiration:

$$ET_a = P\text{-}S_i - \Delta W_B$$

Die Verdunstung ist hier aus der Bodenwasserbilanz abschätzbar.

Wägbare Lysimeter sind jedoch nur anwendbar, solange die Vegetation in dem Bodenmonolith simuliert werden kann. Zur Ermittlung der Verdunstung an Waldstandorten sind sie nicht mehr anzuwenden.

- **Fehlereinflüsse und Genauigkeitsanforderungen von Lysimetern**

Bei der Nutzung von Lysimeteranlagen sind folgende Aspekte zu berücksichtigen (DVWK Merkblätter, 1996):

- Vermeidung eines Staueffekts zur Verhinderung falscher Verdunstungswerte
- Vermeidung von Randeffekten zur Sicherstellung richtiger Messwerte (je größer die Lysimeteranlage ist desto geringer sind die Randeffekte)
- Erhaltung der Bodenstruktur, um natürliche Boden(wasser)verhältnisse möglichst wenig zu beeinflussen
- Vermeidung von Wuchsbeeinflussung um möglichst ähnliche Bedingungen zum umgebenden Bewuchs herzustellen
- Korrektur des Niederschlagfehlers durch Messung im Bodenniveau - so wird der Niederschlagsfehler möglichst klein gehalten

3.6.4. Berechnungsmethoden der Evapotranspiration

Eine direkte Messung der Verdunstung ist meist zeit- und kostenaufwendig. Aus diesem Grund wurden Berechnungsmethoden entwickelt, deren Grundlage auf der Beziehung zwischen Verdunstung und meteorologischen Messgrößen beruht.
Zur Berechnung der Evapotranspiration ist es erforderlich Messungen über Strahlungsbilanz, Bodenwärmestrom, Temperatur und des Dampfdrucks durchzuführen.
Im folgenden Text sollen nun einige empirische Verfahren zur Berechnung der Evapotranspiration näher beschrieben werden.
(DVWK Schriften, 1990)

3.6.4.1. HAUDE - Gleichung

Sie ist ein Verfahren zur Berechnung der Monatssumme an potentieller Evapotranspiration.
Für die Haudeformel benötigt man einen täglichen Messwert (um 14 Uhr) der Lufttemperatur und –feuchte. Es wird dann das Sättigungsdefizit ermittelt. Dieses kennzeichnet die Aufnahmefähigkeit der Luft für Wasserdampf.
Da jedoch nur eine Einflussgröße der Verdunstung gemessen wird, sind die Ergebnisse oft sehr ungenau (DVWK Merkblätter, 1996).

Die Verdunstung wird folgendermaßen berechnet (SCHÖNINGER und DIETRICH, 2008):

$$ET_{pHaude} = f \cdot (e_{s14} - e_{14}) \, [mm/d]$$

f empirischer (konstanter) monatlicher Pflanzenfaktor
e_s temperaturabhängiger Sättigungsdampfdruck, gemessen um 14h [hPa]
e Dampfdruck, gemessen um 14h [hPa]

Der Sättigungsdampfdruck ergibt sich aus der Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit um 14 Uhr (= T_{max}).

$$e_s = 6,09 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_{14}}{237,3+T_{14}}}$$

Der Dampfdruck e_{14} wird folgendermaßen mit Hilfe der Luftfeuchtigkeit bestimmt:

$$e_{14} = e_{s14} \cdot (RH/100)$$

RH relative Luftfeuchte

3.6.4.2. Potentielle Verdunstung nach Penman-Monteith

Dies ist eine Methode zur Verdunstungsberechnung und basiert auf dem Penman Verfahren, bei dem sich über Vereinfachung der Tageswerte die potentielle Evapotranspiration aus Klimadaten ungefähr berechnen lässt.
Beim daraus erweiterten Penman-Monteith-Modell wird hingegen zusätzlich der Einfluss verschiedener Landabdeckungen berücksichtigt, wodurch eine sehr genaue Berechnung der potentiellen Evapotranspiration möglich ist. Aus diesem Grund ist die Berechnung sehr aufwendig. Die Formel, bei der Strahlung, Temperatur, Wind und spezifische Pflanzenparameter berücksichtigt werden, ist folgendermaßen definiert:
(FSU Jena, 2005)

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

λET_{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	Dichte der Luft	[kg/cm³]

C_p	spezifische Wärme der feuchten Luft	[kJ kg C°]
e_a	Sättigungsdampfdruck	[hPa]
e_d	aktueller Dampfdruck	[hPa]
$(e_a - e_d)$	Sättigungsdefizit	[hPa]
Δ	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	[hPa C°]
r_a	Aerodynamischer Widerstand	[s/m]
r_c	Widerstand innerhalb der Pflanzendecke	[s/m]
ϒ	Psychrometerkonstante	[hPa C°]
λ	Latente Verdunstungsenergie	[kJ kg]

*Gras – Refere*nzverdunstung

Laut FOA (Food and Agriculture Organisation of the United Nations) empfiehlt sich die Einführung einer Referenzoberfläche zum Berechnen einer weitgehend vergleichbaren Referenzverdunstung. Als Referenzoberfläche wird Gras mit bestimmter Länge (meist 12cm) angenommen.

Will man dann die Evaporation von Landflächen mit anderem Bewuchs ermitteln, kann man dies durch Ableiten eines Vegetationskoeffizienten kc aus der Gras-Referenzverdunstung.

Bei Beständen mit großen Blattflächenindex und guter Wasserversorgung liegt die reale Evapotranspiration oberhalb, bei einer kurzen Grasdecke mit schlechter Wasserversorgung hingegen unterhalb der Gras-Referenzverdunstung.

Setzt man nun die Vorgaben für die Gras-Referenzverdunstung in die Penman-Monteith-Gleichung ein, ergibt sich (SCHÖNINGER und DIETRICH, 2008):

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

R_n	Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche	[W/m²]
G	Bodenwärmestrahlung	[W/m²]
s	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve	[hPa/K]
γ	Psychrometerkonstante	[hPa/K]
es(T) - e	Sättigungsdefizit, abhängig von Lufttemperatur T und Dampfdruck e	[hPa]
u2	Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe	[m/s]

Zur Lösung dieser Gleichung können Softwareprograme eingesetzt werden, wobei als minimal erforderliche Messdaten Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung anzugeben sind. Je mehr der oben angeführten Messwerte vorhanden sind, desto genauer wird das Ergebnis.

4. Methodik

In folgendem Abschnitt werden der Aufbau sowie die Eigenschaften der 2009 erbauten Lysimeter - Versuchsanlage in Deutsch – Wagram (Niederösterreich) genauer beschrieben.

4.1. Lysimeteranlage

Im Frühjahr 2009 wurde in der Versuchsanlage in Deutsch Wagram mit der Planung für die Errichtung einer Lysimeteranlage begonnen. Ihr Zweck galt der Untersuchung der Wasserverhältnisse des Dammbodens sowie dessen Bewuchses. Sie wurde auf mindestens 3 Jahre ausgerichtet. Dabei wurden zwei verschiedene Bepflanzungen und eine unbewachsene Fläche (als Nullvariante) eingesetzt. Im Vordergrund steht die Untersuchung des Bodenwasserhaushaltes (Wassergehalt, Saugspannung) in Abhängigkeit der Bewuchsform.
Insgesamt wurden 20 Versuchsbehälter errichtet, wobei drei davon (von jeder Bewuchsvariante eine) mit Messgeräten ausgestattet und mit einem Datenlogger verbunden sind. Die 17 restlichen (nicht mit Messgeräten ausgestattete) Lysimeter haben Auffangbehälter zur Ermittlung der Sickerwassermenge und dienen anderen Versuchen:
So wurden im Frühjahr (Anfang März 2010) und Herbst (Ende September 2010) Wurzeluntersuchungen durchgeführt, wofür zwei mit Gräser und Kräuter bewachsene sowie zwei mit Weiden bewachsene Lysimeter zerstört werden mussten.

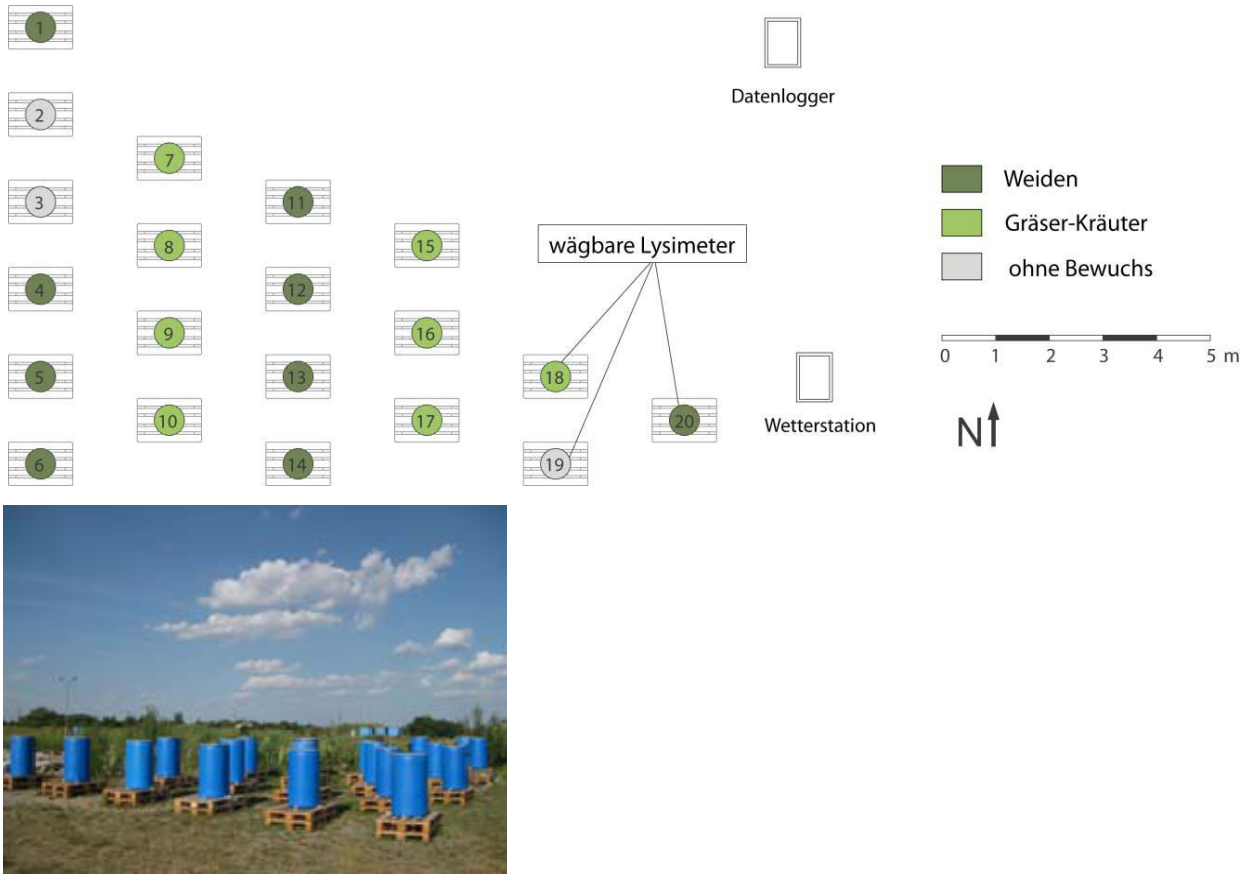

Abbildung 10: Anordnung und Einteilung der Lysimeter (Michael OBRIEJETAN 2010)

4.2. Aufbau der Versuchsbehälter

Als Versuchsbehälter wurden 208 Liter fassende Kunststofffässer verwendet, die eine Höhe von 96 cm und einen Durchmesser von 55,4 cm aufweisen. Jedes der nicht mit dem Datenlogger verbundenen Fässer wurde mit einer Abflussvorrichtung mit Wasserauffangbehälter ausgestattet, um regelmäßige Messungen der Sickerwassermenge durchführen zu können.
Die Versuchsbehälter wurden von 1 – 20 nummeriert, wobei die Nummern 18-20 wägbare Lysimeter sind.
acht Lysimeter wurden mit einer Gräser und Kräutermischung und neun mit einer Weidenspreitlage bepflanzt. Die restlichen drei blieben unbepflanzt. Sie dienen als Vergleich der Bodenwasserverhältnisse im Gegensatz zu den begrünten Lysimetern.

Der Bodenaufbau sowie die Begrünung sind dieselbe wie bei den Hochwasserschutzdämmen der Anlage.

Abbildung 11: Versuchsbehälter Weidenspreitlage (Deutsch – Wagram, 22.09.2009)

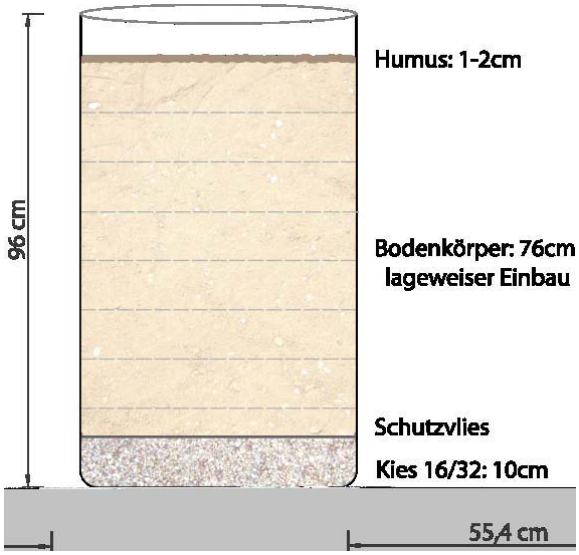

Abbildung 12: Schichtaufbau des Bodens (Michael OBRIEJETAN 2010)

Alle Fässer wurden mit dem gleichen Bodenmaterial (gemischtkörniger Boden - Sand, stark schluffig, feinkiesig, schwach mittelkiesig) und der gleichen Dichte befüllt und mit einer 10 cm starken Drainschicht aus Kies, mit der Korngröße 16/32, im untersten Bereich der Fässer zur Entwässerung versehen. Auf diese Kiesschicht wurde ein Schutzvlies zum Zurückhalten von feinem Bodenmaterial aus den oberen Schichten aufgebracht.
Das Bodenmaterial wurde schichtweise eingebaut und mit Hilfe einer dynamischen Lastplatte verdichtet, wobei vorher die maximal mögliche Verdichtung über einen Proctorversuch ermittelt worden ist.

Abbildung 13: Abwägen der Erdmasse (Deutsch – Wagram, 15.6.2009)

Abbildung 14: Kiesschicht mit Schutzvlies (Deutsch – Wagram, 14.09.2010)

Abbildung 15: unverdichtete Bodenschicht (Deutsch – Wagram, 15.6.2009)

Abbildung 16: durch dynamische Lastplatte verdichtete Bodenschicht (Deutsch – Wagram, 15.6.2009)

Der genaue Aufbau der Anlage sowie der Lysimeter kann in der Diplomarbeit Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen – Einfluss von Bewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen von Michael OBRIEJETAN 2010, nachgelesen werden.

4.3. Messtechnik

Neben der Wassersickermenge und anderen grundlegenden Daten zur Ermittlung der Evaporation wurden drei Behälter, jeweils einer mit Gräser - Kräutervegetation, einer mit Weiden bewachsenen und ein unbepflanzter, zusätzlich mit speziellen Messgeräten ausgestattet.
Diese dienen der Messung des Wassergehalts, der Wasserspannung und der Temperatur der Lysimeter in verschiedenen Lagen. Alle zehn Minuten werden die Daten gemessen und anschließend an die Universität für Bodenkultur weitergeleitet.

4.3.1. Wassergehaltssensoren

Um den Wassergehalt bestimmen zu können wurden Sensoren der Firma Hydra-Probe Stevens in den Bodenkörper der Versuchsbehälter eingebaut. Diese messen den volumetrischen Wassergehalt sowie die Temperatur des Bodens.
Dabei wird die Laufzeit von hochfrequenten elektromagnetischen Wellen zwischen mindestens zwei Elektroden gemessen. Wie schnell sich der elektromagnetische Puls ausbreitet, hängt vom Wassergehalt im Boden ab. Je mehr Wasser sich im Boden befindet, umso höher ist die Leitfähigkeit.

Abbildung 17: Wassergehaltssensor (Deutsch – Wagram, 12.6.2009)

Abbildung 18: Wassergehaltssensor – Lage in Fass (Deutsch – Wagram, 12.6.2009)

4.3.2. Tensiometer

Die frostempfindlichen Tensiometer werden zur Messung der Bodenfeuchte anhand der Saugspannung eingesetzt. Es lässt sich damit das pflanzenverfügbare Bodenwasser ermitteln. Je trockener der Boden ist, umso höher ist die Saugspannung, auch Matrixpotential genannt (siehe Kapitel 3.3.7.1 Potentialkonzept). Durch eine luftdicht abgeschlossene und mit entionisiertem oder destilliertem Wasser gefüllte Keramikzelle erfolgt die Messung. Ein durchsichtiges Rohr dient der Kontrolle des Füllstandes des Tensiometers.

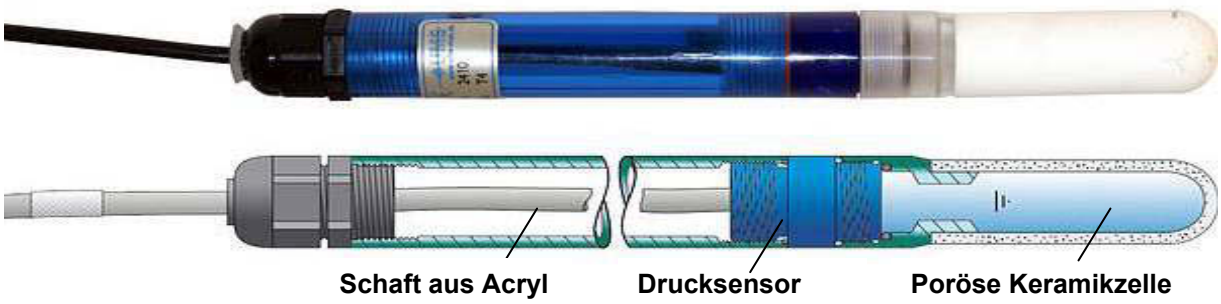

Abbildung 19: Aufbau eines Tensiometers (UMS, 2011)

Trocknet der Boden um die Keramikkerze aus, so geht auch das Wasser in der Keramikkerze so weit zurück, bis ein Gleichgewicht zum umgebenden Bodenwasser besteht. Es entsteht ein Unterdruck, der mittels Drucksensor in Hectopascal (hPa) gemessen wird. Bei den verwendeten T4 Tensiometern liegt der maximale Messbereich der Wasserspannung bei 1000 hPa.

Abbildung 20: Einbau der Tensiometer (Deutsch – Wagram, 10.06.2010)

Abbildung 21: Tensiometer in verschiedenen Schichten (Deutsch – Wagram, 10.06.2010)

4.3.3. Sickerwassermessung

Zur Ermittlung der Sickerwassermenge der drei mit Messgeräten ausgestatteten Fässern, wurden Kippzähler eingesetzt, die eine maximale Durchflussrate von 300 ml/min messen können.
Bei den restlichen Versuchsbehältern wurden einfache Kunststoffkanister zum Auffangen der Sickerwassermenge verwendet. Diese werden regelmäßig ausgeleert um die Wassermenge zu messen.

Abbildung 22: Kippzähler (Deutsch – Wagram, 08.07.2009)

Abbildung 23: Kunststoffkanister zum Ermitteln der Sickerwassermenge (Deutsch – Wagram, 14.9.2010)

4.3.4. Wiegeelektronik

Um das Gewicht der Lysimeter regelmäßig elektronisch zu erfassen, wurden DMS - Wägezellen eingesetzt, wobei die maximale Gebrauchslast bei 600 kg liegt.
Eine Rahmenkonstruktion aus Stahl dient der gleichmäßigen Verteilung der Auflast.

Abbildung 24: DMS-Wägezelle (Firma Bosche, 2011)

Abbildung 25: Rahmenkonstruktion für Wägezelle (BOKU, 02.07.2009)

4.3.5. Wetterstation

Über eine Wetterstation (Abbildung 26) werden die meteorologischen Daten vor Ort aufgezeichnet. Die Messhöhe beträgt circa 1,6 m und ist an der Oberkante der Lysimeter ausgerichtet. Die Wetterstation ist wie die Messgeräte des Lysimeters mit dem Datenlogger verbunden. Alle zehn Minuten misst der Datenlogger (Abbildung 27) meteorologische Werte sowie Daten über die Bodenwasserverhältnisse der Lysimeter und schickt diese dreimal am Tag zum Server an die BOKU. Dort werden alle Daten gespeichert und können jederzeit abgerufen werden.

Abbildung 26: Wetterstation (Deutsch – Wagram, 01.05.2010)

Abbildung 27: Datenlogger (Deutsch – Wagram, 01.05.2010)

Folgende meteorologischen Werte werden regelmäßig gemessen:

- Niederschlag

Der Niederschlag wird über einen Kippwaagenregenmesser erfasst.
Zum Vermeiden von Verstopfungen durch Fremdkörper dient ein Filtereinsatz aus Kunststoff, der regelmäßig gewartet werden muss um Fehler in den Messergebnissen auszuschließen.

- Temperatur und Luftfeuchte

Die Temperatur sowie die relative Luftfeuchtigkeit vor Ort werden über das Vaisala HMP54 gemessen. Ein Strahlungsschutz aus mehreren übereinander liegenden Lamellen dient der Abschirmung der direkten Sonnenstrahlung.

- Windgeschwindigkeit

Um die Windstärke zu ermitteln wurde ein Windgeschwindigkeitsmesser (Anemometer) in die Wetterstation mit eingebaut. Dieser kann maximale Windgeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h messen.

- Strahlung

Das Ausmaß der Sonnenstrahlung wird über einen Pyranometer bestimmt, welches Strahlungswerte zwischen 300 und 1000 nm messen kann.

4.4. Bepflanzungen

4.4.1. Gräser & Kräuter

Für die Begrünung der Versuchsbehälter mit Gräsern und Kräutern im Juni 2009 wurde dieselbe Trockenrasenmischung verwendet wie bei den Versuchsdämmen der Anlage.
Die Saatgutmischung Nr. 14 des Institutes für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur Wien wurde daher in leicht abgewandelter Form eingesetzt.
Bevor das Saatgut mittels Trockensaatmethode ausgebracht wurde, sind die Erdoberfläche gelockert und dann eine 2 cm dicke Humusschicht aufgebracht worden. Die Ansaat der Versuchsbehälter erfolgte im Juni 2009.

Abbildung 29: Aufgetragenes Saatgut (Deutsch – Wagram, 29.06.2009)

Abbildung 28: Gräser und Kräutermischung (Deutsch – Wagram, 01.09.2009)

Die Ansaat der Versuchsbehälter erfolgte am 29.Juni.2009, wobei je Behälter 10,6 g Saatgut ausgebracht wurden. Die Artenzusammensetzung samt prozentuellen Anteilen ist in folgender Tabelle detailliert dargestellt:

Tabelle 2: Saatgutmischung (OBRIEJETAN, 2010)

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%

4.4.2. Weidenspreitlage

Die Weidenspreitlage ist eine ingenieurbiologische Bauweise, die im Normalfall der Sicherung von Flussufern dient.
Abgeschnittene Weidenäste werden hierbei eng nebeneinander entlang einer Uferböschung gelegt. Danach werden diese mittels Draht oder Kokosschnur an in regelmäßigen Abständen in den Boden eingeschlagenen Holzpflöcken niedergebunden. Dies soll den Bodenkontakt für das Austreiben der Weidenäste ermöglichen und diese vor dem Verrutschen schützen. Anschließend werden die Äste mit einer dünnen Humusschicht bedeckt. Bei dem Einsatz von Weidenästen ist es wichtig darauf zu achten, dass die Äste nicht zu alt oder zu dick sind, da sie sonst nicht mehr gut austreiben.
Es wird zwischen Weidenspreitlage längs (Äste liegen längs zur Böschung mit dem abgeschnittenem Ende nach untern) und Weidenspreitlage quer (Äste liegen quer zur Fließrichtung/Böschung) unterschieden (FLORINETH, 2010).

Für das Errichten der Weidenspreitlage auf den Versuchsbehältern wurden wie auf den Dämmen der Versuchsanlage Äste der Purpurweide (*Salix purpurea L.*) eingesetzt.
Die Purpur -Weide ist in Österreich weit verbreitet und die am häufigsten verwendete Weide für Hang- und Böschungssicherungen, da sie eine hohe ökologische Amplitude aufweist und außerordentlich gut vegetativ zu vermehren ist. Abgesehen davon ist sie sehr elastisch und robust gegenüber Überschwemmungen.

Die Weidenäste für die Lysimeteranlage wurden bis zu ihrer Verwendung (ca. 3 Monate) kühl gelagert, weshalb sich bis zum Einbau bereits Wurzelansätze gebildet hatten.
Die Äste wurden dem Fassdurchmesser gerecht zugeschnitten und anschließend auf die gefüllten Fässer nebeneinander aufgelegt. Anschließend wurden sie mit einer 1 cm dicken Humusschicht bedeckt. Diese Humusschicht dient dem Schutz der Äste vor Austrocknung und der Wurzelbildung.

Abbildung 30: Eingebrachte Weidenäste (Deutsch – Wagram, 22.6.2009)

Abbildung 31: Aufbringen der Humusschicht (Deutsch – Wagram, 22.6.2009)

4.5. Vegetationsaufnahmen

Zur Ermittlung verschiedener Einflussgrößen der Vegetation wurden an den Versuchsfässern Vegetationsaufnahmen durchgeführt. Mit folgenden Methoden wurden anschließend bestimmte Vegetationsparameter wie der Zuwachs und das Entwässerungsvermögen der Weiden ausgewertet:

- Messung der Sprosslängen (Weiden)
- Messung des Basisdurchmessers der Sprosse (Weiden)
- Ermittlung der Biomasse (Weidenblätter und –äste) (Weiden)
- Berechnung des Blattflächenindex (Weiden)
- Messung des Wurzelvolumens (Weiden, Gräser und Kräuter)

Einige dieser Vegetationsaufnahmeverfahren wurden auf Teilen der Versuchsdämme ebenfalls durchgeführt und in verfassten Masterarbeit von Jaroslaw LESZCZYNSKI (2011), „Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Weidengehölzen an Hochwasserschutzdämmen“ genauer erläutert.

4.5.1. Oberirdische Biomasse

4.5.1.1. Längen – Durchmesser – Verhältnis

Um die Entwicklung der Weiden zu verfolgen wurden Messungen des Durchmessers an der Stammbasis, mittels Schublehre, sowie der Länge, mittels Maßband (siehe Abbildung 32), der einzelnen Weidensprosse, im Frühjahr und im Herbst der ersten zwei Vegetationsperioden (2009,2010) durchgeführt.
Mithilfe der Ergebnisse regelmäßiger Messungen wird die Wuchsleistung der Weiden ermittelt, wodurch man Aufschluss über deren Entwicklungszustand bekommt.

Abbildung 32: Messen der Weidenastlänge (Deutsch – Wagram, 18.9.2010)

Abbildung 33: Messung der Weidendurchmesser (Deutsch – Wagram, 30.06.2010)

4.5.1.2. Biomasse

Durch das Abernten eines mit Weiden sowie eines mit Gräsern und Kräutern begrünten Versuchsbehälters wurde die Biomasse (Menge an organischer Substanz) des jeweiligen Lysimeters bestimmt. Von den abgeernteten Weidensprossen wurden im Labor die Längen und Durchmesser gemessen. Anschließend wurden die Sprosse ihren Durchmessern nach in Klassen von 1-2 mm, 2-3 mm, 3-4 mm, 4-5 mm und 5-6 mm unterteilt und von ihren Blättern getrennt.

Abbildung 35: Bestimmen der Durchmesserklassen (BOKU, 01.09.2010)

Abbildung 34: nach Klassen unterteilte Biomasse (BOKU, 01.09.2010)

In Folge wurde das Gewicht der in unterschiedliche Klassen geteilten Biomasse bestimmt und anschließend in den Trockenschrank gebracht und bei 105 C° getrocknet.

Abbildung 36: Abwiegen der Durchmesserklassen (BOKU, 01.09.2010)

Abbildung 37: Weidenäste – unterteilt in Durchmesserklassen (BOKU, 01.09.2010)

4.5.1.3. Blattflächenindex (Leaf area Index)

Über den Blattflächenindex lässt sich das Verhältnis der Blattoberfläche eines Bestandes zur Bestandsgrundfläche berechnen. (KNORR und WEISE, 2000)

BFI = Blattfläche des Bestandes / Grundfläche des Bestandes [m^2/m^2]

Vor dem Trocknen der Blätter wurden aus jeder Klasse Stichproben zur Bestimmung des Blattflächenindex entnommen. Diese Blätterproben wurden dann auf einen Scanner gleichmäßig verteilt und anschließend eingescannt. Danach wurde mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms die tatsächliche Blattfläche der Stichprobe ermittelt. Das Gesamtgewicht der Blätter wurde vorher klassenweise abgewogen, um so die Stichprobe auf die gesamte Klasse hochrechnen zu können und den Blattflächenindex zu ermitteln.

Abbildung 38: Abwiegen der Stichprobe (BOKU, 01.09.2010)

Abbildung 39: Einscannen der Stichproben (BOKU, 01.09.2010)

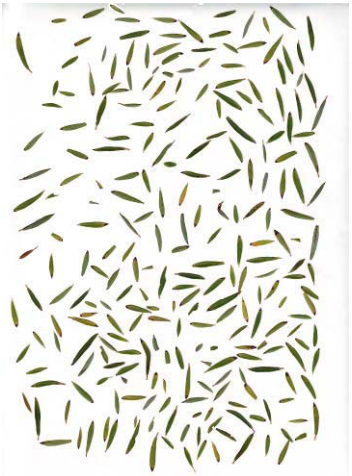

Abbildung 40: am Computer bearbeitete Stichprobe (BOKU, 01.09.2010)

4.5.2. Unterirdische Biomasse

4.5.2.1. Wurzelvolumen

Zur Überprüfung der Entwicklung der Wurzeln wurden Aufnahmen der unterirdischen Biomasse durchgeführt. Um die Entwicklung über eine Vegetationsperiode messen zu können, wurden 2 Aufnahmen, eine im Mai 2010 (nach 11 Monaten Wachstum) und eine im September 2010 (nach 15 Monaten Wachstum) vorgenommen.
Hierfür wurden jeweils ein Weiden- und ein Gräser und Kräuter Lysimeter aufgeschnitten, um anschließend die Erdmasse samt Wurzeln abzutragen.
Für die Messung des Wurzelvolumens im Mai 2010 wurden die Lysimeter 1 (Weiden) und 17 (Gräser und Kräuter) für die Messung im September 2010 die Lysimeter 6 (Weiden) und 16 (Gräser und Kräuter) aufgeschnitten. Insgesamt wurden also vier Lysimeter abgebaut.

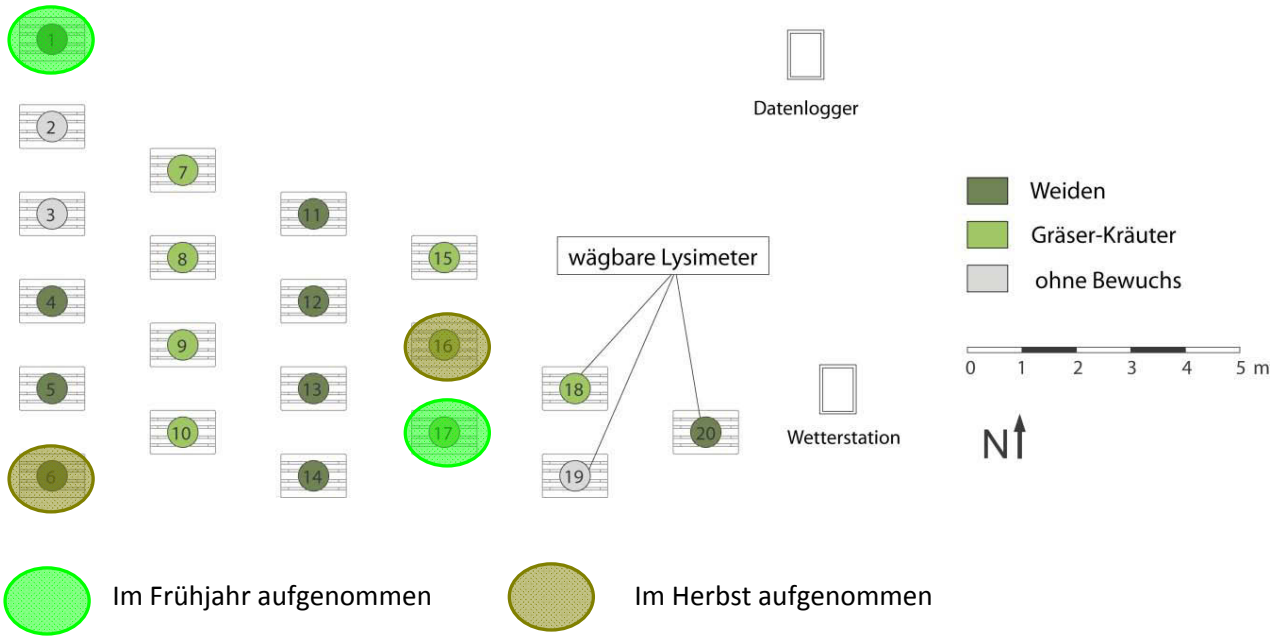

Abbildung 41: Darstellung der aufgeschnittenen Fässer (verändert nach OBRIEJETAN, 2010)

4.5.2.2. Abtragen der Wurzeln

Bevor die Erdmasse vom Lysimeter abgetragen wurde, musste die oberirdische Biomasse der jeweiligen Versuchsfässer abgeerntet werden.

Abbildung 42: Abtragung Weidensprosse (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 43: Abtragen der Gräser und Kräutermischung (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Anschließend wurde der Versuchsbehälter in Schichten von 5 cm unterteilt (Abbildung 44) und markiert, um die Fässer dann schichtweise mit Hilfe einer Flex aufzuschneiden (Abbildung 45). So wurden immer 5 cm der Erdmasse samt Wurzeln abgetragen und in Säcke gefüllt. Die Wurzeln wurden dabei schichtweise mit einem scharfen Messer abgetrennt (Abbildung 47).

Abbildung 44: In 5 cm - Schichten gekennzeichnete Behälter (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 45: Aufschneiden der ersten Schicht (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 46: freigelegte oberste Bodenschicht (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 47: Abtragen der Weidenspreitlage (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 48: Weidenäste mit Wurzeln (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 49: In Sack verfüllte Erd- Wurzelschicht (Deutsch - Wagram, 11.05.2010)

Abbildung 50: Beschriften der Säcke (Deutsch – Wagram, 11.05.2010)

Die markierten Säcke wurden anschließend in einem kühlen Raum in der Versuchsanlage bis zum Auswaschen gelagert.

4.5.2.3. Auswaschen der Wurzeln

Aus dem in 5 cm Schichten abgetragenen Erdgemisch mussten nun die Wurzeln ausgefiltert werden. Dies erfolgte über das Auswaschen in einer Wanne. Hierfür wurde jeweils eine Probe in die Wanne geschüttet und dann mit Wasser übergossen.

Abbildung 51: Einschütten der Erdschicht in Wanne (Deutsch - Wagram, 12.05.2010)

Abbildung 52: Füllen der Wanne (Deutsch - Wagram, 12.05.2010)

Da die Wurzeln leichter als das Erdmaterial sind und somit an der Wasseroberfläche aufschwimmen, konnte man so mit einem sehr feinen Sieb die unterirdische Biomasse aussieben. Das Erdmaterial musste wiederholt mit der Hand durchgemischt und wieder gesiebt werden um sicherzustellen, dass der Großteil der Wurzeln entnommen wird.

Abbildung 53: Aussieben der Wurzeln (Deutsch – Wagram, 12.05.2010)

Abbildung 54: Sieb mit Wurzeln (Deutsch – Wagram, 12.05.2010)

Das ausgesiebte Gemisch aus Wurzeln und anderen Materialien wurde dann in kleine Säckchen gefüllt, beschriftet und anschließend ins Labor zur Weiterverarbeitung gebracht.

Abbildung 55: Ausgesiebtes Wurzelgemisch (BOKU, 14.05.2010)

Abbildung 56: Befreien der Wurzeln von Verunreinigungen (BOKU, 14.05.2010)

4.5.2.4. Aussortieren der Wurzeln

Um genaue Ergebnisse zu erreichen, mussten die Wurzeln im Labor noch per Pinzette von dem toten Wurzelmaterial und anderen Unreinheiten, wie kleinen Plastikteilchen vom Aufschneiden des Fasses, getrennt werden. Dazu wurde Wasser in eine Schüssel gefüllt und dann immer jeweils kleine Teile der Proben hinzugefügt. Die Wurzeln wurden dann mittels Pinzette aussortiert. Wenn das Wasser zu verunreinigt war, wurde die Schüssel ausgewaschen und mit frischem Wasser gefüllt. Die reine unterirdische Biomasse der Weidensträucher wurde anschließend wieder in Säckchen gefüllt.

Abbildung 57: Reine Wurzelmasse wird mittels Pinzette aussortiert (BOKU, 19.09.2010)

Abbildung 58: Verunreinigtes Wasser (BOKU, 14.05.2010)

4.5.2.5. Messen des Wurzelvolumens

Von dem sauberen Wurzelmaterial jeder Schicht wurde nun das Volumen mittels eines säulenförmigen Messbehälters ermittelt. Der Messbehälter wurde hierzu mit einer bestimmten Menge Wasser befüllt. Anschließend wurde immer jeweils eine Wurzelprobe dem Messglas beigefügt. Durch die Menge, um die das Wasser steigt, konnte dann auf das Volumen der Wurzelmasse geschlossen werden. Nach der Bestimmung des Volumens wurden die Wurzeln in kleine Becher gefüllt, verschlossen und eingefroren um später die geplanten Wurzelscans mit dem Scanprogramm WinRhizo durchzuführen.

Abbildung 59: Messen der Wurzelproben (BOKU, 28.05.2010)

Abbildung 60: abgefüllte Wurzelproben (BOKU, 28.05.2010)

4.5.3. Zeitlicher Ablauf der Arbeiten

Tabelle 3: Zeitlicher Ablauf der Arbeiten zweite Vegetationsperiode (2010)

Mai 2010		
01.05.	Entnahme der oberirdischen Biomasse	Lysimeter 17 – Gräser und Kräuter
	Entnahme der unterirdischen Biomasse	Lysimeter 17 – Gräser und Kräuter
11.05.	Entnahme der oberirdischen Biomasse Entnahme der unterirdischen Biomasse	Lysimeter 1 - Weiden Lysimeter 1 - Weiden
12.05.	Auswaschen der Wurzelmasse	Lysimeter 17 – Gräser und Kräuter
14.05.	Aussortieren der Wurzeln	Lysimeter 17 – Gräser und Kräuter
18.05.	Messung des Wurzelvolumens	Lysimeter 17 – Gräser und Kräuter
25.05.	Auswaschen der Wurzelmasse	Lysimeter 1 - Weiden
26.05.	Aussortieren der Wurzeln	Lysimeter 1 - Weiden
28.05.	Messung des Wurzelvolumens	Lysimeter 1 - Weiden
Juni 2010		
25.06.	Messung von Sprosslängen und -durchmesser	Lysimeter 20 – Weiden
Sep. 2010		
01.09.	Entnahme der oberirdischen Biomasse Aufnahme der Sprosslängen und - Abwiegen der oberirdischer Biomasse Bestimmen der Blattfläche – Blattflächenindex	Lysimeter 6 - Weiden Lysimeter 6 - Weiden Lysimeter 6 - Weiden Lysimeter 6 - Weiden
09.09.	Messung von Sprosslängen und -durchmesser	Lysimeter 20 - Weiden
14.09.	Entnahme der unterirdischen Biomasse	Lysimeter 6 - Weiden
15.09.	Entnahme der unterirdischen Biomasse	Lysimeter 16 - Gräser und Kräuter
16.09.	Auswaschen der Wurzelmasse	Lysimeter 6 - Weiden
18.09.	Aussortieren der Wurzeln	Lysimeter 6 - Weiden
19.09.	Aussortieren der Wurzeln	Lysimeter 16 - Gräser und Kräuter
23.09.	Messung des Wurzelvolumens	Lysimeter 6 und 16

5. Ergebnisse

5.1. Vegetationsentwicklung

Die Entwicklung der bepflanzten Fässer wurde regelmäßig fotografisch dokumentiert. Zusätzlich wurden Messungen der Biomasse, Längen-, Sprossverhältnisse und der Wurzelmasse vorgenommen. Die Biomasse sowie das Längen- Sprossverhältnis wurden im Vorjahr 2009 ebenfalls bestimmt. Die Ergebnisse dieser zwei Parameter können also mit den Vorjahresdaten verglichen werden. Die Wurzelmasse hingegen wurde zum ersten Mal aufgenommen. Somit ist kein Vergleich mit dem Vorjahr möglich.
Im Allgemeinen kann man festhalten, dass sich beide Begrünungen (Weiden sowie Gräser und Kräuter) in den zwei Vegetationsperioden sehr gut entwickelt haben.

5.1.1. Weidenspreitlage

Aus der Weidenspreitlage der Fässer trieben, nach Inbetriebnahme im Juni 2009, schon nach wenigen Tagen die ersten Weidensprosse aus. In den ersten zwei Vegetationsperioden zeigten die Weiden ein deutliches Wachstum. Sie haben sich sehr gut entwickelt.

Abbildung 63: Weidenspreitlage nach 1 Monat (Deutsch - Wagram, 16.07.2009)

Abbildung 64: Weidenspreitlage nach 3 Monaten (Deutsch – Wagram, 01.09.2009)

Abbildung 62: Weidenspreitlage nach 10 Monaten (Deutsch – Wagram, 16.04.2010)

Abbildung 61: Weidenspreitlage nach 15 Monaten (Deutsch – Wagram, 01.09..2010)

5.1.1.1. Durchmesser- Längen - Verhältnis

Im Frühjahr (Mai, Juni 2010) sowie Herbst (September 2010) wurden jeweils zwei Messungen von Durchmesser und Länge der Weidensprosse durchgeführt.
Von Lysimeter 6 wurde im September 2010 die oberirdische Biomasse entnommen und vermessen:

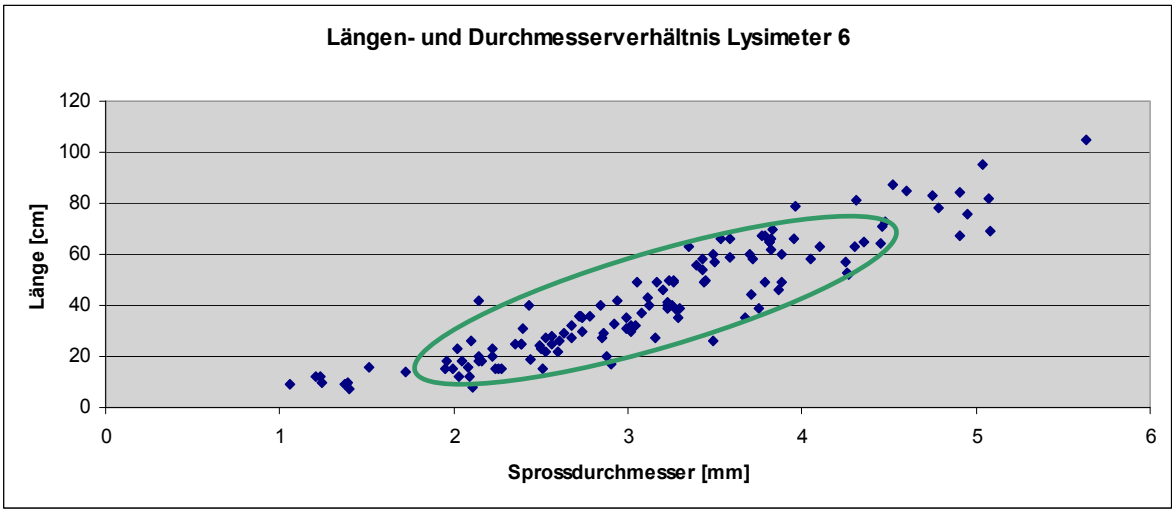

Abbildung 65: Streudiagramm – Zusammenhang von Durchmesser und Länge der Weidensprosse nach 15 Monaten von Lysimeter 6 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

In Abbildung 65 kann man erkennen, dass gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode der Großteil der Weidensprosse zwischen 2 und 4 mm Durchmesser bei einer Länge von 15 bis 70 cm liegt (grüne Eingrenzung).

Tabelle 4: Vergleich von Durchmesser- und Längenverhältnis im Herbst der ersten (Lysimeter1, 2009) und zweiten Vegetationsperiode (Lysimeter 6, 2010) – Versuchsanlage Deutsch - Wagram

	Anzahl [Stk.]	Min. Länge [cm]	Max. Länge [cm]	Min. DM [mm]	Max. DM [mm]	MW Länge [cm]	MW Durchm. [mm]
Herbst 2009 (L1)	*305*	2	77	0,3	4,1	*17,96*	*1,75*
Herbst 2010 (L6)	*134*	9	105	1,06	5,63	*41,3*	*3,1*

In Tabelle 4 werden die wichtigsten Daten der Durchmesser und Längen von der ersten Vegetationsperiode (Lysimeter 1) und der zweiten Vegetationsperiode (Lysimeter 6) zum Vergleich dargestellt.
Der längste Weidenspross in der zweiten Vegetationsperiode (nach 15 Monaten) wies eine Länge von 105 cm bei einem Durchmesser von 5,63 mm auf. Insgesamt wurden 134 Sprosse bei diesem Lysimeter gezählt.
Im Vorjahr (2009) – nach 3 Monaten - wurden zum Vergleich in (Weiden)Lysimeter 1 über 300 Weidensprosse aufgenommen also mehr als die doppelte Menge, wobei die durchschnittliche Länge und Durchmesser nur halb so groß waren wie in der zweiten Vegetationsperiode.

Von Lysimeter 20 wurden im September 2010 Daten zur Länge und zu Durchmesser der Sprosse sowie deren Anzahl bestimmt:

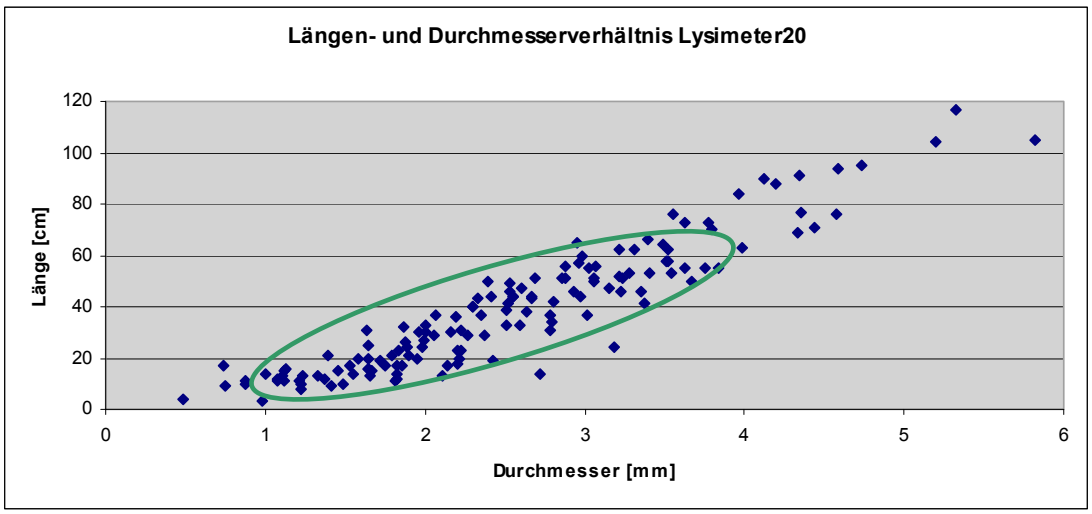

Abbildung 66: Streudiagramm – Zusammenhang von Durchmesser und Länge der Weidensprosse nach 15 Monaten von Lysimeter 20 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

Aus Abbildung 66 wird ersichtlich, dass gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode der Großteil der Weidensprosse zwischen 1 und 4 mm Durchmesser bei einer Länge von 5 bis 65 cm liegt (grüne Eingrenzung).

Tabelle 5: Vergleich von Durchmesser- und Längenverhältnis der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode von Lysimeter 20 – Versuchsanlage Deutsch - Wagram

	Anzahl [Stk.]	Min. Länge [cm]	Max. Länge [cm]	Min. DM [mm]	Max. DM [mm]	MW Länge [cm]	MW Durchm. [mm]
Herbst 2009	*316*	1	85	0,2	4,3	*16,5*	*1,47*
Herbst 2010	***143***	4	117	0,84	5,83	***38,6***	***2,5***

In Tabelle 5 werden die wichtigsten Daten der Durchmesser und Längen aus der ersten und zweiten Vegetationsperiode von Lysimeter 20 zum Vergleich dargestellt.
Bei Lysimeter 20 wurden im Herbst 2010 insgesamt 143 Weidensprosse gezählt, wobei der Längste 117 cm Länge und 5,32 mm Durchmesser aufwies. Der größte Durchmesser war hingegen 5,83 mm bei einer Sprosslänge von 105 cm.
Wie man in Abbildung 70 sehen kann, liegt der Großteil der Weidensprosse in einem Bereich bis zu 60 cm Länge bei einem Durchmesser von 1-4 mm. In der ersten Vegetationsperiode 2009 lag der Schwerpunkt der Weidensprosse noch deutlich im Bereich unter 25 cm Länge und 0,2-3 mm Durchmesser, wobei insgesamt 316 Jungtriebe gezählt wurden.

Die Weidensprossanzahl hat sich somit in der zweiten Vegetationsperiode halbiert, während sich die Durchschnittslänge der einzelnen Sprosse verdoppelt hat.
Der durchschnittliche Durchmesser der Weidensprosse hat sich ungefähr um ein Drittel vergrößert.

5.1.1.2. Biomasse

Nach dem Abtragen der oberirdischen Biomasse von Lysimeter 6 wurden die einzelnen Weidensprosse ins Labor gebracht und dort, nach dem Sortieren in unterschiedliche Durchmesserklassen, auf Zweige und Blätter unterteilt. Die erste Durchmesserklasse liegt bei 0-1 mm die letzte bei 5-6 mm.
Es folgt ein Vergleich mit Lysimeter 1, bei dem bereits im Frühjahr (Anfang Mai) ebenso die oberirdische Biomasse entnommen und ausgewertet wurde.

Tabelle 6: Biomassedaten Lysimeter 1 – Weiden nach 11 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

Durchmesserklasse [mm]	Anzahl [Stk.]	Trockenbiomasse Weidenzweige [g]	Trockenbiomasse Blätter [g]	Trockenbiomasse Gesamt [g]	Anteil [%]
0-1	60	0,40	0,75	1,15	1,2
1-2	140	4,91	7,65	12,56	12,9
2-3	73	26,05	15,23	41,28	42,3
3-4	28	25,48	9,11	34,59	35,5
4-5	4	5,81	2,10	7,91	8,1
5-6	0	0	0	0	0
Gesamt	***305***	***62,65***	***34,84***	***97,49***	***100***

Nach der ersten Vegetationsperiode (Tabelle 6) machten die Weidensprosse im Bereich von 2-3 mm Durchmesser (42,3%) mit den Weidensprossen aus der Durchmesserklasse von 3-4 mm (35,5%), mit 77,5 %, den größten Anteil an der gesamten Trockenbiomasse aus. Kleine Triebe unter 2 mm kommen auf ca. 14 %.
In Klasse 5-6 mm fallen nach der ersten Vegetationsperiode keine Sprosse.

Tabelle 7: Biomassedaten Lysimeter 6 - Weiden nach 15 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

Durchmesserklasse [mm]	Anzahl [Stk.]	Trockenbiomasse Weidenzweige [g]	Trockenbiomasse Blätter [g]	Trockenbiomasse Gesamt [g]	Anteil [%]
0-1	0	0,00	0,00	0	0
1-2	13	0,88	0,51	1,39	0,9
2-3	48	15,92	6,26	22,18	14,5
3-4	51	54,69	13,10	67,79	44,2
4-5	18	39,02	7,54	46,56	30,4
5-6	4	13,08	2,24	15,32	10
Gesamt	***134***	***123,59***	***29,64***	***153,23***	***100***

Gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode (Tabelle 7) liegt der überwiegende Anteil an der Gesamtbiomasse der Weidensprosse in der Durchmesserklasse 3-4 mm (44,4 %) sowie in der von 4-5 mm (30,3 %). Die Sprosse unter 2 mm kommen nur noch auf 0,9 % der Biomasse. Die Klasse 5-6 kommt mit nur 4 Weidensprossen immerhin auf beachtliche 10 % der gesamten Trockenbiomasse. Nach der zweiten Vegetationsperiode gab es keine Sprosse, die in die Durchmesserklasse 0-1 mm fallen.

Vergleich der 2 Vegetationsperioden:

Die oberirdische Gesamtbiomasse hat sich innerhalb der zweiten Vegetationsperiode, in Bezug auf die erste, von circa 97 g auf 153 g um ein Drittel erhöht während die Anzahl der Weidensprosse von 305 auf 134 um mehr als die Hälfte gesunken ist.
Dies wird in folgenden Grafiken (Abbildung 67 und 68) dargestellt:

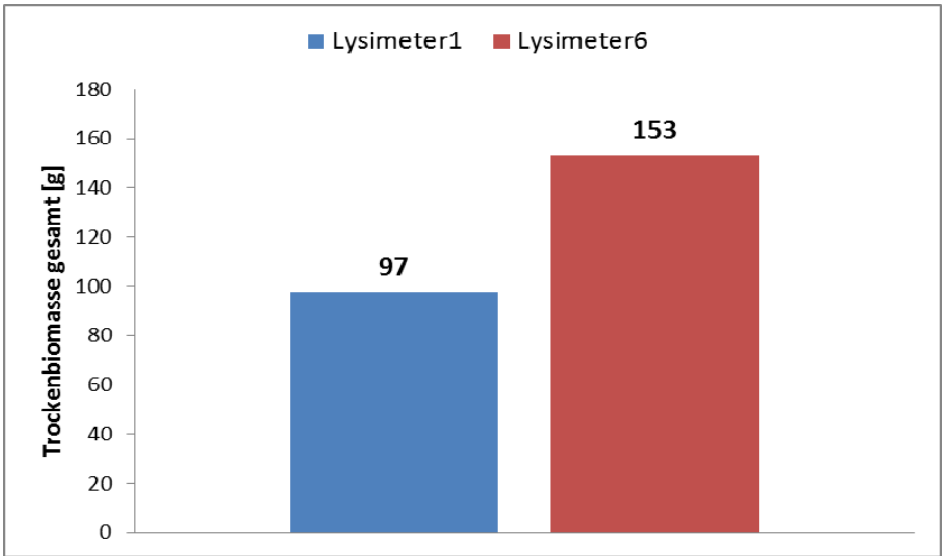

Abbildung 67: Vergleich der gesamten Trockenbiomasse der Weiden aus der ersten (Lysimeter 1, 2009) und zweiten (Lysimeter 6,2010) Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

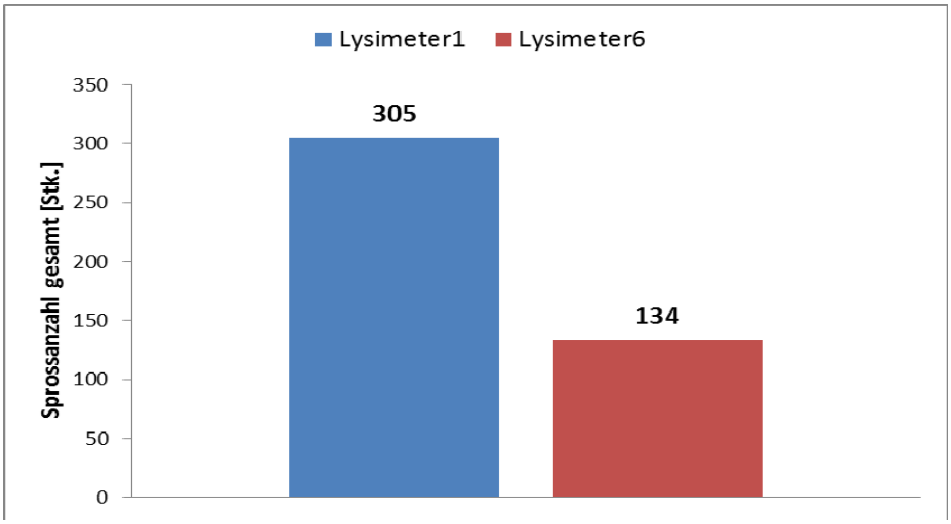

Abbildung 68: Vergleich der Sprossanzahl der Weiden aus der ersten (Lysimeter 1, 2009) und zweiten (Lysimeter 6, 2010) Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

In der zweiten Vegetationsperiode machen die letzten drei Klassen von Lysimeter 6 (2010) circa 85% der Gesamttrockenbiomasse aus. In den ersten 3 Klassen hingegen (bis 3 mm) ist der prozentuelle Anteil der Trockenbiomasse des ersten Vegetationsjahr deutlich höher als nach der zweiten Vegetationsperiode (siehe Abbildung 69).

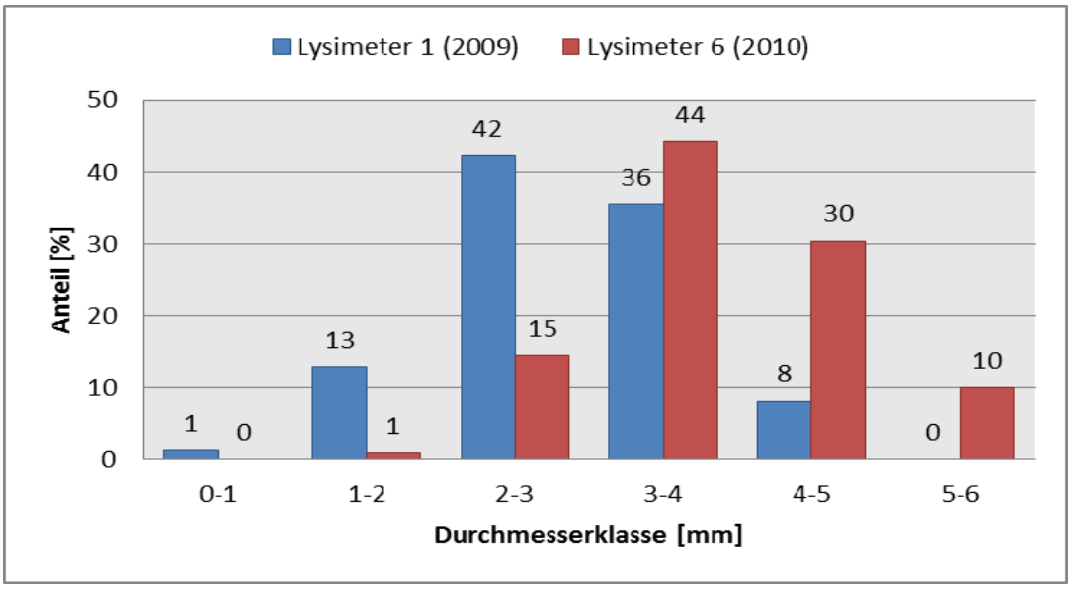

Abbildung 69: Vergleich an Gesamtgewicht der Trockenbiomasse Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) – unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

In Abbildung 70 ist die Entwicklung der Weidensprossanzahl, nach Klassen geordnet, von der ersten auf die zweite Vegetationsperiode zu beobachten. Im ersten Vegetationsjahr ist die Anzahl der Weidensprosse, in den ersten drei Durchmesserklassen (0-1, 1-2, 2-3) viel höher als die des zweiten Vegetationsjahres. In den restlichen drei Durchmesserklassen (3-4, 4-5, 5-6) hingegen dominiert die zweite Vegetationsperiode in ihrer Weidensprossanzahl gegenüber der ersten.

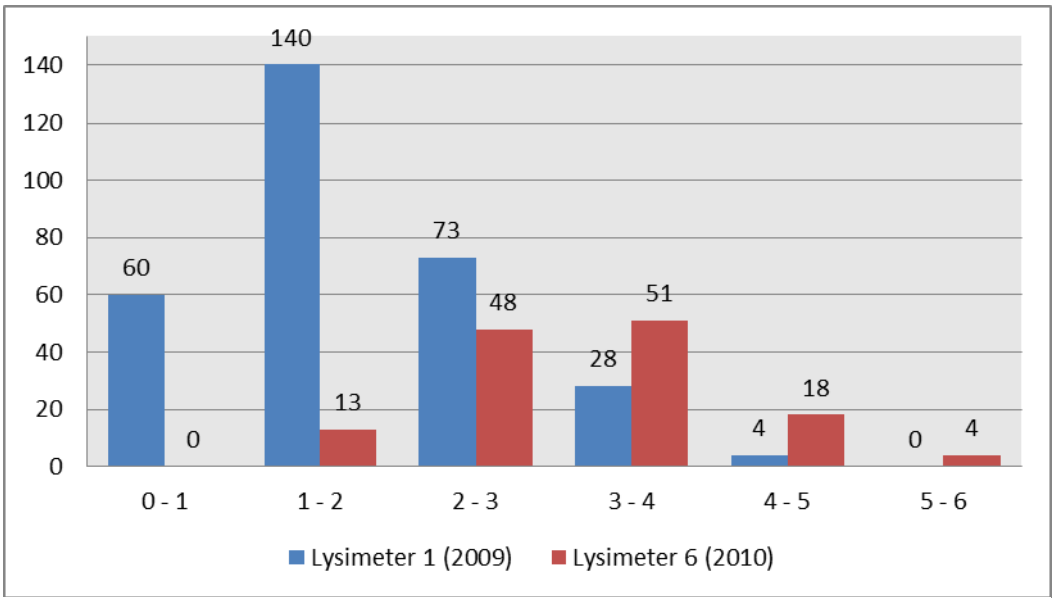

Abbildung 70: Weidensprossanzahl aus der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode in Durchmesserklassen untergeteilt (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

Das Gewicht der Trockenbiomasse vom zweiten Vegetationsjahr (Lysimeter 6) ist in den letzten drei Durchmesserklassen um ein Vielfaches größer als nach der ersten Vegetationsperiode (siehe Abbildung 71). In den ersten drei Durchmesserklassen ist die Trockenbiomasse von Lysimeter 6 (2010) im Vergleich zu Lysimeter 1 (2009) nur sehr gering.

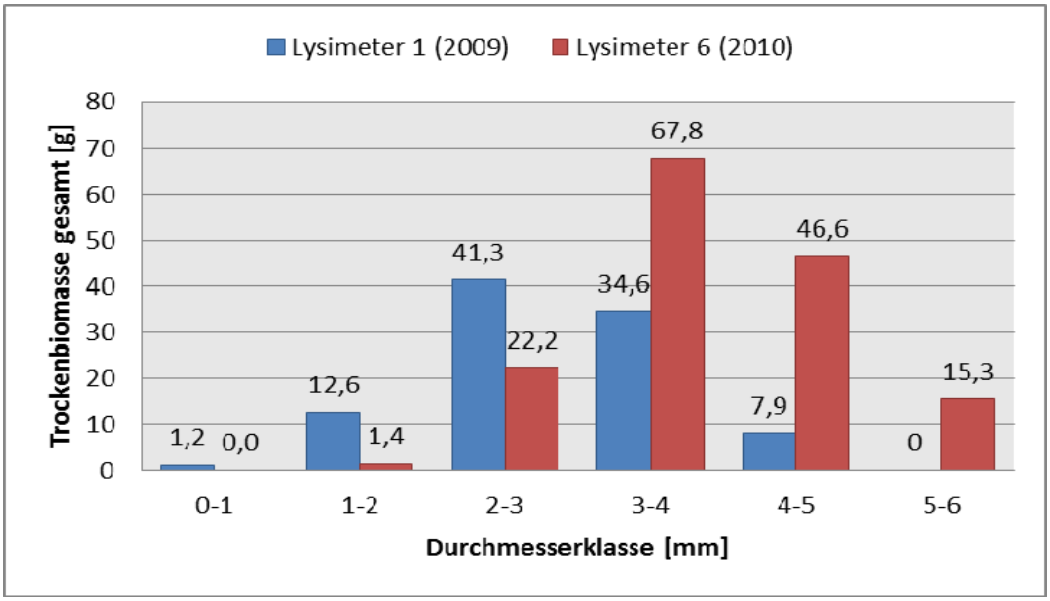

Abbildung 71: Gesamt - Gewicht der Trockenbiomasse aus der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode nach Durchmesserklassen sortiert (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

Aus Abbildung 72 kann man erkennen, dass in der ersten Vegetationsperiode (2009) das Gewicht der Blätter in den ersten zwei Klassen (0-1mm, 1-2mm) höher ist als das Gewicht der Weidenzweige. Ab Klasse 2-3 mm macht das Gewicht der Zweige jedoch einen deutlich höheren Teil (circa 2/3) an der gesamten Trockenbiomasse der Klasse aus.

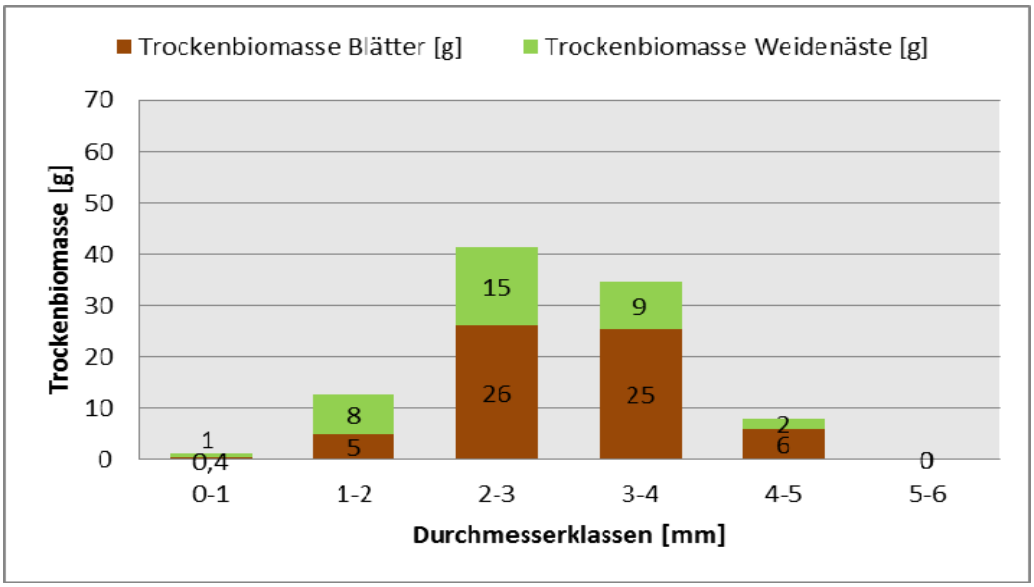

Abbildung 72: Anteil von Blättern und Zweigen der Weiden in Bezug auf die gesamte Trockenbiomasse unterteilt in Klassen – Vegetationsperiode 1 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2009)

Wie in folgender Grafik (Abbildung 73) dargestellt, machen in der zweiten Vegetationsperiode (2010) die Zweige in jeder Klasse mit Abstand den größten Teil (circa ¾ und mehr) an der Gesamttrockenbiomasse aus. In die erste Klasse von 0-1 mm fallen keine Weidensprosse.

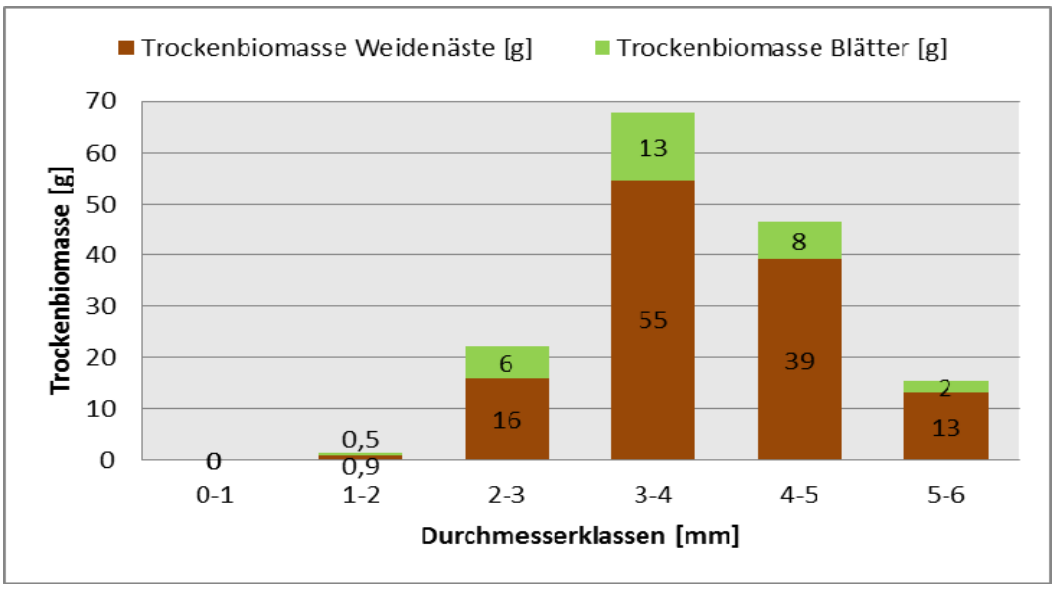

Abbildung 73: Anteil von Blättern und Zweigen der Weiden in Bezug auf die gesamte Trockenbiomasse unterteilt in Klassen – Vegetationsperiode 2 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

Wie man in Abbildung 74 sehen kann, ist das Gesamtgewicht der Blätter in der ersten Vegetationsperiode (2009) in den ersten drei Klassen höher als in der zweiten Vegetationsperiode. In der dritten bis vierten Klasse ist das Gesamtgewicht der Blätter in der zweiten Vegetationsperiode (2010) eindeutig größer.

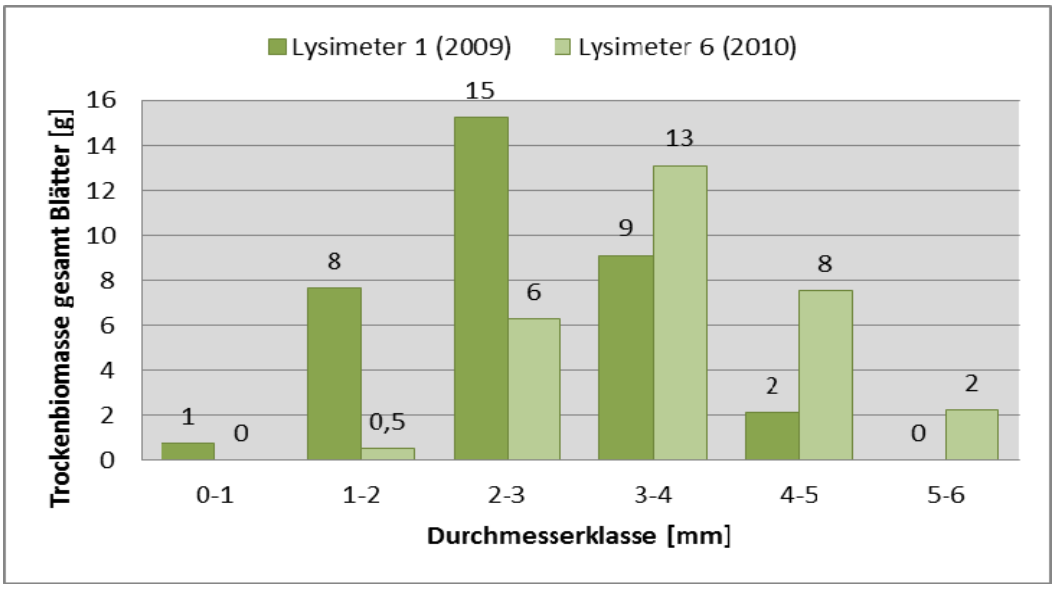

Abbildung 74: Vergleich von Gesamtgewicht der Blätter Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) - unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

Das Gesamtgewicht der Weidenäste (Abbildung 75) ist nach der ersten Vegetationsperiode wie bei den Blättern nur in den ersten 3 Klassen höher. Danach dominiert eindeutig Lysimeter 6 (2010) in der Trockenbiomasse der Weidenäste.

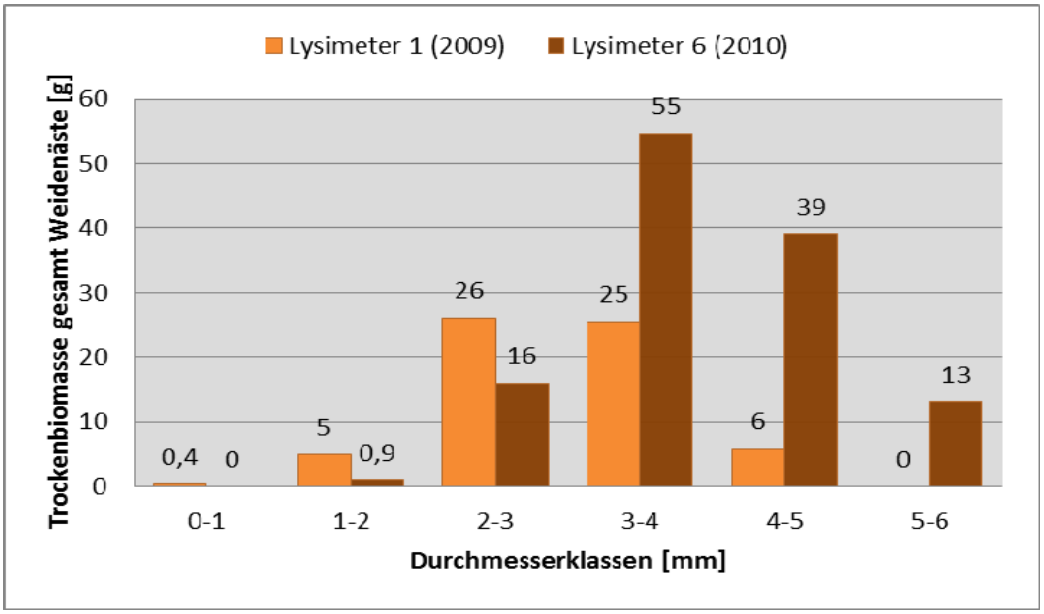

Abbildung 75: Vergleich vom Gewicht der Zweige von Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) – unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram)

5.1.1.3. Blattflächenindex

Für die Berechnung des Blattflächenindex wurden aus jeder Durchmesserklasse 2 Stichproben entnommen, die dann auf die Gesamtmasse pro Klasse hochgerechnet wurden. Von der Klasse 1-2 mm wurde die gesamte Biomasse verwendet, da diese nur 0,841 g ausmachte. Der berechnete Blattflächenindex von Lysimeter 6 beträgt ca. 1,6.

FlächeLysimeter [cm²]	**Blattfläche [cm²]**	**BFI**
2410,51	3846,02	**1,60**

Gegen Ende der ersten Vegetationsperiode war der BFI mit 3,13 fast doppelt so groß wie in der zweiten Vegetationsperiode. Der Grund dafür ist, dass im ersten Vegetationsjahr zusätzlich bewässert wurde und den Weidensprossen die in den Ästen gespeicherten Nährstoffe noch zur Verfügung standen. Im zweiten Jahr blieben die Blätter dann wegen Trockenstress und Nährstoffmangel deutlich kleiner.
In folgenden Tabellen (Tabelle 8 und 9) werden die wichtigsten Daten für die BFI Berechnung von 2009 und 2010 aufgezeigt:

Tabelle 8: Blattflächenberechnungen Lysimeter 1 – Erste Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Sep. 2009)

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
5-6	0	0	0	0	0	0

Tabelle 9: Blattflächenberechnungen Lysimeter 6 – Zweite Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Sep. 2010)

Ø-Klasse [mm]	Äste [Stk]	Blattanzah/ Ast [Stk]	Fläche/ Blatt [cm²]	Blattfläche gesamt [cm²]	Anteil an Gesamt-blattfläche [%]	Blattfläche/ Ast [cm²]
0-1	0	0	0,000	0	0,00	0,00
1-2	13	19	0,268	65	1,69	5,00
2-3	48	56	0,307	830	21,59	17,30
3-4	51	105	0,321	1726	44,89	33,84
4-5	18	145	0,367	957	24,89	53,17
5-6	4	179	0,373	267	6,94	66,75

Vergleicht man beide Tabellen (8 und 9) fällt auf, dass die Blattanzahl pro Klasse und Weidenspross in der zweiten Vegetationsperiode deutlich größer ist, die Blattfläche pro Klasse insgesamt jedoch um ein Vielfaches geringer. Die Blätter sowie die gesamte Blattfläche sind nach der zweiten Vegetationsperiode deutlich kleiner im Vergleich zur ersten, dafür ist die Blattanzahl pro Ast jedoch gestiegen.

5.1.1.4. Wurzeln

Die längsten und stärksten Wurzeln haben sich vor allem am Fassrand ausgebildet, was man beim Aufschneiden der Fässer gut sehen konnte.
In diesem Bereich wachsen die Wurzeln sogar durch das Vlies hindurch bis in die untere Kiesdrainschicht.

Abbildung 76: Wurzeln dringen durch Vlies in Kiesdrainschicht (Deutsch – Wagram, 14.09.2010)

Abbildung 77: Starke Wurzelausbildung am Fassrand (Deutsch – Wagram, (14.09.2010)

In der folgenden Grafik (Abbildung 78) ist der Anteil an Wurzelvolumen von Lysimeter 1 (nach 11 Monaten) pro entnommener Bodenschicht dargestellt. Schicht eins entspricht den obersten fünf Zentimetern des Fasses. Schicht 16 ist der unterste Teil des Fassbodens über der Drainschicht. Schicht 17 sind die untersten 10 cm Kiesdrainschicht.
Die Messdaten wurden zuerst mittels Wassersäule (Verdrängung des Wassers) gemessen. Später stand aber ein spezieller Scanner zur Verfügung, mit dem sich das Wurzelvolumen genauer bestimmen ließ. In Abbildung 78 und 79 werden diese beiden Messergebnisse verglichen.

Aus Abbildung 79 ist das Wurzelvolumen der Weidenspreitlage nach 15 Monaten abzulesen. In der zweiten Messschicht, also von 5-10 cm Tiefe, findet man den größten Wurzelanteil. Messschicht eins entspricht, den Scanmessungen nach, vom Wurzelvolumen ungefähr Messschicht drei.
Danach nimmt der Wurzelanteil bis zur Schicht 9 (40-45 cm Bodentiefe) stetig ab und danach wieder etwas zu. In der Kiesschicht, die sich am Boden des Lysimeters befindet, ist im Gegensatz zu den vier vorigen Schichten ein deutlicher Anstieg der Wurzelmasse abzulesen. Das kommt daher, dass sich die Wurzeln in dem lockeren Kies am Grund besser ausbreiten können. Die Unterschiede der Wassersäulenmessung und der Scanproben sind in beiden folgenden Grafiken (Abbildung 78 und 79) vor allem in der zweiten und dritten Messschicht deutlich zu erkennen.

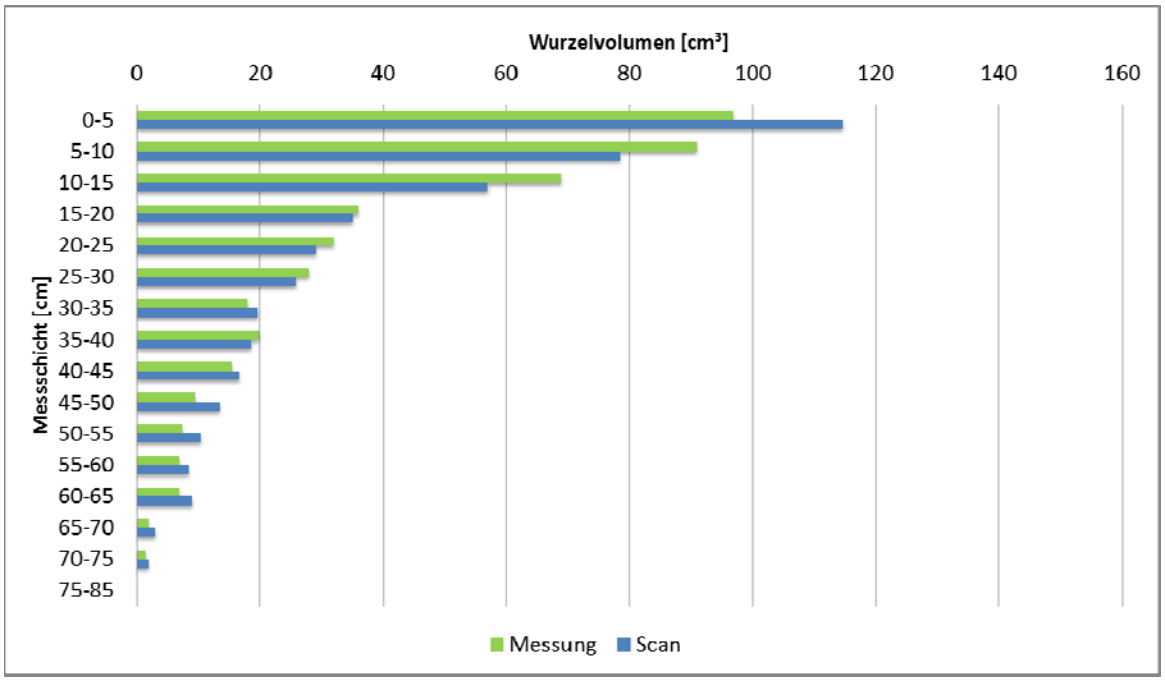

Abbildung 78: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan - Wurzelvolumen Weiden Lysimeter 1 nach 11 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

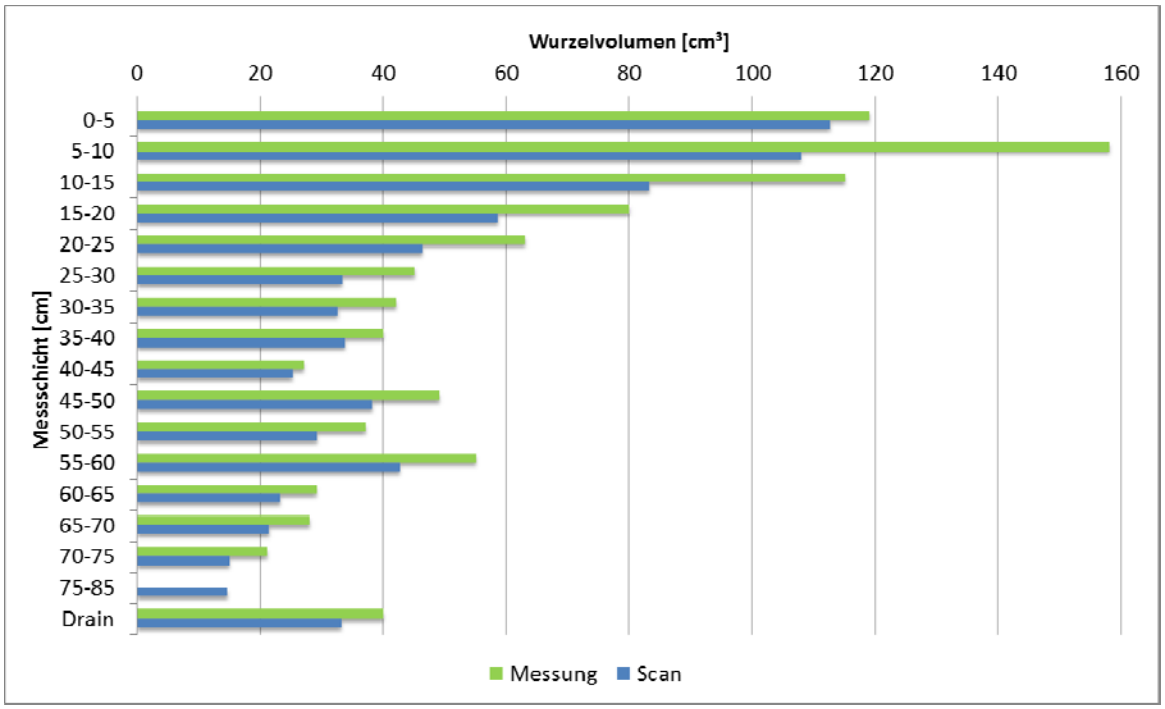

Abbildung 79: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan - Wurzelvolumen Weiden Lysimeter 6 nach 15 Monaten (Versuchsanlage Deutsch - Wagram, 2010)

Im Vergleich zur ersten Vegetationsperiode, also nach (Abbildung 78) hat sich das Wurzelvolumen vor allem in den Schichten unter 15 cm, innerhalb der zweiten Vegetationsperiode (Abbildung 79) stark vergrößert. Die Weiden weisen somit bereits nach zwei Jahren ein hohes Volumen an tiefreichenderen Wurzeln auf.

5.1.1.5. Wurzel- Sprossverhältnis

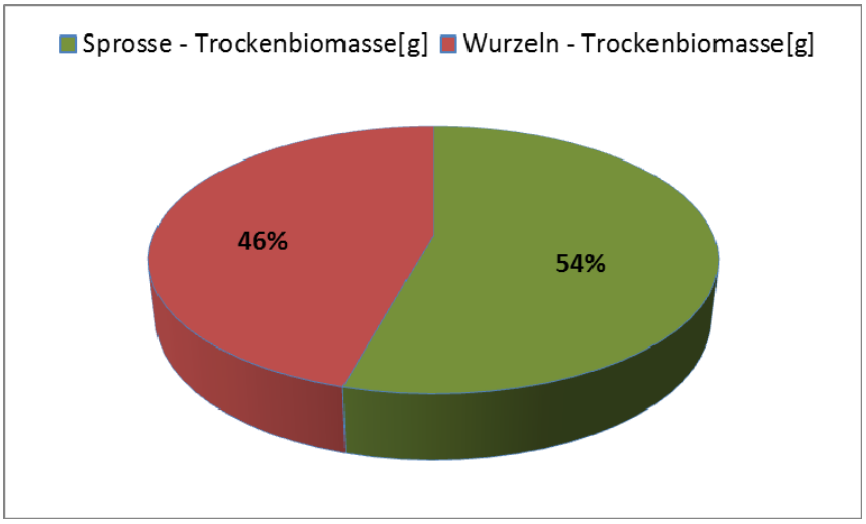

Abbildung 80: Wurzelsprossverhältnis der Weiden - Lysimeter 1 nach dem ersten Vegetationsjahr (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2009)

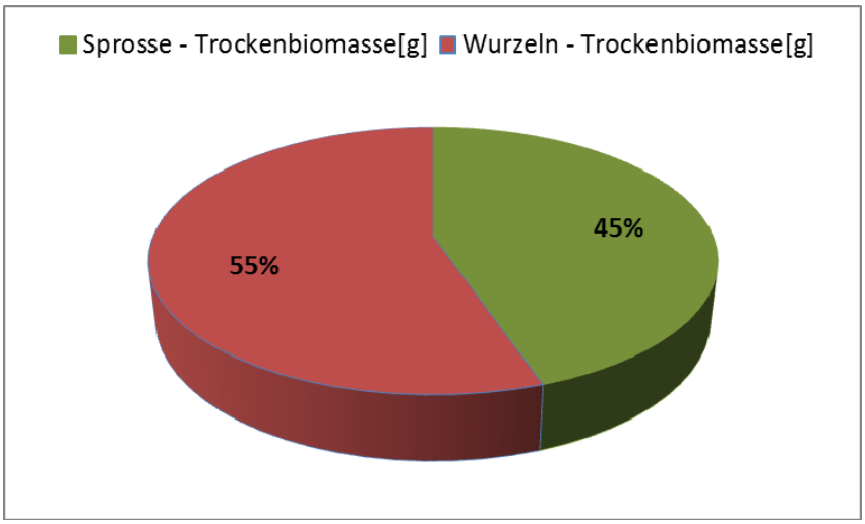

Abbildung 81: Wurzelsprossverhältnis der Weiden Lysimeter 6 – im zweiten Vegetationsjahr (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

Vergleicht man die beiden vorherigen Abbildungen (80 und 81) fällt gleich auf, dass im ersten Jahr mehr oberirdische Biomasse im Vergleich zu den Wurzeln vorhanden ist. In der zweiten Vegetationsperiode überwiegt jedoch bereits der Anteil an unterirdischer Biomasse. Da ähnliche Bedingungen wie auf einem Hochwasserschutzdamm herrschen (trocken, dicht) bilden sich die Wurzeln stärker aus. So kann mehr Wasser aufgenommen werden. Die Produktion der oberirdischen Biomasse wird hingegen reduziert, da Energie und Wasser nur begrenzt zur Verfügung stehen.

5.1.2. Gräser & Kräutermischung

Die Gräser- und Kräutermischung entwickelte sich etwas langsamer als die Weidenspreitlage. Bei einigen Lysimetern kam es vorerst zu einer unregelmäßigen Verteilung der Grasnarbe, was durch das teilweise Ausschwemmen des Saatgutes durch Niederschlagwasser wegen des stark verdichteten Bodens zu erklären ist.
Durch eine Nachsaat konnte dieses Problem jedoch behoben und eine dichte Grasnarbe erzielt werden. Auf folgenden Bildern (Abbildung 82 und 85) soll die Entwicklung der Grasnarbe bis zum Ende der zweiten Vegetationsperiode veranschaulicht werden:

Abbildung 82: Gräser- und Kräutermischung nach 2 Monaten (Deutsch – Wagram, 2009)

Abbildung 83: Gräser- und Kräutermischung nach 3 Monaten (Deutsch – Wagram, 2009)

Abbildung 84: Gräser- und Kräutermischung nach 12 Monaten (Deutsch – Wagram, 2010)

Abbildung 85: Gräser- und Kräutermischung nach 14 Monaten (Deutsch – Wagram, 2010)

5.1.2.1. Wurzeln

In folgenden Grafiken (Abbildung 86 und 87) ist der Anteil an Wurzelvolumen von Lysimeter 17 nach 11 Monaten (Mai 2010) und Lysimeter 16 nach 15 Monaten (September 2010) pro entnommene Bodenschicht (in 5 cm Abständen) dargestellt. Schicht eins entspricht den obersten fünf Zentimetern des Lysimeters. Die unterste Schicht in Abbildung 87 sind die eingebrachten 10 cm Kiesdrainschicht.

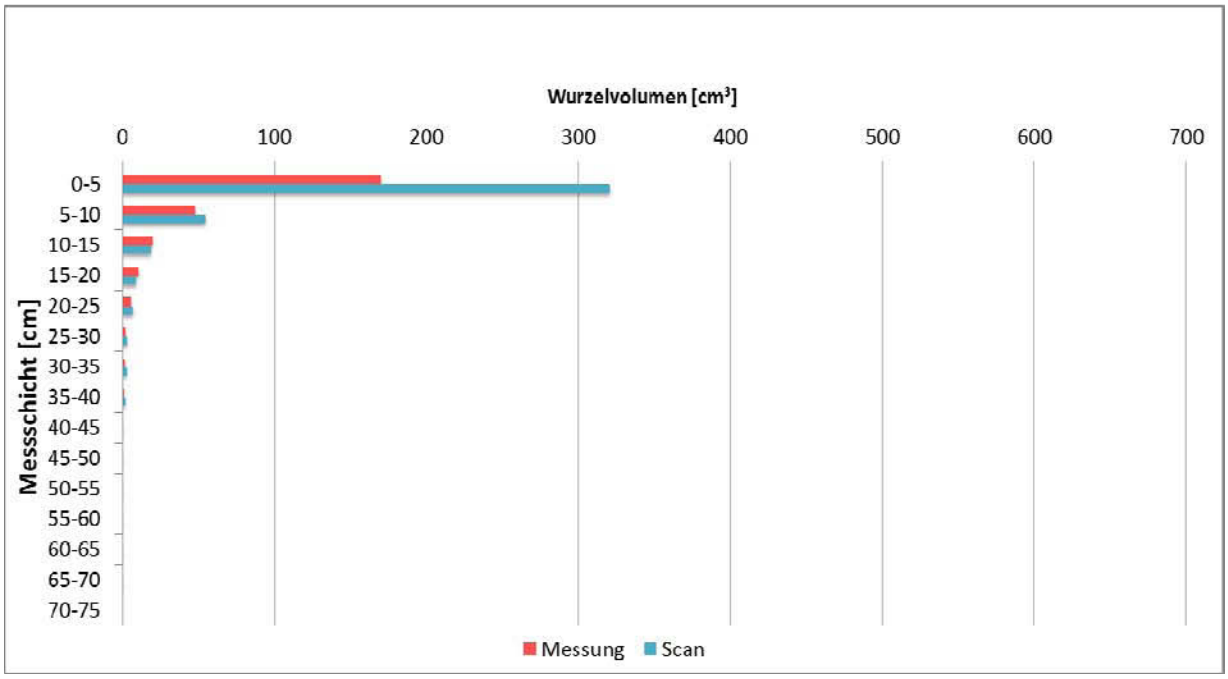

Abbildung 86: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan Gräser und Kräuter Lysimeter 17 – (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Frühjahr 2010)

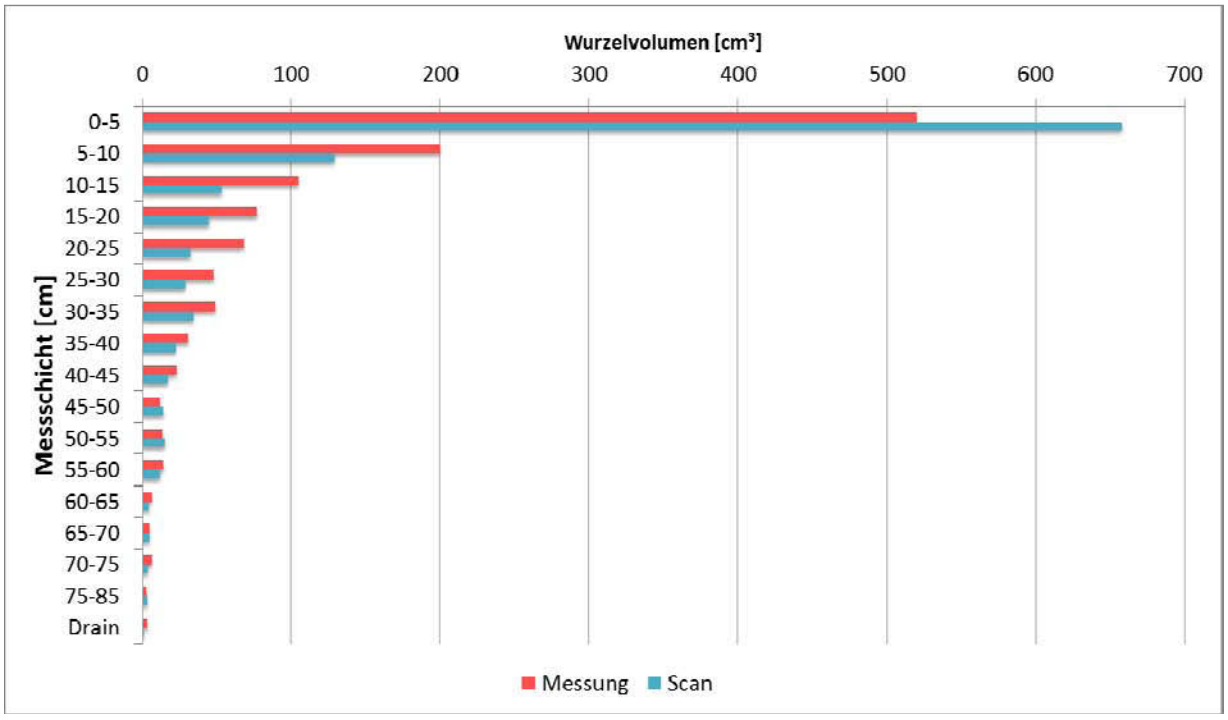

Abbildung 87: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan Gräser und Kräuter Lysimeter 16 – (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Herbst 2010)

Wie bei den Weiden zeigt sich ein klarer Anstieg des Wurzelvolumens von der ersten (Abbildung 86) auf die zweite (Abbildung 87) Vegetationsperiode. Dies ist vor allem in den oberen Schichten zu sehen, wo sich das Volumen meist mehr als verdoppelt.
In Abbildung 87 ist das Wurzelvolumen der Gräser- und Kräuterbegrünung nach zwei Vegetationsperioden dargestellt. In der ersten Messschicht ist mit Abstand am meisten Wurzelmaterial enthalten. Mit Messschicht zwei (5-10 cm) nimmt das Wurzelvolumen stetig ab. Wie bei der Weidenspreitlage reichen die Wurzeln gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode bis in den untersten Bereich des Fasses. Beim Gräser und Kräuter-Lysimeter ist der Wurzelanteil in der Kiesdrainschicht jedoch nur mehr gering.

5.1.3. Vergleich der Wurzelmassen - Gräser & Kräuter mit Weiden

In den folgenden zwei Grafiken wird das Wurzelvolumen der Weiden mit dem der Gräser und Kräuter verglichen. In Abbildung 88 findet ein Vergleich der Wurzelentwicklung nach dem ersten Vegetationsjahr, in Abbildung 89 ein Vergleich nach dem zweiten Vegetationsjahr statt.

Im Vergleich zum Gräser- und Kräuterbewuchs weist der Weidenbewuchs nach zwei Vegetationsperioden (Abbildung 89) in den ersten zwei Schichten (10 cm Bodentiefe) ein deutlich geringeres Wurzelwachstum auf. Ab der dritten Schicht (10-15 cm Bodentiefe) dominieren jedoch die Weiden, wobei der Unterschied bis 45 cm Bodentiefe nicht sehr groß ist. Erst unter dieser Grenze haben die Weiden deutlich mehr Wurzelmasse als die Gräser- und Kräutermischung. Die Weiden erreichen gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode mit einigen Wurzeln den Lysimeterboden. Auch die Gräser und Kräuter wurzeln gegen Ende der zweiten Vegetationsperiode vereinzelt bis zu über 90 cm tief.

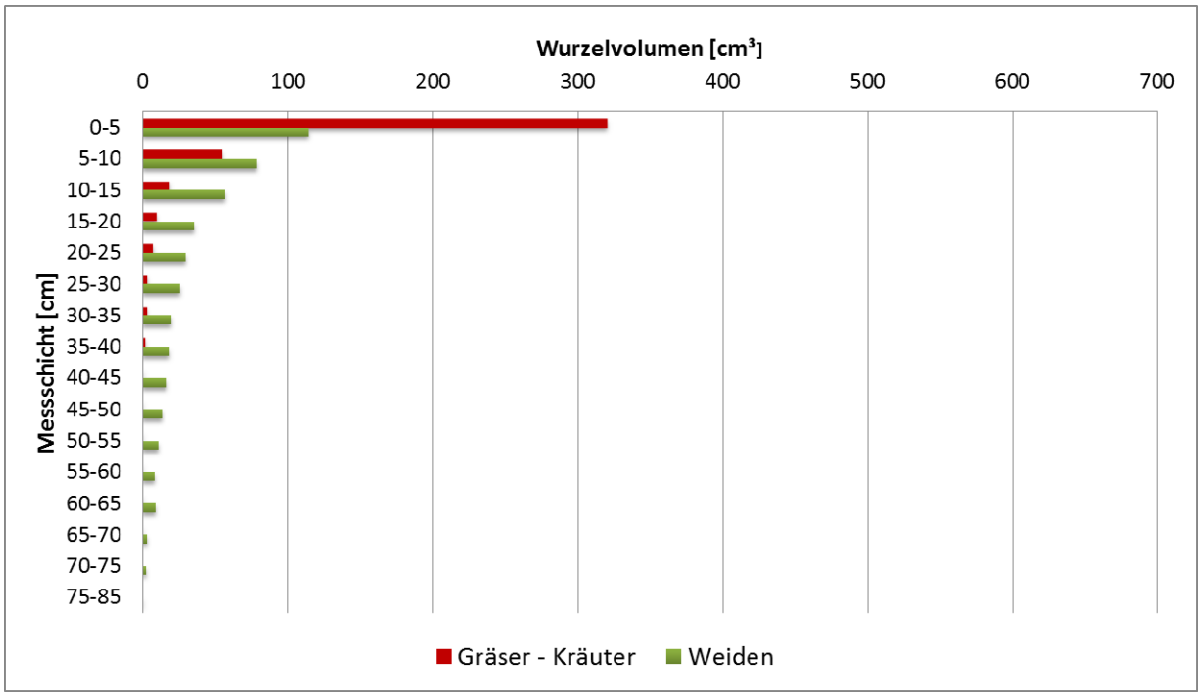

Abbildung 88: Wurzelentwicklung – Vergleich Gräser und Kräuter mit Weiden nach 11 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

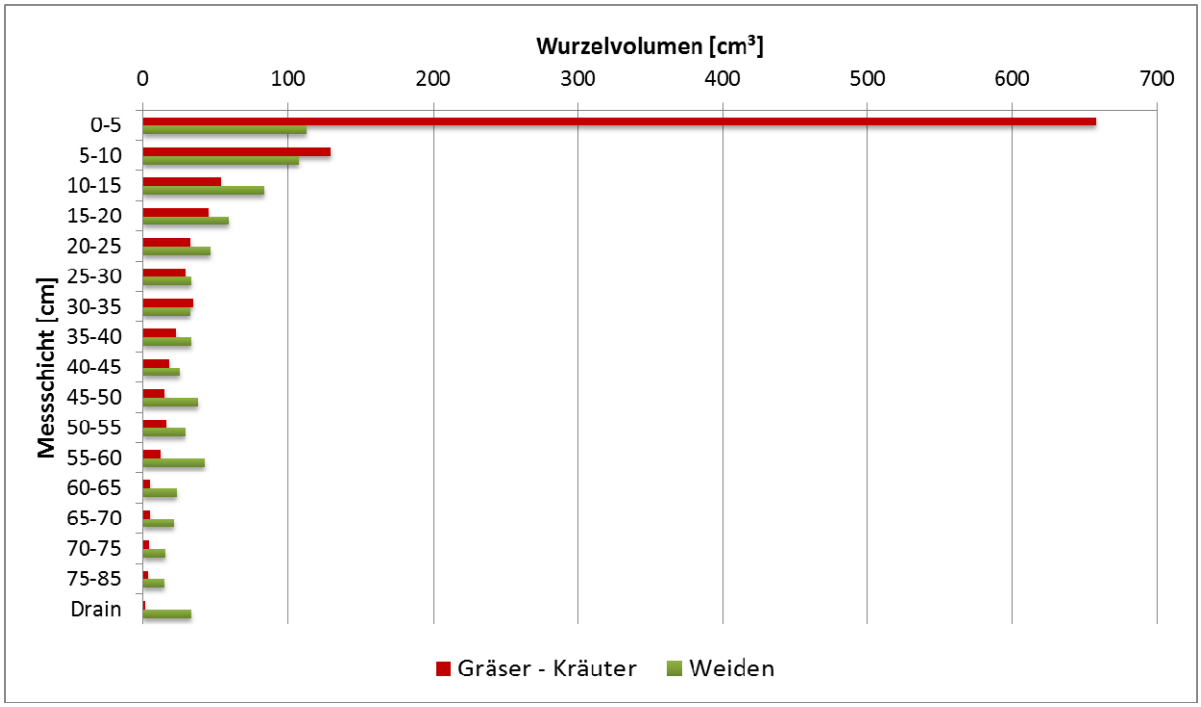

Abbildung 89: Wurzelentwicklung – Vergleich Gräser und Kräuter mit Weiden nach 15 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)

5.2. Meteorologische Kenngrößen des Untersuchungszeitraumes

Laut der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik Wien (ZAMG) ist das Jahr 2010 ein im Vergleich zu den Vorjahren sonnenarmes dafür jedoch niederschlagsreiches Jahr.
(Zentral Anstalt für Meteorologie und Geodynamik)

Als Zeitraum für die folgenden meteorologischen Aufzeichnungen wurde die Periode von März bis einschließlich Oktober 2010 ausgewählt. Um die Grafiken übersichtlicher zu gestalten wurde diese Periode in 3 Zeiträume (ZR.1: März-Mai, ZR.2: Juni-August, ZR. 3: September-Oktober) unterteilt. Die Abbildungen sind nacheinander nach diesen Zeiträumen gegliedert dargestellt.
Es werden nun die für die potentielle Evapotranspiration wichtigen Parameter, Temperatur, Niederschlag sowie Strahlung und Wind des Untersuchungszeitraumes aufgezeigt.

5.2.1. Temperatur und Niederschlag

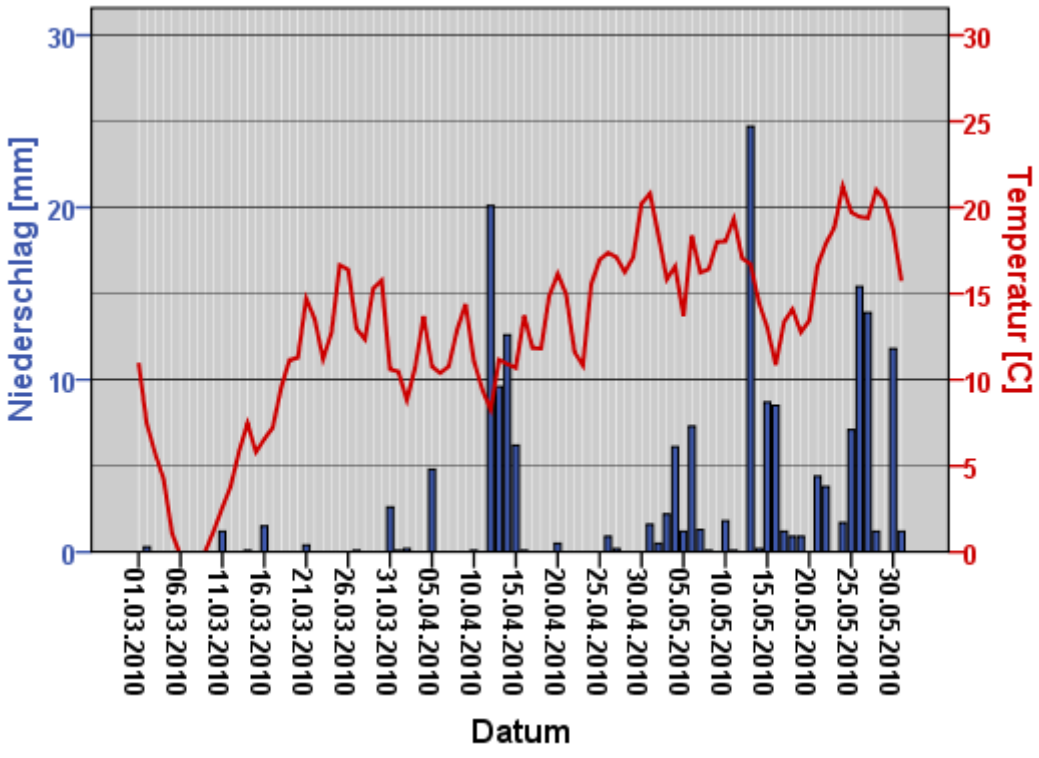

Abbildung 90: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 1 - März bis Mai (Deutsch – Wagram, 2010)

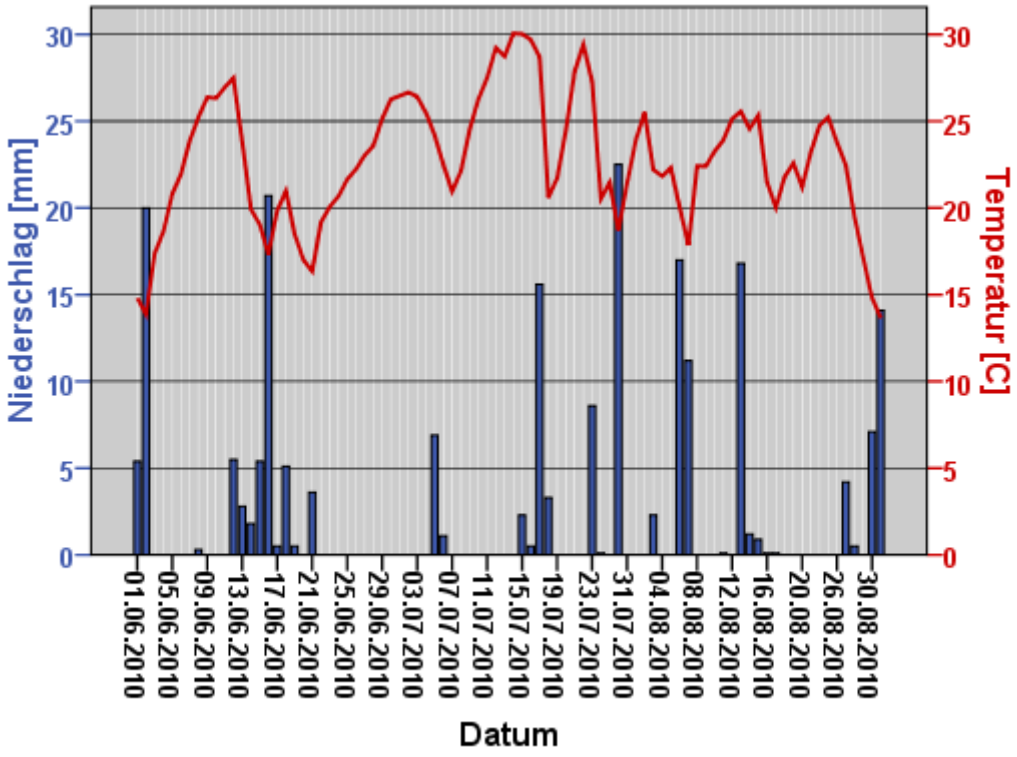

Abbildung 91: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 2 – Juni bis August (Deutsch – Wagram, 2010)

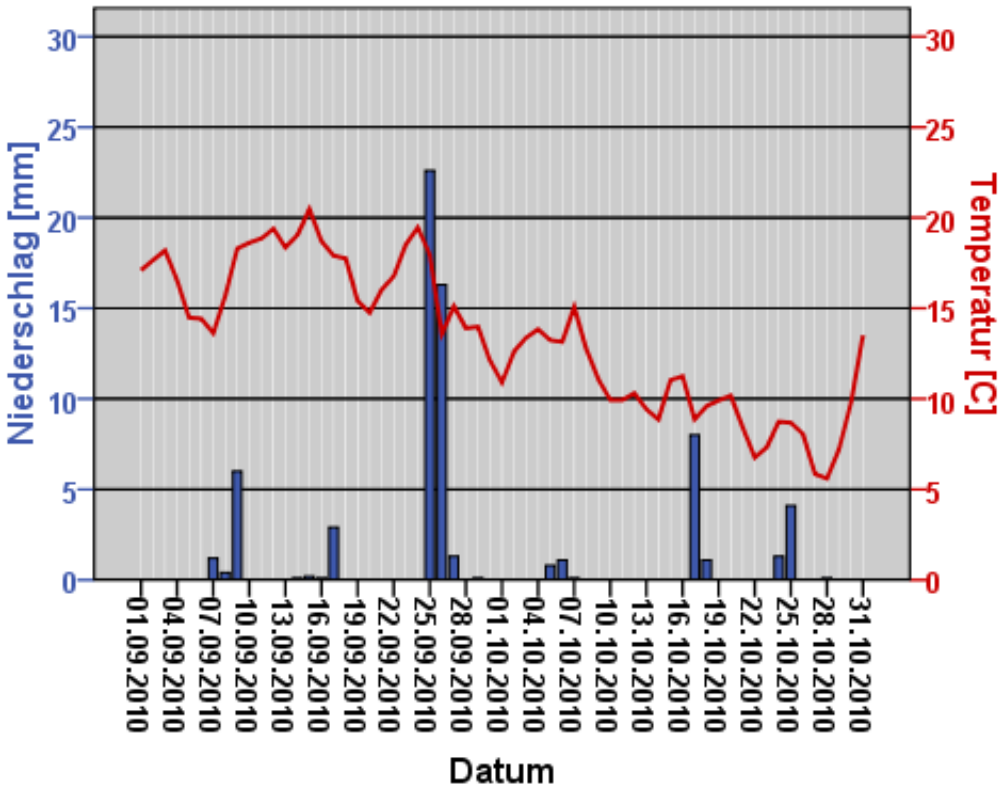

Abbildung 92: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 3 – September bis Oktober (Deutsch – Wagram, 2010)

Untersuchungszeitraum 1 (Abbildung 90)
Von sechsten bis achten März fällt die Temperatur nochmal knapp unter die Nullgradmarke. Danach geht es jedoch stetig bergauf. Ende Mai werden bereits Temperaturen um die 20 Grad erreicht. Der Mai ist der niederschlagreichste Monat des ersten Untersuchungszeitraumes.

Untersuchungszeitraum 2 (Abbildung 91)
Im gesamten zweiten Zeitraum (Juni – August) liegen die Temperaturwerte meist deutlich über 20 Grad. Die höchsten Temperaturen wurden Mitte Juli mit um die 30 Grad erreicht. Erst gegen Ende August findet ein starker Temperatursturz von über 25 auf unter 15 Grad statt. Am meisten Niederschlag im zweiten Zeitraum fällt im Juni.

Untersuchungszeitraum 3 (Abbildung 92)
Bis Ende September bewegen sich die Temperaturen meist noch zwischen 15 und 20 Grad. Dann sinken die Werte bis Ende Oktober auf knapp über 5 Grad, wobei am 31 Oktober nochmal ein Temperaturanstieg um fast 10 Grad stattfindet.
Die durchschnittlichen Niederschlagswerte des dritten Zeitraumes liegen deutlich unter den der vorigen zwei Zeiträume. Vor allem der Oktober ist sehr niederschlagsarm.

In folgender Tabelle sind die wichtigsten Daten über Niederschlag und Temperatur, des gesamten Untersuchungszeitraumes (März bis Oktober) zusammengefasst:

Tabelle 10: Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit im gesamten Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

Zeitraum	2010	Niederschlag [mm]	mittlere Temperatur [°C]	mittlere Luftfeuchtigkeit [%]
ZR 1	**März**	6,2	8,2	57,4
	April	55,4	13,0	60,1
	Mai	127,8	17,0	70,0
ZR 2	**Juni**	71,6	21,3	65,3
	Juli	60,8	25,3	59,5
	August	59,2	22,0	65,7
ZR 3	**September**	51,2	16,8	67,4
	Oktober	16,6	10,2	70,8

Aus Tabelle 10 geht hervor, dass im Mai 2010 der höchste monatliche Niederschlag mit durchschnittlich 127,8 mm gemessen wurde. Die höchste Durchschnittstemperatur wurde im Juli mit 25 Grad erreicht.
Der trockenste Zeitraum ist der dritte (September bis Oktober) mit insgesamt nur 67,8 mm Niederschlag. Zeitraum eins und zwei weisen mit jeweils knappen 190 mm insgesamt, fast gleich große Niederschlagswerte auf. Betrachtet man den gesamten Untersuchungszeitraum kann man sagen, dass er sehr niederschlagsreich war. Die monatlichen Durchschnittstemperaturen liegen im Normalbereich und weisen keine Extremwerte auf.

5.2.2. Wind und Strahlung

In der folgenden Tabelle sind die wichtigsten Daten über Strahlung und Wind des gesamten Untersuchungszeitraumes zusammengefasst:

Tabelle 11: Strahlung und Wind im gesamten Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

Zeitraum	2010	Mittlere Strahlung [W/m]	max. Strahlung [W/m]	mittlere Windgeschw. [km/h]	max. Windgeschw. [km/h]
ZR 1	**März**	130	916	6,3	21
	April	183	1033	4,8	14
	Mai	185	1198	4,5	15
ZR 2	**Juni**	250	1353	3,6	9
	Juli	250	1214	2,7	6
	August	198	1163	2,7	9
ZR 3	**September**	148	991	4,1	13
	Oktober	89	703	3,6	9

Die stärkste durchschnittliche Windgeschwindigkeit wurde mit 6,3 km/h im März gemessen, wobei der maximal gemessene Wert bei 21 km/h liegt (Siehe Tabelle 11).
Im Juli und August sind die Durchschnittswerte des Windes am schwächsten.
Die eindeutig höchsten durchschnittlichen Strahlungswerte werden im zweiten Zeitraum (Juli – August) erreicht. Der größte maximale Strahlungswert wurde Ende Juni mit 1353 W/m gemessen. Der Oktober weist mit Abstand die niedrigste durchschnittliche Strahlung mit gerade einmal 89 W/m auf.

5.3. Wasserhaushalt des gesamten Untersuchungszeitraumes

Durch den Einsatz von Wassergehaltssensoren als auch Tensiometern konnten regelmäßige Daten über hydrogeologische Eigenschaften und Veränderungen der Lysimeter in einem bestimmten Zeitraum erhoben werden. Im Zuge dieser Arbeit wurde ein Analysezeitraum von März bis Oktober 2010 festgelegt.

5.3.1. Wasserspannung (G&K, Weiden, ohne Bewuchs)

Die Wasserspannung wurde mittels vier Tensiometern, die in unterschiedlichen Bodentiefen eingebracht wurden, gemessen. Die Grafiken sind wieder in dieselben Zeiträume unterteilt wie im Kapitel 5.2. (Meteorologische Kenngrößen des Untersuchungszeitraumes). Im ersten Zeitabschnitt (März – Mai) gibt es keine brauchbaren Wasserspannungsdaten für März. Diese beginnen erst mit dem 16 April.

5.3.1.1. Wasserspannung Zeitraum 1: (März) – Mai (2010)

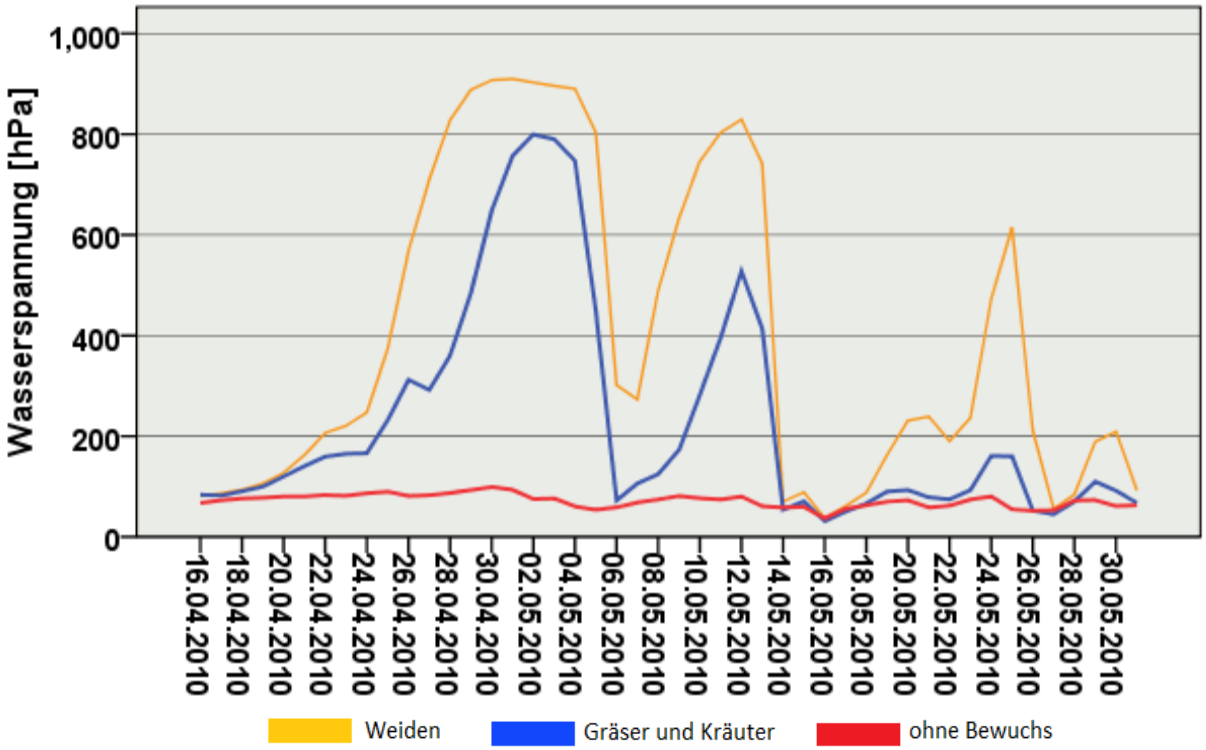

Abbildung 93: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010)

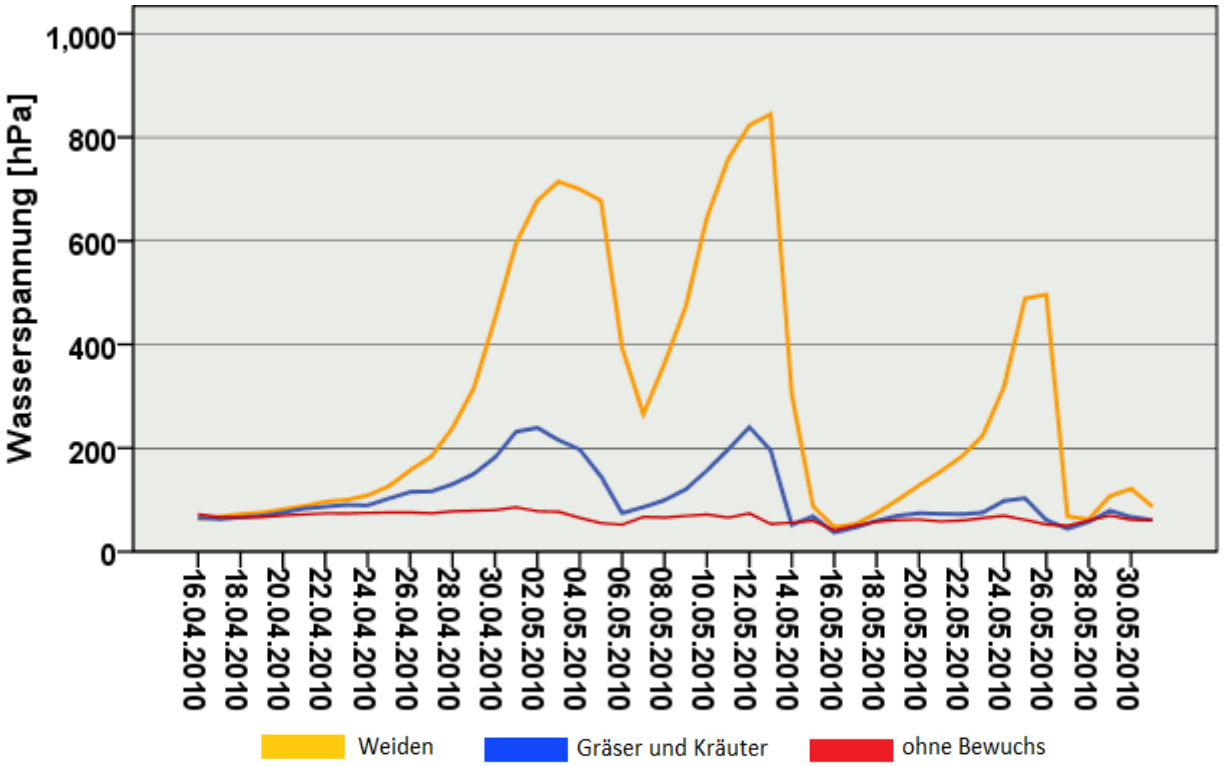

Abbildung 94: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010)

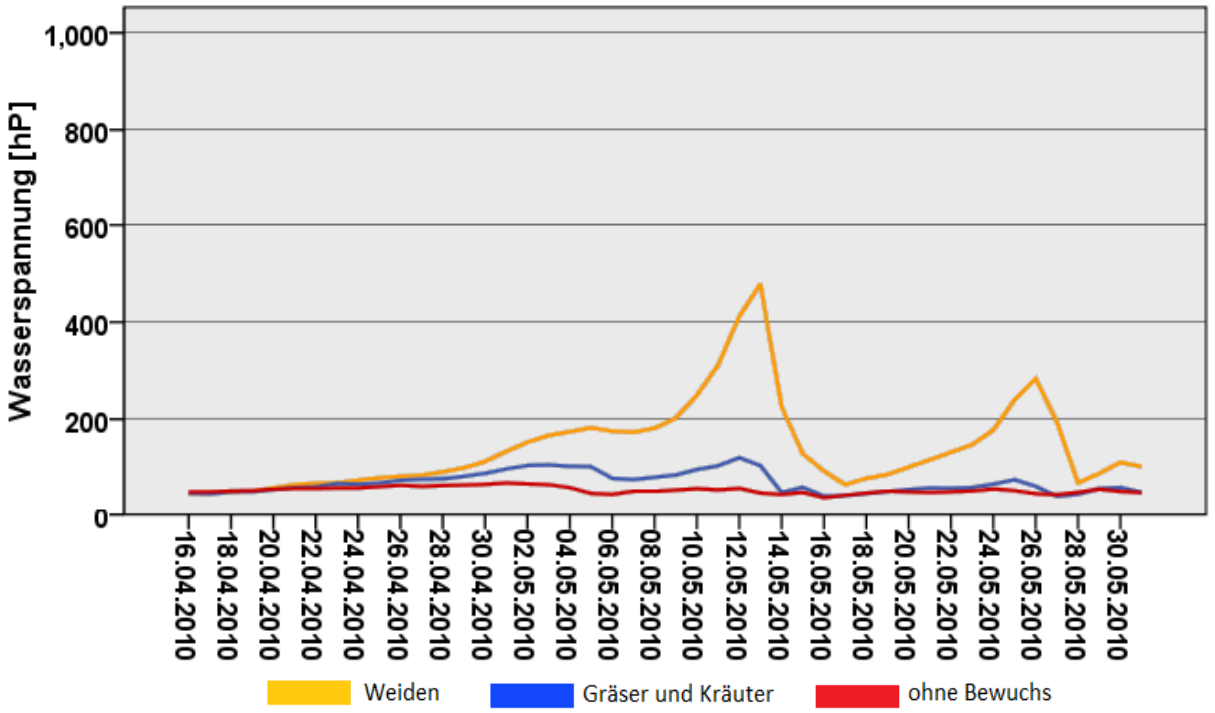

Abbildung 95: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010)

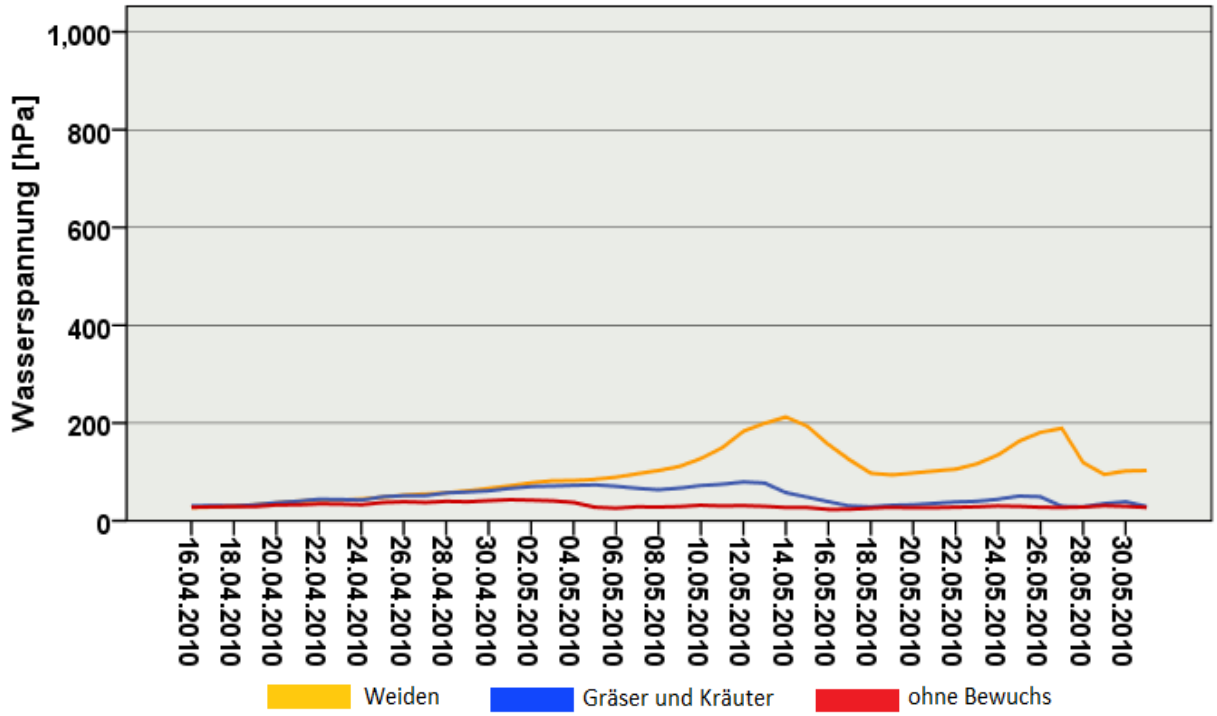

Abbildung 96: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 50 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010)

Aus den Wasserspannungsgrafiken des ersten Zeitraumes (Abbildung 93 – 96) lässt sich ablesen, dass die Wasserspannung der bewachsenen Lysimeter mit der Tiefe abnimmt, während sich die Wasserspannung des Lysimeters ohne Bewuchs in allen vier Tiefen kaum ändert. Die Wasserspannung der Weiden sowie der Gräser und Kräuter liegt meist deutlich über der der unbewachsenen Fläche. Zwischen 14. und 16. sowie 27. und 28. Mai, beides Phasen starken Niederschlags, sinkt die Wasserspannung der bewachsenen Lysimeter jedoch in allen Tiefen annähernd auf die niedrigen Werte des Lysimeters ohne Bewuchs. Dies kann man vor allem in den 2 oberen Tiefen (Abbildung 93 und 94) sehen, da hier der Abfall deutlich steiler ausfällt als in den tieferen Bodenschichten.
Die Wasserspannung der Weiden ist durch die höhere Transpiration im ersten Zeitraum in allen gemessenen Tiefen sichtbar höher als die der Gräser und Kräutermischung, die lediglich in der oberen Bodenschicht von 5 cm ähnlich hohe Wasserspannungswerte erreicht.

5.3.1.2. Wasserspannung Zeitraum 2: Juni – August (2010)

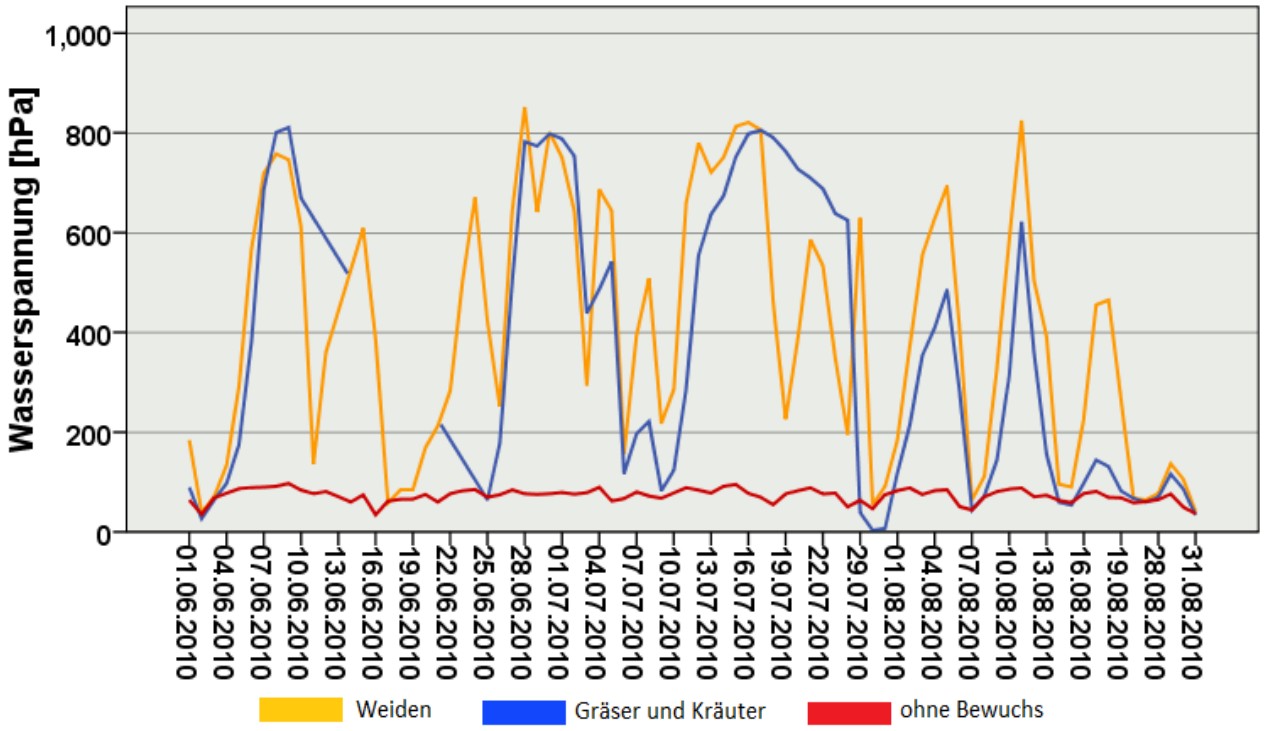

Abbildung 97: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch- Wagram, Juni bis August 2010)

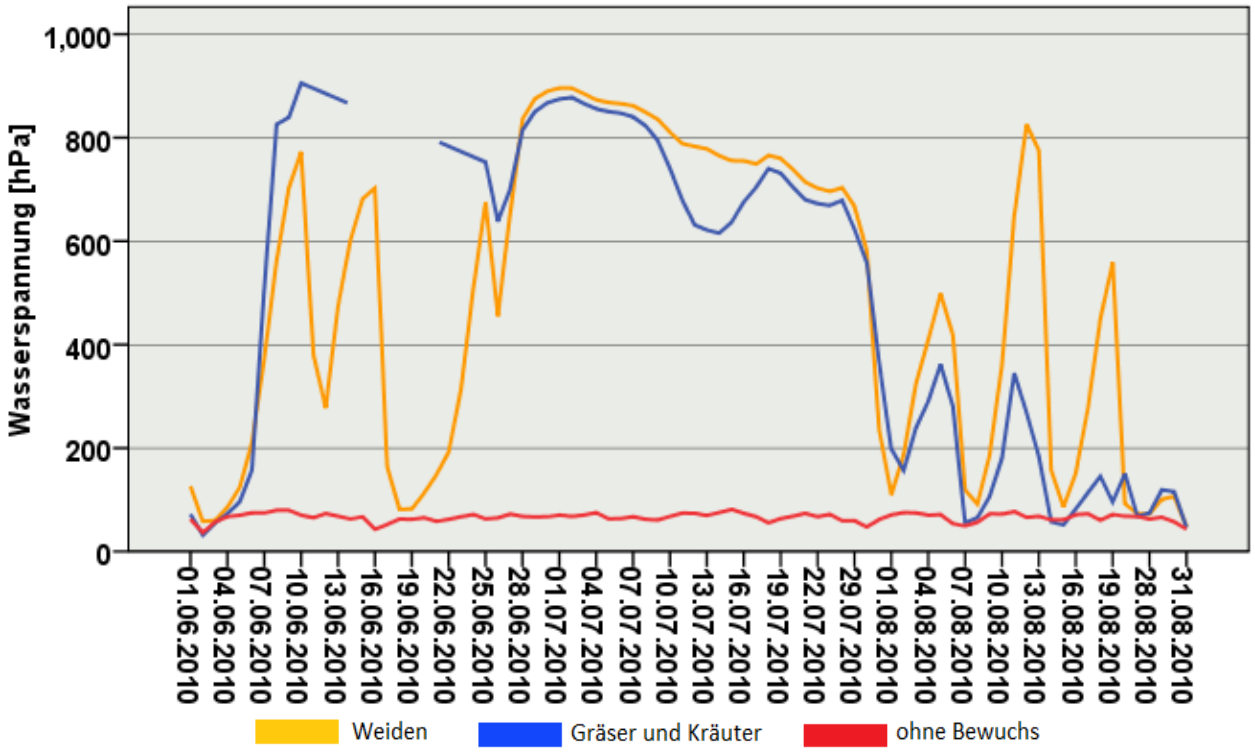

Abbildung 98: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010)

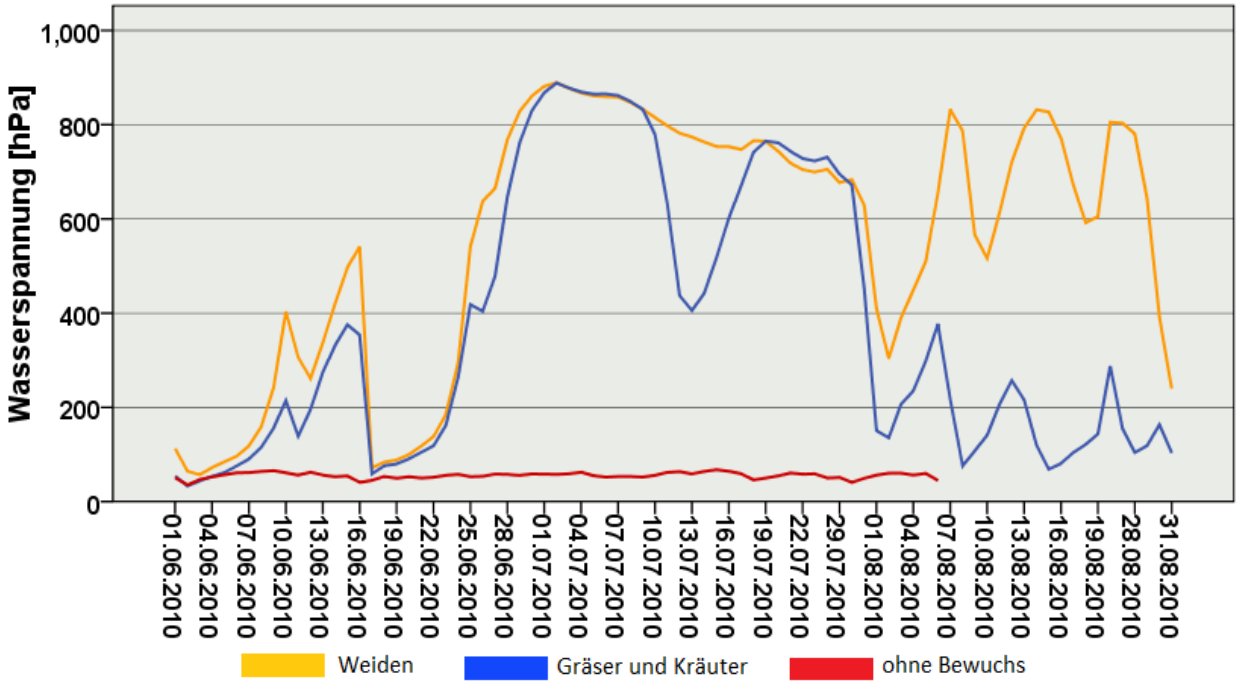

Abbildung 99: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010)

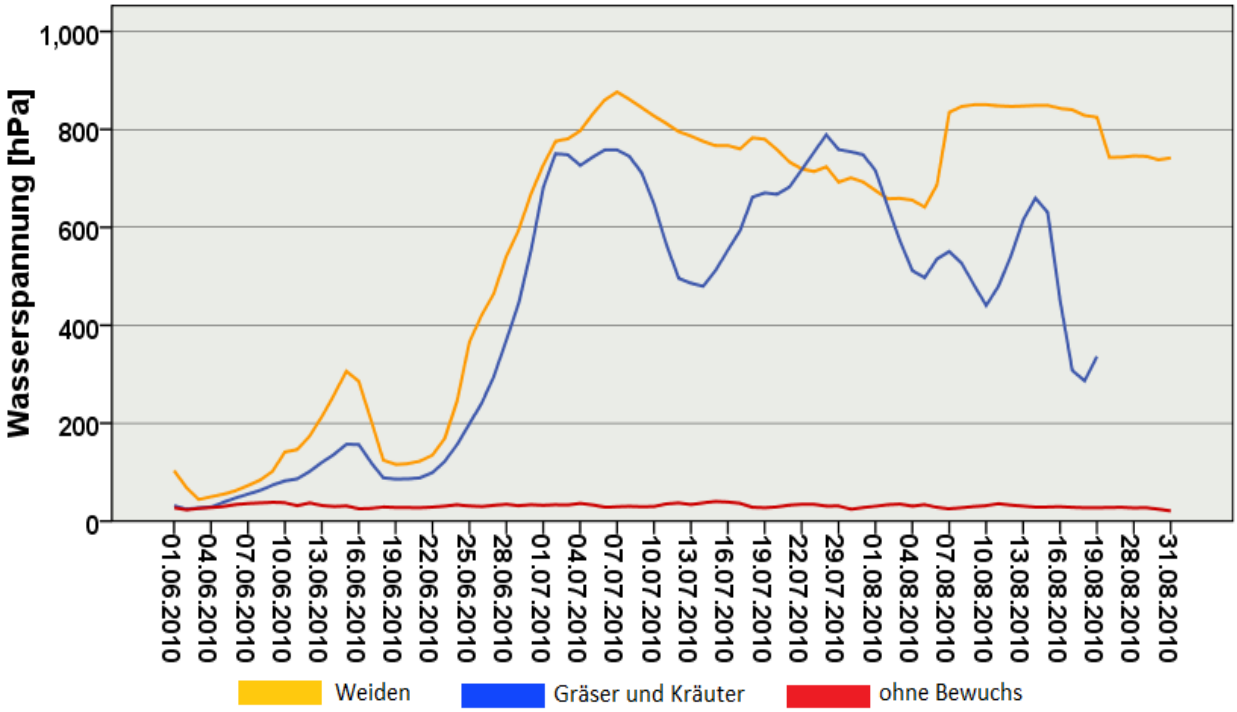

Abbildung 100: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 50 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010)

Im zweiten Zeitraum ist bei dem Gräser- und Kräuter- Lysimeter in den ersten zwei gemessenen Schichten von 5 cm (Abbildung 97) und 15 cm (Abbildung 98) ein Datenausfall zwischen 10 und 24 Juni zu sehen. An dieser Stelle ist die Linie daher unterbrochen. Vom 12. bis 18. Juni sind starke Niederschläge gemessen worden, weshalb es in diesem Zeitraum zu einem starken Abfall der Wasserspannung bei den bepflanzten Lysimetern kommt.

In allen gemessenen Tiefen (Abbildung 97 – 100) liegt die Wasserspannung der Weidensträucher meist über der der Gräser und Kräutermischung. Die Unterschiede zwischen beiden Bewuchsformen fallen in diesem zweiten Untersuchungszeitraum jedoch deutlich geringer aus. Dies betrifft vor allem die Bodenschicht von 50 cm Tiefe, wo die Wasserspannung der Gräser und Kräuter, im Juli und August, mit teilweise knappen 800 hPa nicht weit von der der Weidensträucher entfernt ist (Abbildung 100). Vergleicht man dies mit derselben Tiefe im ersten Untersuchungszeitraum (Abbildung 96), wo die Wasserspannungswerte der Gräser und Kräuter nur 100 hPa und die der Weidensträucher 200 hPa ausmacht, ist dies ein starker Anstieg beider Bepflanzungen.

Dies ist darauf zurückzuführen, dass im Juli sowie August bei beiden Bewuchsformen die oberirdische wie unterirdische Biomasse im Gegensatz zum Frühjahr deutlich zugenommen hat. Aus diesem Grund kann in diesem Zeitraum mehr Wasser über die Pflanzen aufgenommen und transpiriert werden, was wiederum die Wasserspannung bis in die tiefe Schicht von 50 cm deutlich ansteigen lässt.

5.3.1.3. Wasserspannung Zeitraum 3: September bis Oktober

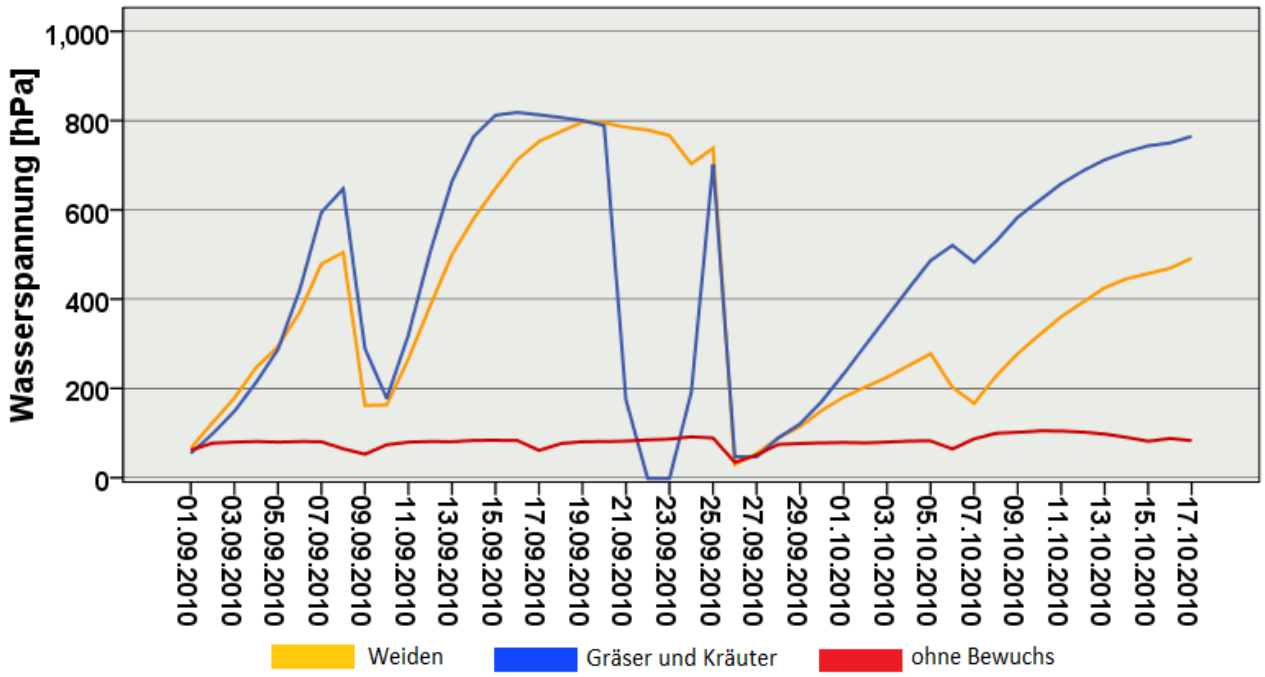

Abbildung 101: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe- Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010)

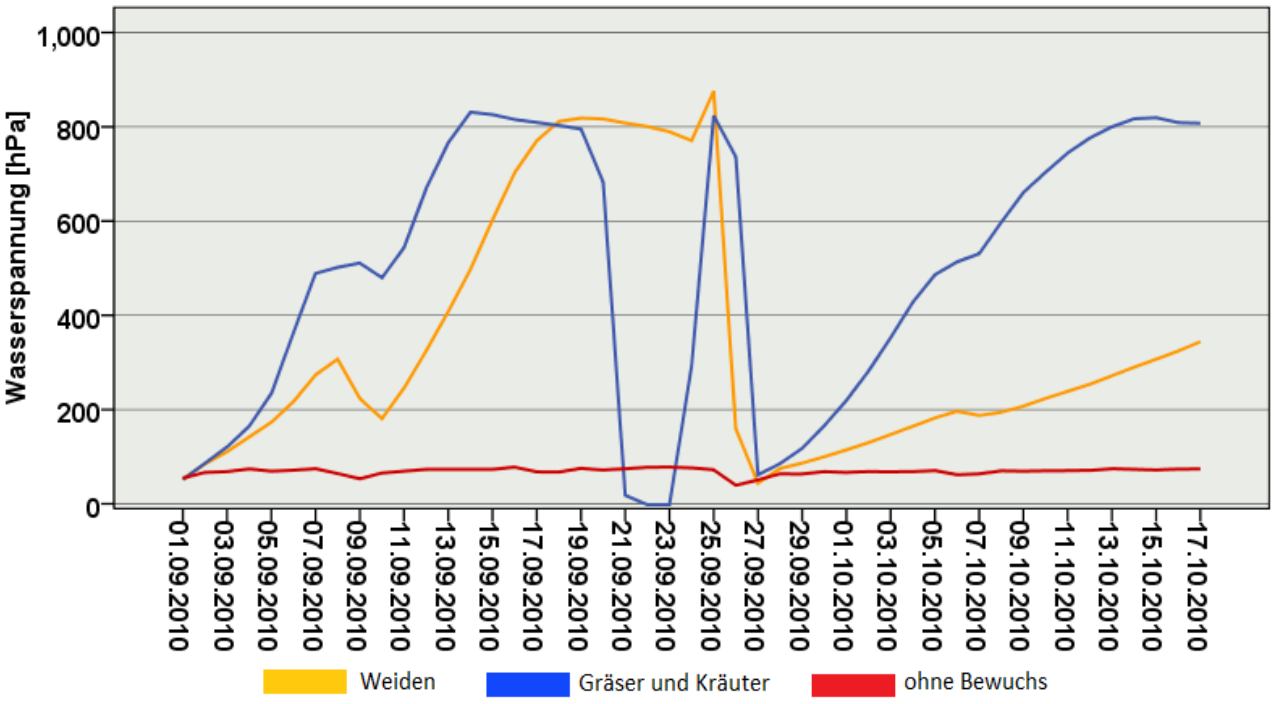

Abbildung 102: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010)

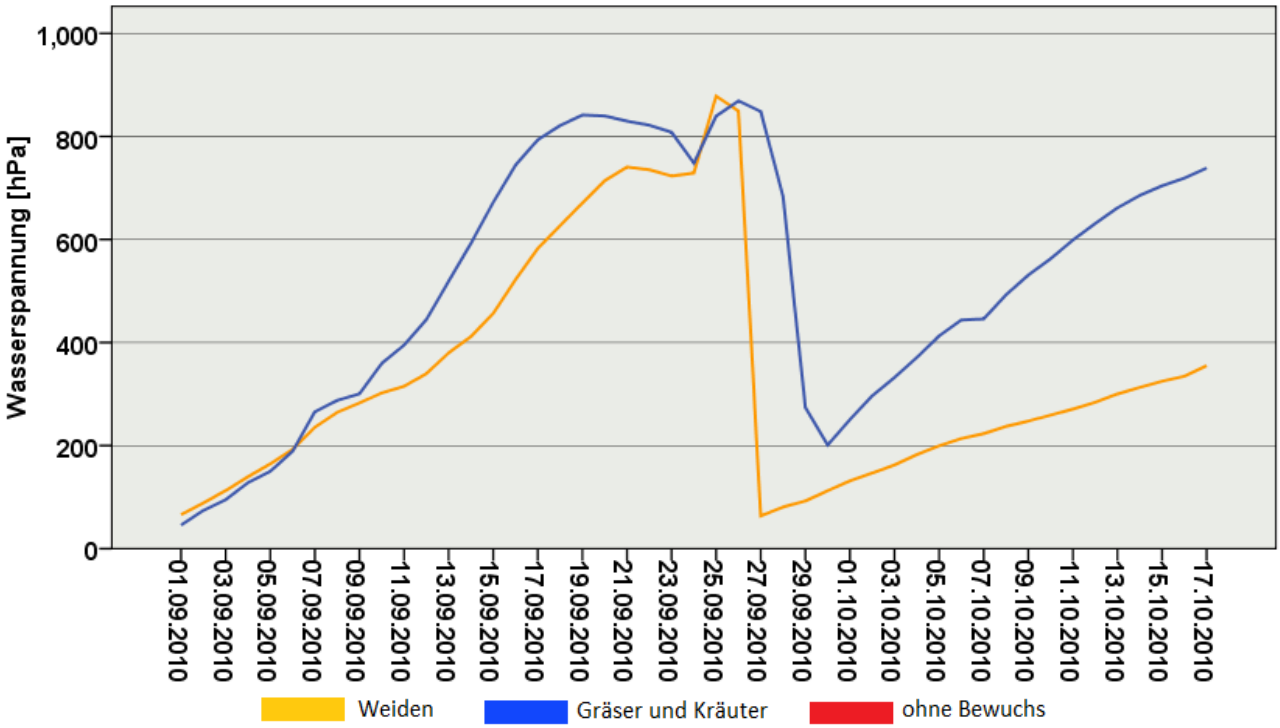

Abbildung 103: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe- Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010)

Wegen starker Regenfälle Ende September ist um den 27. herum ein sehr steiler Abfall in der Wasserspannung aller Bodentiefen beider bepflanzter Lysimeter zu vernehmen (Abbildung 101 – 103).
Die Wasserspannungswerte des Lysimeters ohne Bewuchs bewegen sich wie in den zwei Zeiträumen davor im gleichen Bereich von um die 100 hPa (Abbildung 101 und 102).
Im dritten Zeitraum fielen die Tensiometer des unbewachsenen Lysimeters, in 30 und 50 cm Tiefe, sowie die beider Bepflanzungen in 50 cm aus, weshalb es von diesen Bereichen keine brauchbaren Messergebnisse gibt.
Der plötzliche Abfall der Wasserspannung des mit Weidensträuchern bepflanzten Lysimeters in 5 (Abbildung 101) und 15 cm (Abbildung 102) zwischen 21 und 23 September ist vermutlich ein Messfehler, da zu diesem Zeitpunkt kein Niederschlag gemessen wurde und die Wasserspannung des mit Gräsern und Kräuter begründen Lysimeters nicht abfällt.
Ende September bis Mitte Oktober ist die Wasserspannung der Gräser und Kräuter in den Schichten von 5 bis 15 cm deutlich höher als die der Weidensträucher (Abbildung 101 und 102).

Betrachtet man alle Wasserspannungsgrafiken über den gesamten Untersuchungszeitraum (Abbildung bis 103) kann man erkennen, dass in den frühen Monaten von März bis Mai (Abbildung 93 - 95) die Wasserspannung der Weiden unter 5 cm Tiefe um einiges höher ist als die der Gräser- und Kräutermischung. In den Sommermonaten (Abbildung 97 - 100) sind die Werte hingegen meist nahezu gleich.

Daraus lässt sich schließen, dass die Gräser und Kräuter erst später beginnen tief zu wurzeln und somit länger brauchen als die Weiden um dieselbe Wasseraufnahmekapazität zu erreichen.
Danach ist das Wurzelwerk der Gräser und Kräuter jedoch so stark ausgebildet, dass es nahezu so viel Wasser wie das der Weiden aufnehmen kann.

5.3.2. Wassergehalt (G&K, Weiden, ohne Bewuchs)

Zum Ermitteln des Wassergehalts wurden in jeden der drei wägbaren Lysimeter jeweils zwei Wassergehaltssonden in unterschiedlichen Tiefen (5 cm und 30 cm) eingebaut.
Auch hier wurde die Zeitspanne in die drei selben Perioden unterteilt wie bei den vorigen Kapiteln.

5.3.2.1. Wassergehalt Zeitraum 1: März bis Mai

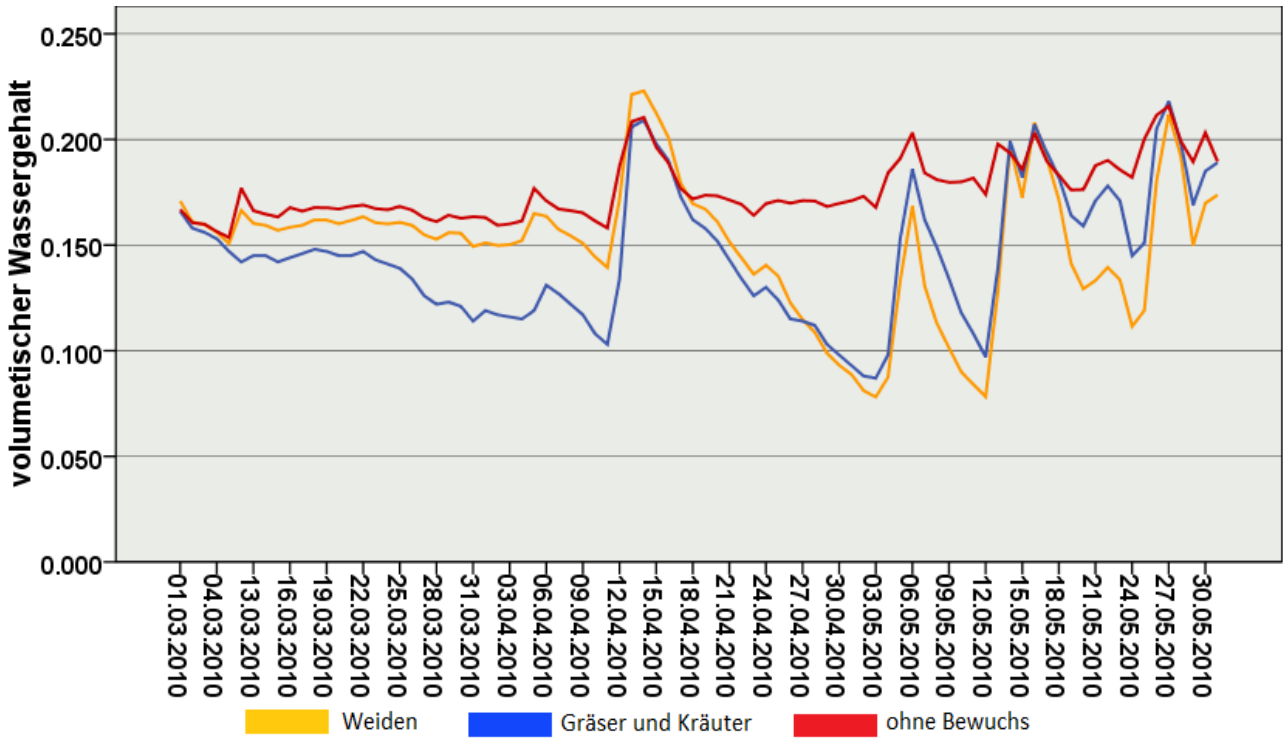

Abbildung 104: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch – Wagram, März bis Mai)

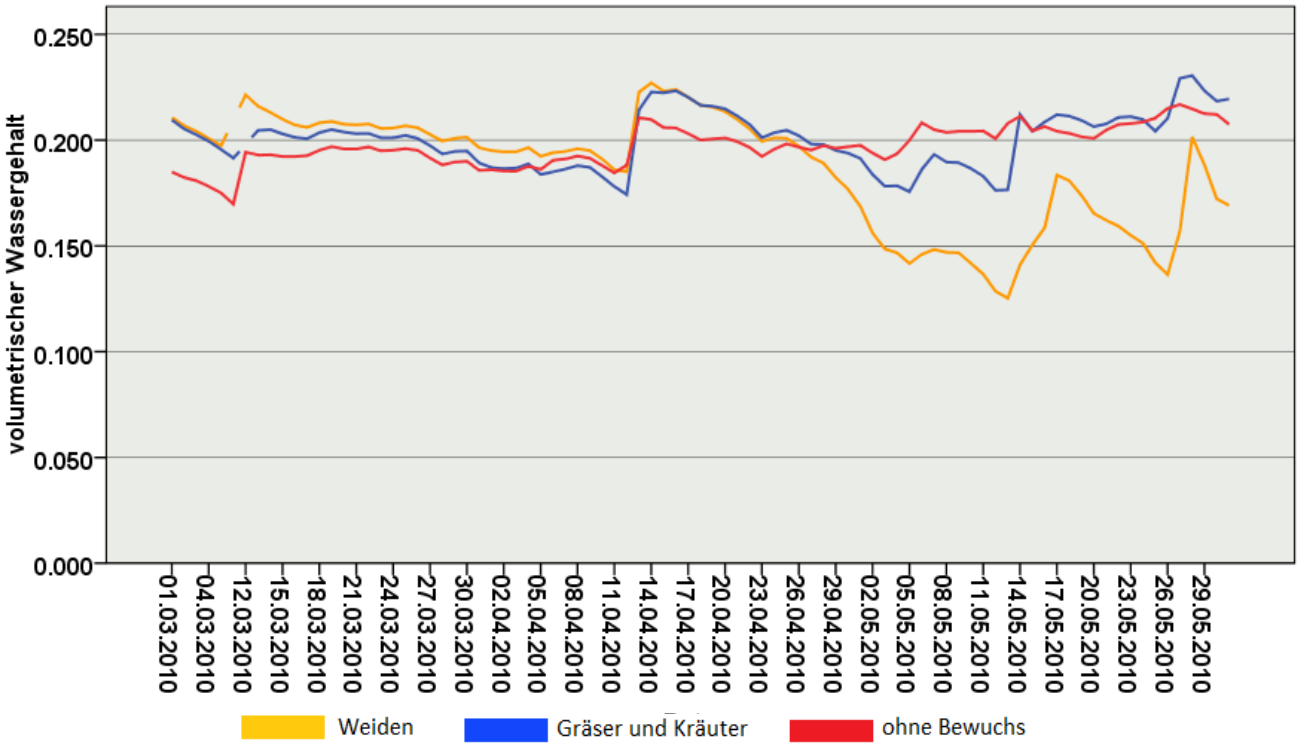

Abbildung 105: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch – Wagram, März bis Mai)

Der Wassergehalt beider bepflanzten Lysimeter liegt meist deutlich unter dem des unbegrünten Lysimeters. Zwischen 12. und 15. April steigt der Wassergehalt durch Niederschlag auf über 20 Volumsprozent an.
Beim Weidenstrauch- sowie Gräser- und Kräuter- Lysimeter sinkt der Wassergehalt in 5 cm Tiefe (Abbildung 104) innerhalb der nächsten Tage wieder deutlich auf bis zu 10 Volumprozent ab, während im unbewachsenen Lysimeter der Wassergehalt nicht tiefer als auf 17 Volumprozent sinkt.
In 30 cm (Abbildung 105) Tiefe liegt der Wassergehalt der Weiden im gesamten Mai sichtbar niedriger als der der Gräser und Kräuter.

5.3.2.2. Wassergehalt Zeitraum 2: Juni bis August

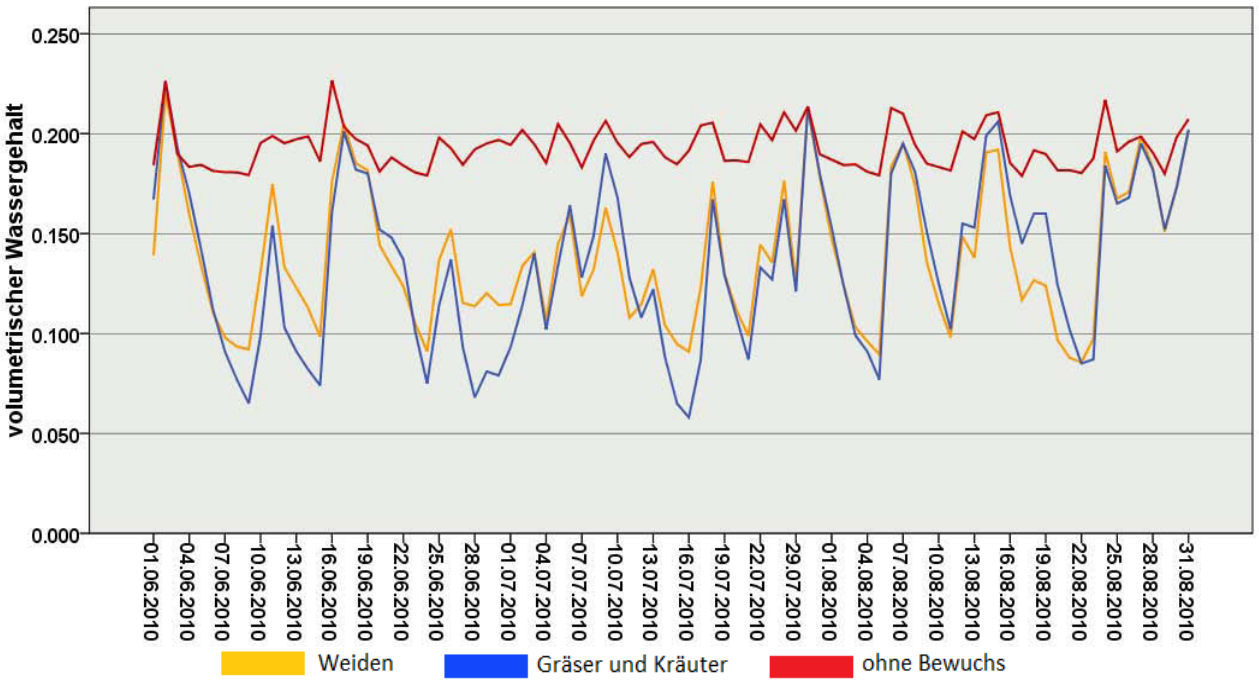

Abbildung 106: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August)

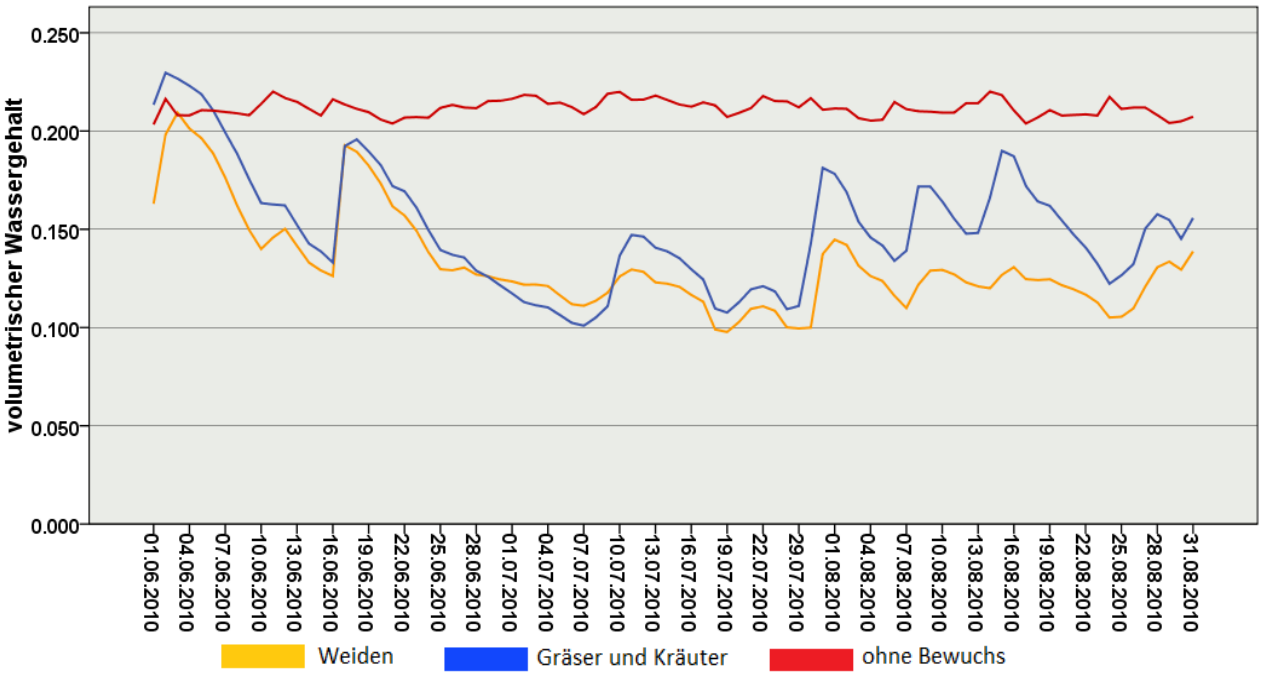

Abbildung 107: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August)

Im zweiten Zeitraum (Juni bis August) kommt es durch immer wieder auftretende Niederschläge zu sehr starken Wassergehaltsschwankungen bei den bepflanzten Lysimetern. Dies lässt sich in Abbildung 106 gut beobachten, die den Wassergehalt in 5 cm Tiefe darstellt.

In diesem Bereich sinkt der Wassergehalt der Gräser und Kräuter nach Regenfall tiefer als der der Weiden. In 30 cm Tiefe (Abbildung 107) hingegen weisen die Weidensträucher einen sichtbar niedrigeren Wassergehalt auf als die Gräser und Kräuter.

5.3.2.3. Wassergehalt Zeitraum 1: September bis Oktober

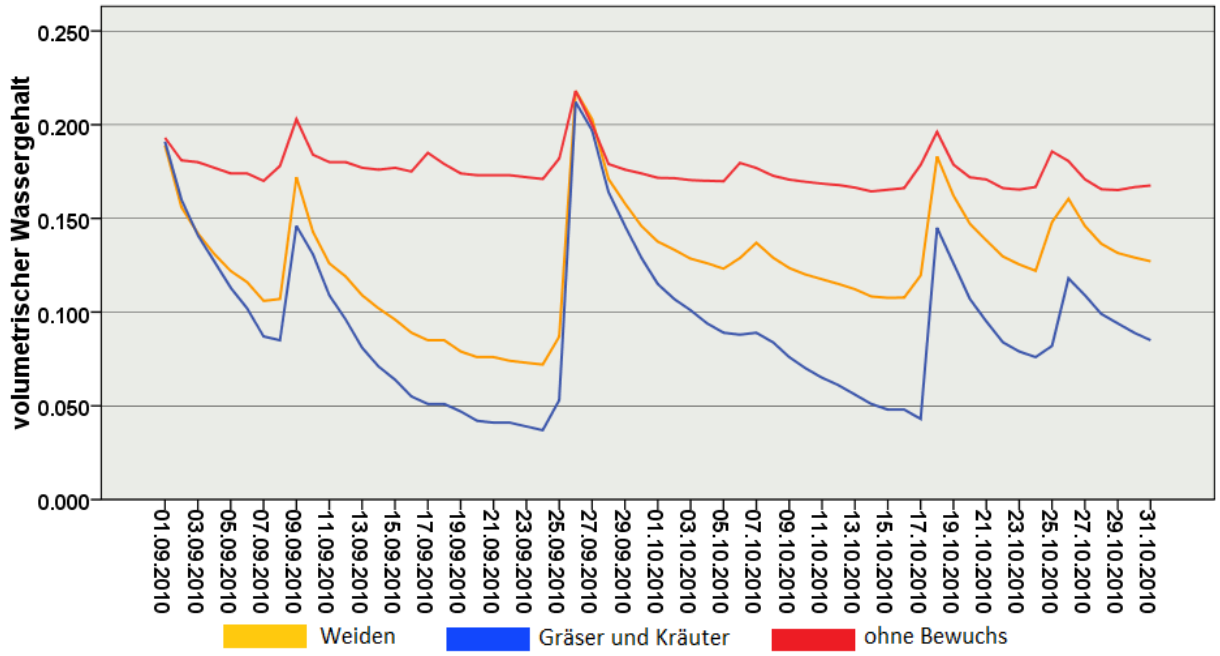

Abbildung 109: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober)

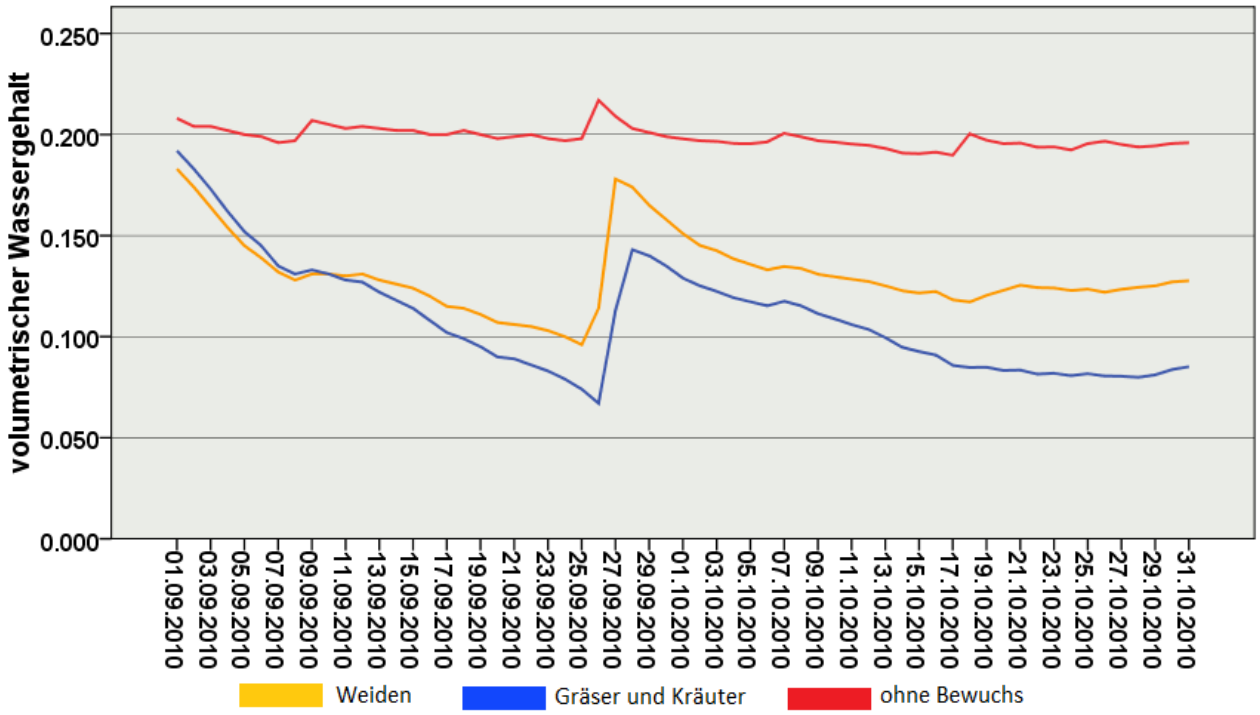

Abbildung 108: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober)

Im Zeitraum von September bis Oktober ist in beiden Bodentiefen (Abbildung 108 und 109) um den 26 September ein starker Anstieg im Wassergehalt zu vernehmen, der danach bei den Bepflanzungen im Gegensatz zur unbewachsenen Fläche schnell wieder absinkt.
Der Wassergehalt des mit Gräser und Kräuter bewachsenen Lysimeters fällt in beiden Tiefen unter dem der Weidensträucher.

Über dem gesamten Untersuchungszeitraum (März bis Oktober) liegt der Wassergehalt im Lysimeter ohne Bewuchs deutlich höher als bei den Weidenstrauch- und Gräser- und Kräuter- Lysimeter. Im März (Abbildungen 104 und 105) ist der Unterschied zwischen den beiden Bewuchsformen und der Nullvariante niedriger, da sich die Pflanzen erst kurz nach der Winterruhe befinden.
An Tagen mit viel Regen steigt der Wassergehalt aller drei Lysimeter stark an und ist fast gleich. Bei den bepflanzten Varianten nimmt der Wassergehalt danach schnell wieder ab, während er bei dem unbewachsenen Lysimeter kaum sinkt.
Aus Abbildungen 104, 106 und 108 lässt sich erkennen, dass in der Messschicht von 5 cm der Wassergehalt bei den Gräser und Kräutern meist etwas stärker abnimmt als bei den Weiden. Dies liegt vermutlich an einer stärkeren Wurzelausbildung der Gräser und Kräuter im oberen Bereich. Die Wurzeln der Weiden reichen in größere Tiefen.

5.3.3. Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt

Das Verhältnis von Wassergehalt zu Wasserspannung ist ein wichtiges Charakteristikum für jeden Boden und wurde bereits in den Grundlagen (siehe Kapitel 3.3.7. - Bodenwasser) erläutert. Unabhängig von Bodentiefe, Bepflanzung oder Tageszeit ist dieses Verhältnis bei einem bestimmten Boden immer ähnlich.

Was jedoch noch nicht erwähnt wurde ist, dass sich zwischen einer Phase der Desorption (Entwässerung) eines gesättigten Bodens und einer Phase der Bewässerung (Sorption) desselben Bodens in trockenem Zustand unterschiedliche Kurven ergeben können. Dies wird als Hysteresis-Effekt bezeichnet. Dabei liegt die Wasserspannungslinie bei Entwässerung über der der Bewässerung (GISI, 1997).
Um diesen Unterschied, falls vorhanden, aufzuzeigen werden in folgenden Grafiken die Punkte der Bewässerung so wie der Entwässerung in unterschiedlichen Farben dargestellt. Um die unterschiedlichen Bewuchsformen vergleichen zu können, wird von jedem Typ eine Grafik mit normalen Wasserspanungswerten (hPa) und eine mit den logarithmierten Werten (pF-Werte) der Wasserspannungsdaten, dargestellt. Mit den pF – Grafiken lassen sich die Ergebnisse besser mit etwaiger Literatur vergleichen.
Als Zeitspanne wird der gesamte Untersuchungszeitraum (März bis Oktober 2010) herangezogen.

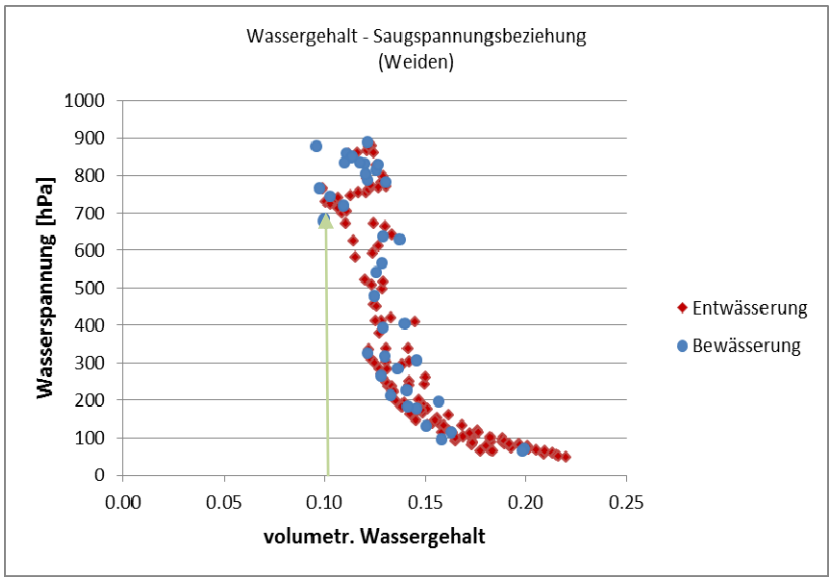

Abbildung 110: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

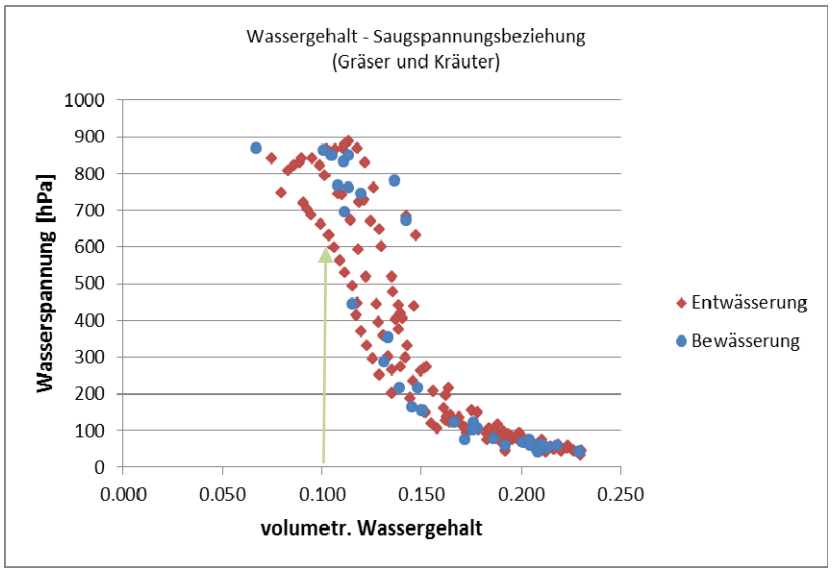

Abbildung 111: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

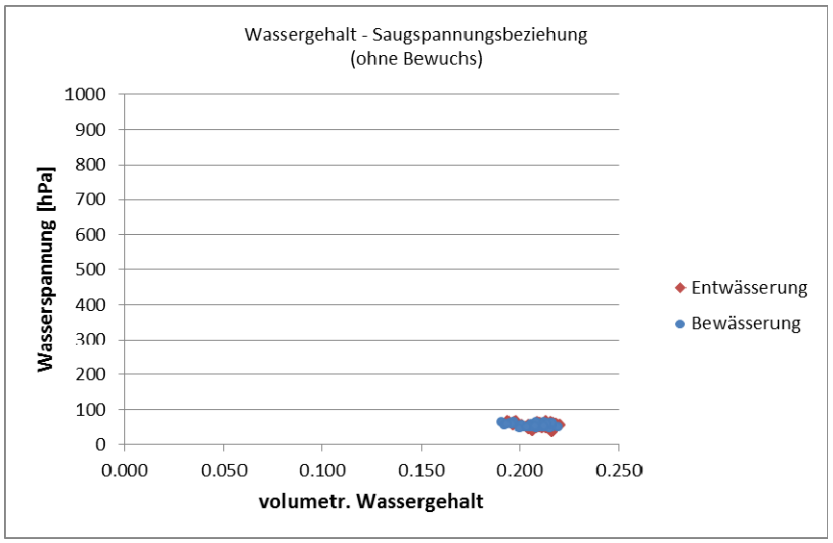

Abbildung 112: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

In allen vorherigen Grafiken (Abbildung 110 bis 112) lässt sich gut erkennen, dass die Wasserspannung mit der Abnahme des Wassergehalts im Boden steigt.
Beim Lysimeter ohne Bewuchs liegt die maximal erreichte Wasserspannung bei gerade einmal 100 hPa (Abbildung 112). Im Vergleich dazu erreicht der Wert der Wasserspannung bei beiden begrünten Lysimetern bis zu über 900 hPa (Abbildung 110 und 111).
Die hohe Wasserspannung entsteht durch die starke Reduktion des Wassergehaltes über die Wurzeln.
Vergleicht man die Weidensträucher (Abbildung 110) mit den Gräser und Kräutern (Abbildung 111) fällt auf, dass bei einem gleichen Wassergehalt von 10 % Volum-Anteil die Wasserspannung der Weidensträucher bei 700 hPa liegt, während die des Gräser- und Kräuter- Lysimeters nur 600 hPa erreicht. Der Grund dafür ist vermutlich eine verstärkte Anordnung der Weidenwurzeln rund um die Keramikzelle der Tensiometer, weshalb diesem mehr Wasser über die Wurzeln entzogen wird.

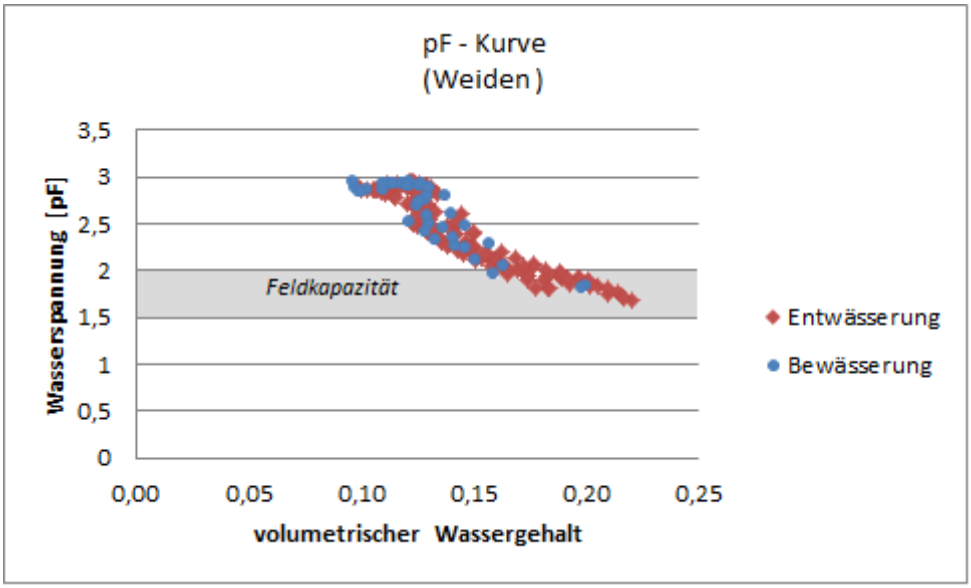

Abbildung 113: pF-Werte der Wasserspannung – Weiden (Deutsch – Wagram, 2010)

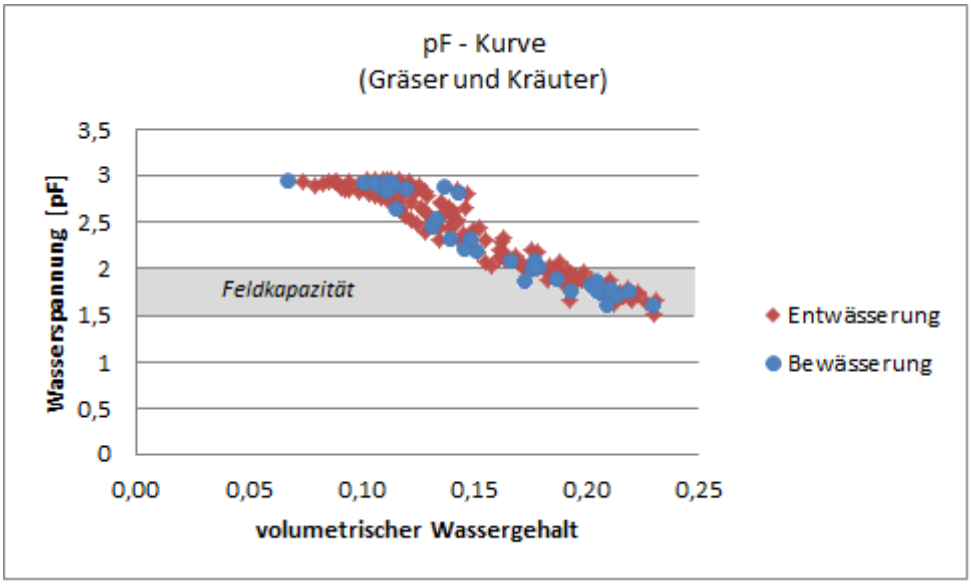

Abbildung 114: pF-Werte der Wasserspannung - Gräser und Kräuter (Deutsch – Wagram, 2010)

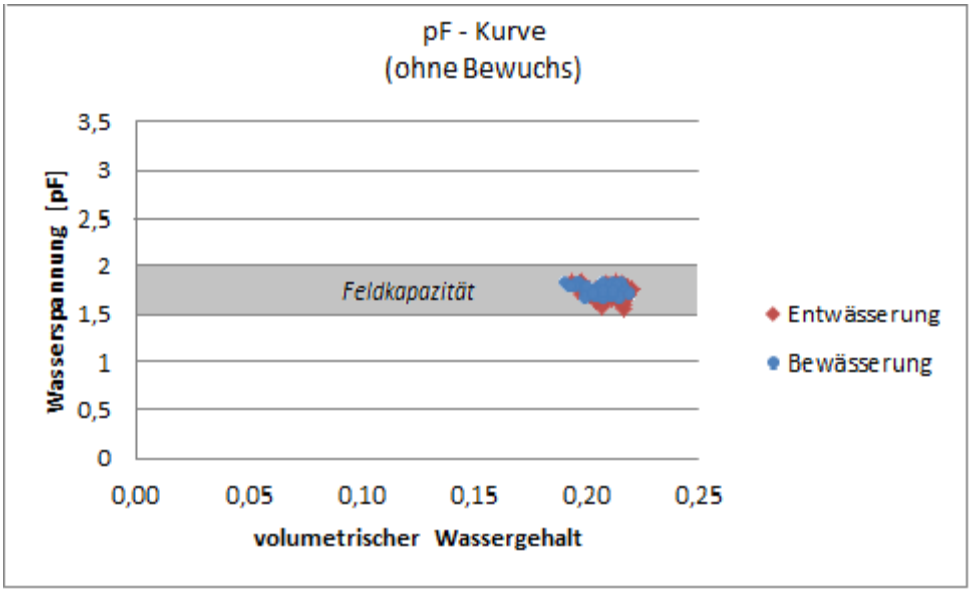

Abbildung 115: pF-Werte der Wasserspannung - ohne Bewuchs (Deutsch – Wagram, 2010)

Wie man in Abbildung 113 bis 115 sehen kann, befindet sich die Feldkapazität des Lysimeterbodens zwischen 1.5 und 2 pF, wobei sie nicht ganz genau bestimmt werden kann. In der Grafik von SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) liegt diese vergleichsweise in einem Bereich von 1.8 und 2.5 pF.

Durch die logarithmische Darstellung der Wasserspannungswerte können punktweise Wasserspannungskurven erstellt werden, die anschließend mit bereits vorhandenen Ergebnissen der Literatur verglichen werden. Folgende Grafik wurde nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL (2002) gezeichnet, wobei die grüne Linie den Verlauf der Wasserspannungskurve vom Boden der Lysimeter in Deutsch - Wagram darstellt.

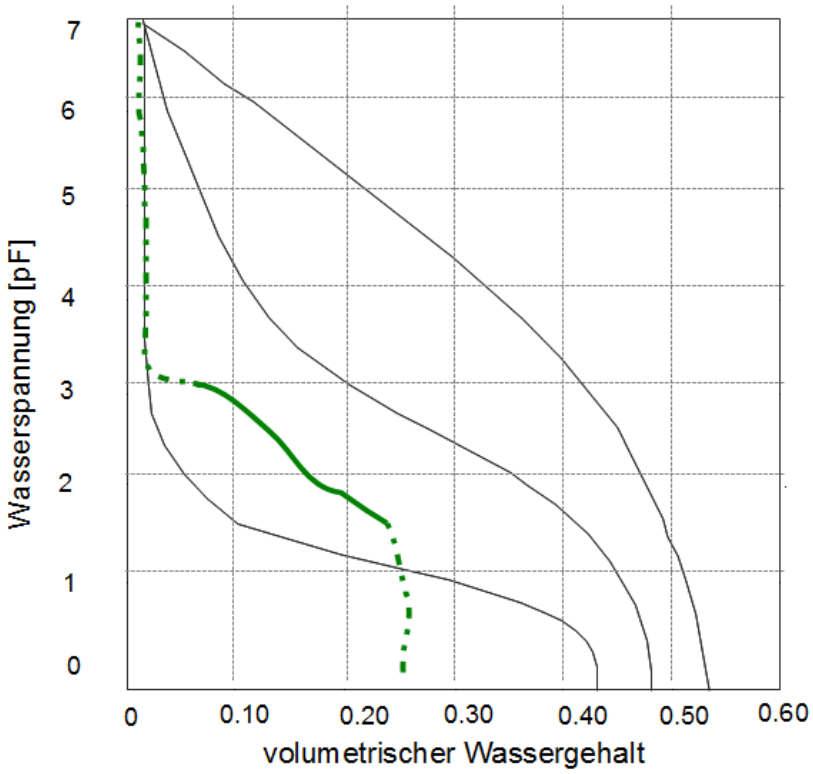

Abbildung 116: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt des Bodens (als pF-Wert) für die Hauptbodenarten sowie für den Boden der Lysimeter (modifiziert nach SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL, 2002)

Wie man in Abbildung 116 schön sehen kann, liegt die Wasserspannungskurve der Lysimeter (grüne Linie) zwischen den zwei Hauptbodenarten Sand und Schluff.
Da die Tensiometer nur bis zu 1000 hPa messen, fällt die Wasserspannungslinie dementsprechend kurz aus (grüne durchgehende Linie). Ihren weiteren Verlauf kann man nur vermuten. Da im Bereich von ungefähr 25 Volumprozent die maximale Sättigung des Bodens erreicht ist, kann man den Verlauf der Wasserspannungslinie nach unten (strichlierte Linie) begrenzen und ungefähr annehmen. Nach oben hin geht die Linie wahrscheinlich weiter in Richtung des Sandbodens und läuft dann ähnlich wie diese gerade hinauf.

5.3.4. Sickerwassermenge

Zum Messen der Sickerwassermenge wurden, wie in Kapitel 4.3.3. Messtechnik genauer beschrieben, Kippzähler eingesetzt. Um die Grafiken überschaubarer zu machen wurde der gesamte Zeitraum wieder in dieselben 3 Zeiträume unterteilt, wie schon zuvor bei den Wasserspannungs- und den Wassergehaltsgrafiken.

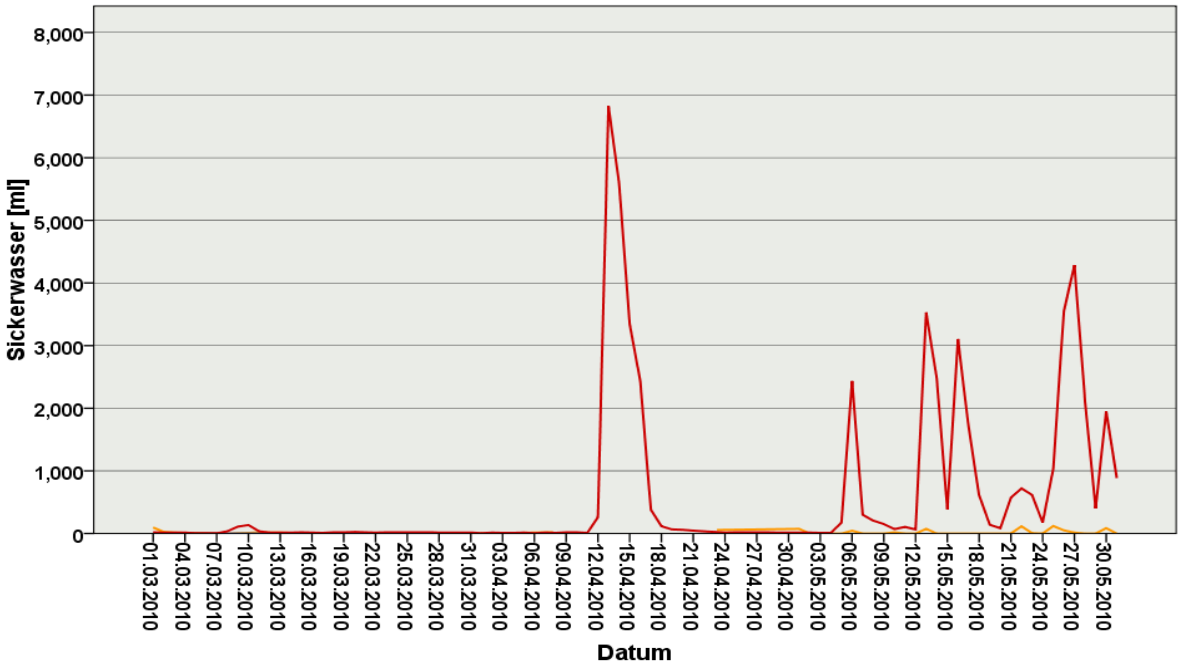

Abbildung 117: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 1 (Deutsch – Wagram, März bis Mai 2010)

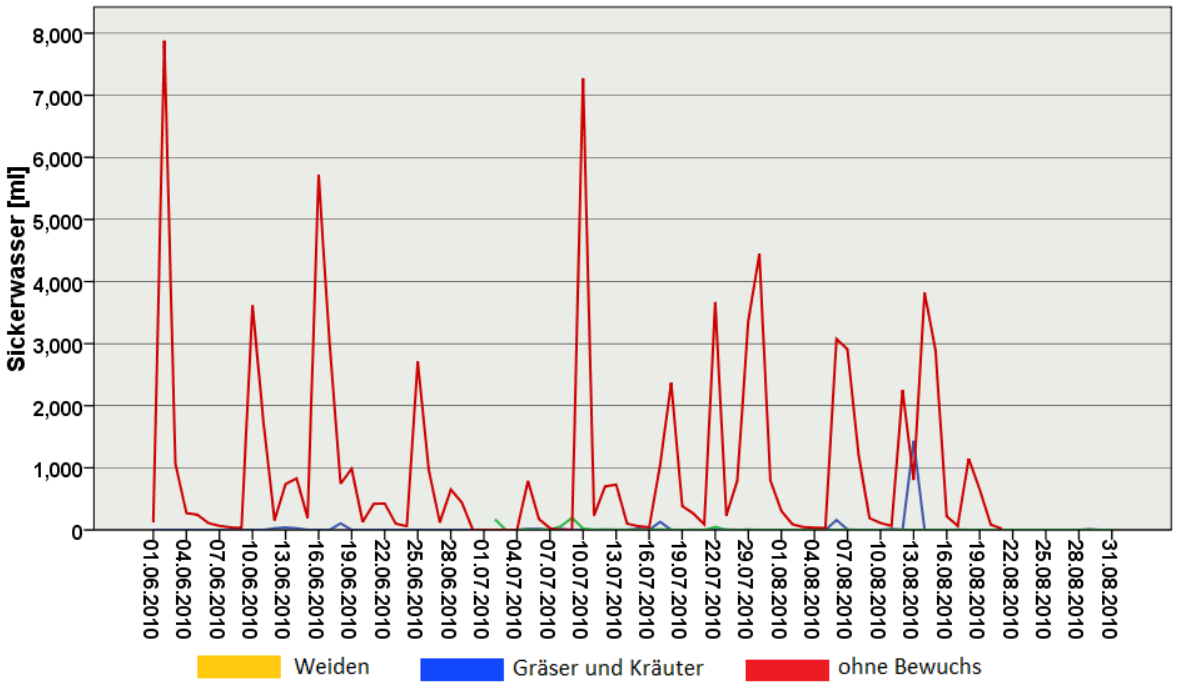

Abbildung 118: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010)

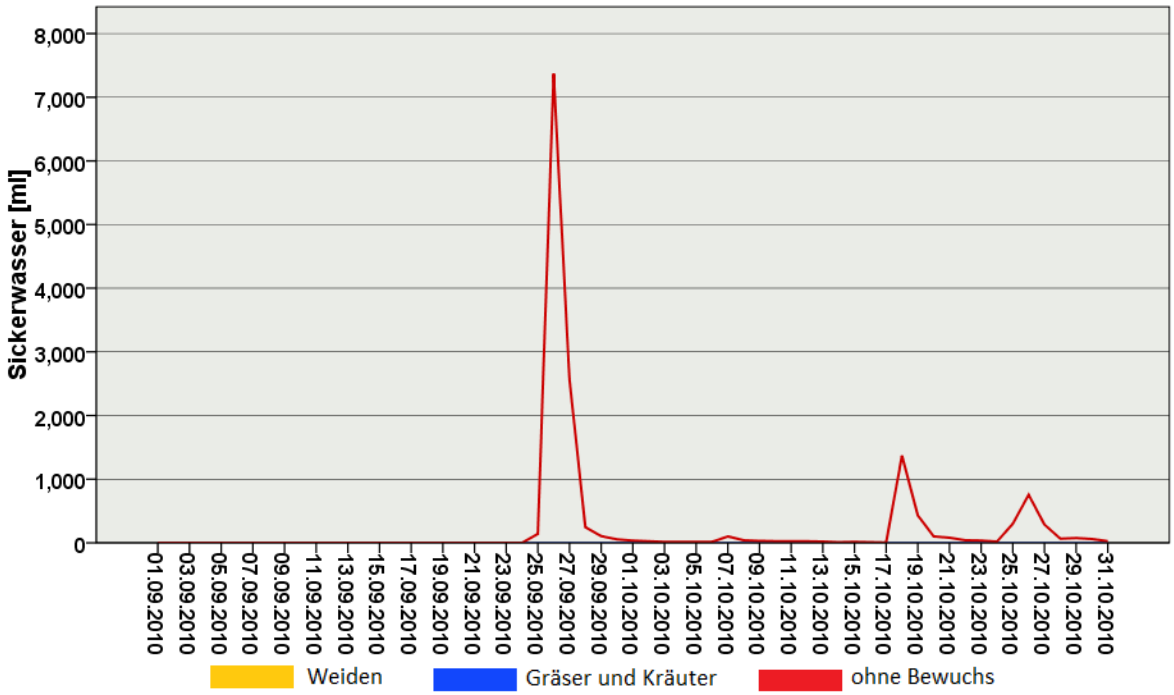

Abbildung 119: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 3 (Deutsch – Wagraam, September bis Oktober 2010)

Aus den drei Grafiken (Abbildung 117 bis 119) der Sickerwassermenge ist zu entnehmen, dass das Lysimeter ohne Bewuchs sehr starke Schwankungen aufweist. Bei den zwei bepflanzten Varianten gibt es großteils keine Sickerwassermenge beziehungsweise ist diese sehr gering. Dies liegt an der guten Durchwurzelung und somit Wasseraufnahmefähigkeit der Weiden und der Gräser- Kräutermischung.

5.4. Berechnung Evapotranspiration

5.4.1. Reale Evapotranspiration

Die reale Evapotranspiration kann unter anderem bei Einsatz von Lysimeteranlagen über die Bodenwasserbilanz ermittelt werden. Dabei wird die oberflächlich abfließende Wassermenge vernachlässigt, da unsere Lysimeter geschlossene Behälter sind.
Sie lässt sich, wie in Kapitel 3.6.3.1. (Lysimeter) beschrieben, als Restglied der Wasserbilanzgleichung wie folgt abschätzen:

reale Evapotranspiration *= Input total – Sickerwassermenge – Wasservorratsänderung*

$$ET_a = P\text{-}S_i - \Delta W_b$$

In der folgenden Tabelle werden die monatlichen realen Evapotranspirationswerte (März bis Oktober 2010) der Weidensträucher und der Gräser- Kräutermischung (G.K) dargestellt. Die reale Evaporation (E_a) des Lysimeters ohne Bewuchs (o.B.) wird mit selbiger Formel

ermittelt. Da die Fläche des Fasses lediglich 0,241 m^2 ausmacht, muss die reale Evapotranspiration noch auf einen m^2 hochgerechnet werden, damit ein Bezugswert zum Vergleich mit etwaiger Literatur entsteht. Bei den rot dargestellten Ergebnissen wurde als Wert der Sickerwassermenge Null angenommen, da keine brauchbaren Daten für diesen Zeitraum vorhanden waren. Die Evaporationsergebnisse weichen dadurch nur gering ab, da die Sickerwassermengen beider bewachsenen Lysimeter während des gesamten Zeitraums nur sehr niedrig sind.

Tabelle 12: reale Evapotranspiration des Untersuchungszeitraumes (Deutsch–Wagram, März - Oktober 2010)

2010	Bewuchs	Input/total [l]	Sickerwasser [l]	Wasservorratsänderung [l]	ET_a (E_a) [mm/m^2]
März	*Weiden*	1.5	0.320	-4.9	***25.3***
	G.K.	1.5	0	-5.6	***29.5***
	o.B. (E_a)	1.5	0.745	-1.4	***9.13***
April	*Weiden*	13.4	-	-5.5	***78.4***
	G.K.	13.4	-	-1.2	***59.8***
	o.B.(E_a)	13.4	19.4	1.7	***-32***
Mai	*Weiden*	30.8	0.605	0.2	***124.5***
	G.K.	30.8	-	7.8	***95.5***
	o.B.(E_a)	30.8	31.9	2.8	***-16.2***
Juni	*Weiden*	31.3	0.195	-9	***166.4***
	G.K.	31.3	0	-20.1	***213.3***
	o.B.(E_a)	31.3	33.5	-0.1	***-9.5***
Juli	*Weiden*	34.7	0.205	1	***139***
	G.K.	34.7	0.548	5.5	***119.1***
	o.B.(E_a)	34.7	27.6	0.4	***27.8***
August	*Weiden*	26.3	1.6	5.3	***80.5***
	G.K.	26.3	0	3.1	***96.3***
	o.B.(E_a)	26.3	17.7	3.1	***22.8***
September	*Weiden*	12.3	0	-1.7	***58.1***
	G.K.	12.3	0	-6.9	***79.7***
	o.B.(E_a)	12.3	10.5	-1.9	***15.4***
Oktober	*Weiden*	4	0	-1.5	***22.8***
	GK	4	0	-6.4	***43.2***
	o.B.(E_a)	4	4.1	-1.5	***5.8***

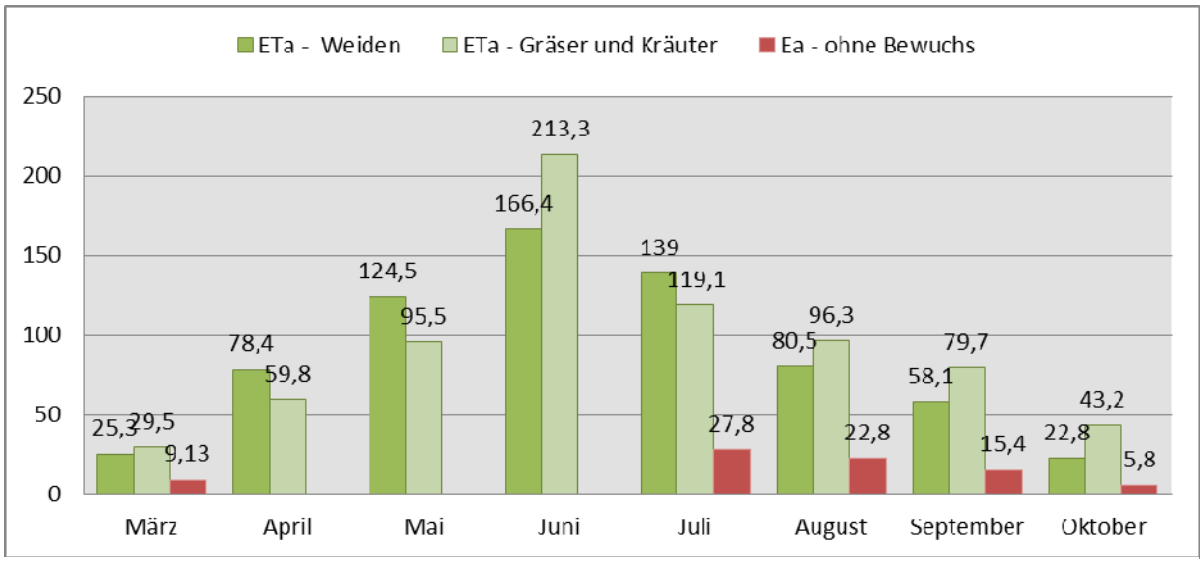

Abbildung 120: reale Evapotranspiration (ET_a) des Weidenstrauch- und Gräser- Kräuter- Lysimeters sowie die reale Evaporation (E_a) des Lysimeters ohne Bewuchs - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch- Wagram, März - Oktober 2010)

Wie man in Abbildung 120 sehen kann, ist die Evapotranspiration der Weidensträucher im März etwas niedriger als die der Gräser und Kräutermischung. Auch im Herbst dominieren die Gräser und Kräuter in der Evapotranspiration, da die Weiden schon sehr früh ihre Blätter verlieren.

Die Evaporation des Lysimeters ohne Bewuchs ist im Vergleich zu beiden bewachsenen Lysimetern sehr gering. Von April bis Juni gibt es bei dem unbewachsenen Lysimeter fehlerhafte Daten, weshalb diese aus der Grafik entfernt wurden. Sieht man sich den gesamten Verlauf des Untersuchungszeitraumes an, fällt auf, dass die Evapotranspirationsleistung ab März stetig zunimmt, im Juni ihren Höhepunkt erreicht und anschließend wieder bis Oktober stetig abnimmt.

5.4.2. potentielle Evapotranspiration

Die potentielle Evapotranspiration wurde nach der Penman-Monteith-Formel berechnet. Zum Berechnen wurde das Programm E_p – Calculator von der FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) verwendet.

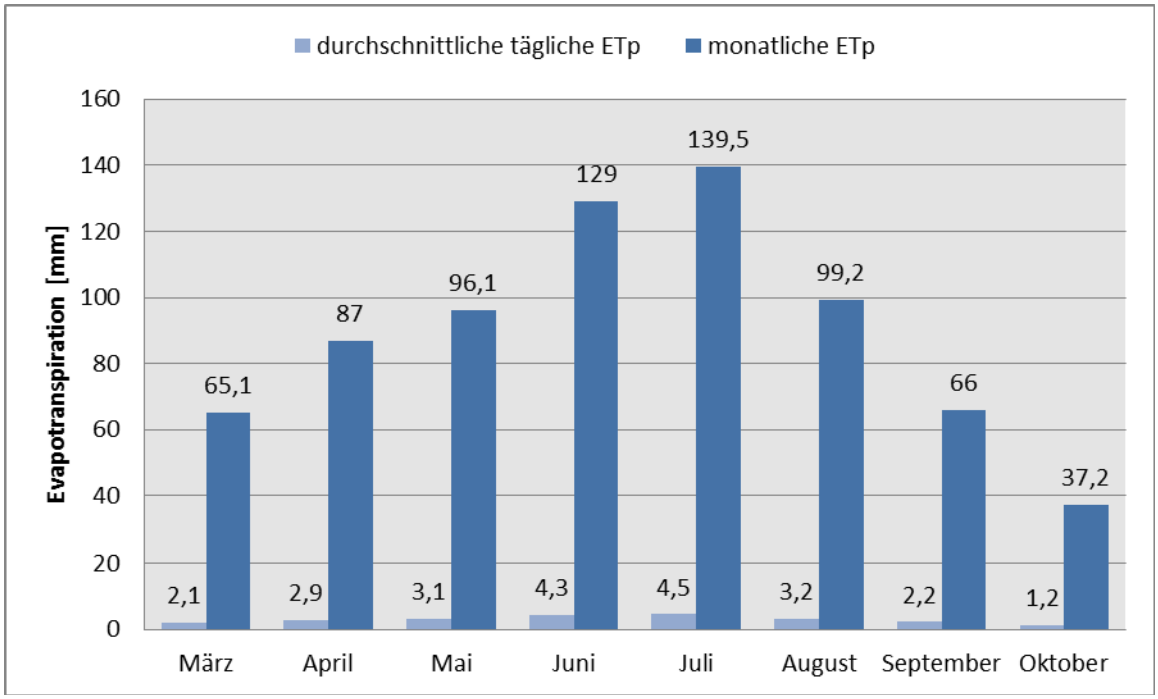

Abbildung 121: Vergleich der potentiellen täglichen durchschnitts-Evapotranspiration und der monatlichen Evapotranspiration – gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010)

In Abbildung 121 wird der Unterschied von monatlicher zu durchschnittlicher täglichen Verdunstung jedes Monats aufgezeigt.
Vergleicht man die Grafik der realen Evapotranspiration (Abbildung 120) mit der der potentiellen (Abbildung 121) fällt auf, dass der gesamte Verlauf beider Grafiken ähnlich ist, bei der potentiellen Evapotranspiration aber der höchste monatliche Verdunstungswert im Juli bei der realen hingegen im Juni liegt.

Nach dem Errechnen der potentiellen Evapotranspirationsraten kann anschließend aus dem Verhältnis von ET_a zu ET_p der Vegetationskoeffizient K_c (siehe Kapitel 3.6.4.2. Potentielle Verdunstung nach Penman-Monteith) für beide Bewuchsformen bestimmt werden.

Tabelle 13: Durchschnittliche, monatliche ET_a und ET_p sowie der Vegetationskoeffizient der Weidensträucher und der Gräser und Kräuter – gesamter Untersuchungszeitraum

Weiden	ET_a[mm]	ET_p[mm]	K_c	Gräser und Kräuter	ET_a[mm]	ET_p[mm]	K_c
März	0,82	2,1	*0,39*	***März***	0,95	2,1	*0,45*
April	2,61	2,9	*0,9*	***April***	1,99	2,9	*0,69*
Mai	4,02	3,1	*1,30*	***Mai***	3,08	3,1	*0,99*
Juni	5,55	4,3	*1,29*	***Juni***	7,11	4,3	*1,65*
Juli	4,48	4,5	*1*	***Juli***	3,84	4,5	*0,85*
August	2,6	3,2	*0,81*	***August***	3,1	3,2	*0,97*
September	1,94	2,2	*0,88*	***September***	2,66	2,2	*1,21*
Oktober	0,74	1,2	*0,61*	***Oktober***	1,39	1,2	*1,16*

Aus Tabelle 13 geht hervor, dass die reale Verdunstung der Gräser und Kräuter mit durchschnittlichen 7,11 mm pro Tag im Juni am höchsten ist, während die Weiden den höchsten Wert ebenfalls im Juni mit 5,55 mm pro Tag erreichen. Setzt man diese Werte jeweils mit der entsprechenden Referenzverdunstung (ET_o) in Beziehung, ergibt sich bei den Gräser und Kräutern in diesem Monat ein Vegetationskoeffizient von 1,65 und bei den Weidensträuchern ein K_c von 1,29.
Die Verdunstungswerte der Weiden sind im März mit 0,82 mm und im Oktober mit 0,74 mm am geringsten und liegen unter denen der Gräser und Kräuter.

Bei zu geringer Wasserversorgung oder zu kleinem Blattflächenindex kann es vorkommen, dass die reale Verdunstung unter der Grasreferenzverdunstung liegt. Dies ist bei den Weiden immer der Fall, außer im Mai und Juni. Bei den Gräsern und Kräutern ist die reale Verdunstung nur im Juni und September höher als die Grasreferenzverdunstung.

6. Diskussion

Im Laufe der ersten zwei Jahre konnten wichtige Daten über ober- und unterirdische Biomasse der Bewuchsformen sowie deren Einfluss auf die hydrologischen Eigenschaften des Bodens erhoben und ausgewertet werden.
In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse der ersten zwei Vegetationsperioden diskutiert und erläutert.

Bei den zwei bewachsenen Lysimetern gab es Anfang der ersten Vegetationsperiode noch etwas größere Unterschiede in Bezug auf Wassergehalt und Wasserspannung. Bei den Weiden zeigten sich schon sehr früh deutliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Bodens im Vergleich zur Nullvariante. Die Gräser- Kräuterbegrünung brauchte etwas länger um mit den Weiden bezüglich der Wasseraufnahmefähigkeit mithalten zu können. Die Weiden entwickelten sich also zu Beginn der ersten Vegetationsperiode schneller als die Gräser und Kräuter. Anfang des zweiten Wuchsjahres ist es jedoch die Gräser- Kräuter-Begrünung, die sich schneller und besser entwickelt und meist etwas niedrigere Sickerwassermengen als der Weiden-Lysimeter aufweist.
Nach zwei Vegetationsperioden hat sich das Wurzelvolumen der Gräser- und Kräutermischung sowie der Weiden verdoppelt. Somit herrscht bei gleichem Niederschlag in allen begrünten Lysimetern eine deutlich höhere Bodenwasserspannung als in den unbegrünten Vergleichsbehältern.
Beide Bewuchsformen erreichen nach zwei Jahren mit bis zu 900 hPa ähnliche Werte in der Wasserspannung. Im Vergleich zum unbegrünten Lysimeter, wo die Wasserspannung nie über 100 hPa steigt, sind jedoch deutliche Unterschiede in Bezug auf Wassergehalt, Wasserspannung und Sickerwasseraustritte wahrzunehmen.
Die Gräser und Kräutermischung unterstützt durch ihren größeren Wurzelanteil in den oberen Schichten die Fixierung der oberen Bodenschicht (bis 15 cm Tiefe), die Weiden wurzeln tiefer hinein und entwässern so die unteren Schichten des Lysimeters stärker.

Einen der wichtigsten Faktoren der Untersuchungen stellten die Ermittlung sowie der Vergleich der Verdunstung der zwei Pflanzenbestände dar.
Zu Beginn der zweiten Vegetationsperiode, im März, ist die Verdunstungsleistung der Gräser und Kräuter etwas höher als die der Weidensträucher. Auch im August bis Oktober verdunstet die Gräser-Kräuter-Begrünung mehr als die Gehölze, da diese schon früh ihre Blätter wieder verlieren und dann nicht mehr transpirieren können. Die Weidensträucher dominieren nach zwei Vegetationsperioden nur im Mai und Juli in ihrer Verdunstungsleistung gegenüber den Gräsern und Kräutern. Die höchsten realen Evapotranspirationswerte beider Bewuchsvarianten wurden im Juni gemessen, wobei die der Gräser und Kräuter bei beachtlichen 213 mm (Liter) pro m^2 im Monat liegt.
Im ersten Vegetationsjahr, wo zusätzlich bewässert wurde, lag die maximal gemessene tägliche Verdunstungsleistung der Gräser und Kräuter bei 6,7 mm und die der

Weidengehölze bei 10,8 mm. Nach zwei Jahren und ohne zusätzliche Bewässerung im Jahr 2010 lag die höchste durchschnittliche Tagesevapotranspiration bei den Gräser und Kräutern im Juni mit 7,11 mm und bei den Weidensträuchern bei 5,55 mm.
Im ersten Jahr erreichen also die Weidengehölze und im zweiten Jahr die Gräser und Kräuter-Begrünung die höchsten maximalen Evapotranspirationswerte.
Ein Grund dafür ist wahrscheinlich neben der zusätzlichen Bewässerung im ersten Jahr, dass der Blattflächenindex der Weiden in der zweiten Vegetationsperiode mit 1,6 nur halb so groß war wie im Jahr zuvor, wo dieser 3,1 ausmachte.

Aufgrund der Messergebnisse kann man feststellen, dass Weidengehölze als auch Gräser- und Kräuter- Bestände durch Transpiration den Wassergehalt im Boden deutlich senken, was zu einer Zunahme der Bodenstabilität eines Dammes führen kann. Um genauere Aussagen machen zu können, sind jedoch weitere längerfristige Untersuchungen notwendig.

7. Quellenverzeichnis

7.1. Literaturverzeichnis

BONK, M. (2010): Lufsky Bauwerksabdichtung. 7. Auflage, Vieweg und Teubner Verlag, Wiesbaden

DVWK Merkblätter 238 (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Wirtschafs- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

DVWK/Schriften 86 (1990): Grundlagen der Verdunstungsermittlung und Erosivität von Niederschlägen, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

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

FLORINETH, F., Kloidt, F, Weissteiner C. (2010): Studienblätter zur Vorlesung Ingenieurbiologie, Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau, Universität für Bodenkultur, Wien

GISI, U. (1997): Bodenökologie. Georg Thieme Verlag, Stuttgart

HARTGE, K. H., HORN, R. (1999): Einführung in die Bodenphysik. 3., überarbeitete Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

HÖRANDL ,E., FLORINETH, HADACEK, F., (2002): Weiden – in Österreich und angrenzenden Gebieten. Berger und Söhne GmbH, Horn

KATZENSTEINER, K. (2009): Studienblätter zu Standortkunde. Universität für Bodenkultur, Wien

KIKUTA, S. (2008) Vorlesungsunterlagen zu Wasserhaushalt der Pflanzen. Universität für Bodenkultur, Wien

LESZCZYNSKI, J., (2011): Gehölzstrukturen an Hochwasserschutzdämmen unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung von Weidengehölzen an Hochwasserschutzdämmen. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien

LOISKANDL W., (2001): Skriptum IHW Bodenphysik, Universität für Bodenkultur, Wien

MATTHEß, G.; UBELL K. (1983): Lehrbuch der Hydrogeologie Band 1, Allgemeine Hydrogeologie Grundwasserhaushalt. Gebrüder Borntraeger – Berlin – Stuttgart

OBRIEJETAN, M. (2010): Untersuchungen zum Einfluss Weidenbewuchs auf den Bodenwasserhaushalt anhand von Lysimeterversuchen, Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien

PREGL, O. (1998): Handbuch der Geotechnik, Verformbarkeit und Scherfestigkeit von Gesteinen, Band 8, Universität für Bodenkultur, Wien

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

7.2. PDFs

BÜTTNER C., (2007) Seminar zur planetarischen Grenzschicht
http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/trumf/Lehre/Lehrveranstaltungen/Grenzschicht/Verdunstung.pdf abgerufen am 07.04.2011

FSU Jena, 2005, Kursunterlagen zum BSc Studiengang Geographie, Modul 241 Verdunstungsberechnung
FSU_JENA_2005_Kursunterlagen_Verdunstungsberechnung.pdf

HASELSTEINER_2002_Statische_Betrachtungen_zu_Gehölzen_auf_Dammbauten.pdf

HASELSTEINER, R., STROBL Th. (2005): Forschungs- und Entwicklungsvorhaben Deichsanierung Endbericht, Bayrisches Landesamt für Wasserwirtschaft, TU München (PDF)

HASELSTEINER, R. (2010): Der Bewuchs an und auf Hochwasserschutzdeichen an Fließgewässern aus technischer und naturschutzfachlicher Sicht, Technische Universität Dresden – Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Dresdner Wasserbaukolloquium (PDF)

NÜTZMANN G. (2002), Vorlesungsskript, Einführung in die Hydrologie, Humboldt Universität Berlin, http://unio.igb-berlin.de/abt1/mitarbeiter/nuetzmann/skript/kap32.pdf
abgerufen am 14.6.2011

VONWILLER Lukas und WINKLER Raffael, Messung und Modellierung der Evapotranspiration aus Lysimeter- und Wetterdaten
http://n.ethz.ch/~yblumer/download/Labor%202/Evapotranspiration%20gross%20winklerr.pdf

WU, W. (2007): BOKU_GEOTECHNIK_2007_Scherfestigkeit_von_Böden_Präsentation

7.3. Internetquellen

KNORR,D. und WEISE, C. (2000): Blattflächenindex und Bedeckungsgrad, 2000, Uni Jena http://www.terradew.uni-jena.de/sites/lai.html abgerufen am 10.5.2011

SCHMIDT, G., (2003): Geologie, Relief und Boden Seminar – Script 4, http://oekogis.net/geoscript4.html abgerufen am 12.7.2011

SCHÖNINGER, M. und DIETRICH, J., (2003) : Hydroskript http://www.hydroskript.de/html/_index.html?page=/html/hykp0505.html abgerufen am 17.04.2011

UMS (2011), T4 Tensiometer, http://www.hoskin.ca/catalog/index.php?main_page=index&cPath=1_59_71_202_206 Abgerufen am 07.04.2011

Zentral Anstalt für Meteorologie und Geodynamik http://www.zamg.ac.at/aktuell/index.php?seite=1&artikel=ZAMG_2010-12-28GMT10:28 abgerufen am 24.11.2011

Porosität http://www.geo-glossar.de/woerterbuch/porositaet.html abgerufen am 13.05.2011

Bodenluft http://hypersoil.uni-muenster.de/0/03/05.htm abgerufen am 13.05.2011

Bodentemperatur http://hypersoil.uni-muenster.de/0/05/04.htm abgerufen am 13.05.2011

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserkreislauf (Jaroslaw LESZCZYNSKI, 2011) 9

Abbildung 2: kleiner Hohlraumanteil – Körner passen gut zusammen 11

Abbildung 3: Größerer Hohlraumanteil – lockere ungeordnete Körner 11

Abbildung 4: Darstellung der Korngrößenverteilung in Form einer Körnungslinie (rot ist die angestrebte Körnungsverteilung der Hochwasserschutzdämme in Deutsch Wagram, schwarz sind die eingesetzten Material – Kennwerte) 13

Abbildung 5: pF-Kurve (Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt) 18

Abbildung 6: Transpiration (modifiziert nach KIKIUTA, S. 2008, Wasserhaushalt der Pflanzen) 22

Abbildung 7: Interzeptionsverdunstung 23

Abbildung 8: Lysimeteranlage 27

Abbildung 9: Lysimeteranlage (Deutsch Wagram Juni 2009) 32

Abbildung 10: Anordnung und Einteilung der Lysimeter (Michael OBRIEJETAN 2010) 32

Abbildung 11: Versuchsbehälter Weidenspreitlage 33

Abbildung 12: Schichtaufbau des Bodens 33

Abbildung 13: Abwägen der Erdmasse 34

Abbildung 14: Kiesschicht mit Schutzvlies 34

Abbildung 15: unverdichtete Bodenschicht (Deutsch – Wagram, 15.6.2009) 34

Abbildung 16: durch dynamische Lastplatte verdichtete Bodenschicht (Deutsch – Wagram, 15.6.2009) 34

Abbildung 17: Wassergehaltssensor 35

Abbildung 18: Wassergehaltssensor – Lage in Fass (Deutsch – Wagram, 12.6.2009) 35

Abbildung 19: Aufbau eines Tensiometers (UMS, 2011) 35

Abbildung 20: Einbau der Tensiometer 36

Abbildung 21: Tensiometer in verschiedenen Schichten 36

Abbildung 22: Kippzähler 36

Abbildung 23: Kunststoffkanister zum Ermitteln der Sickerwassermenge 36

Abbildung 24: DMS-Wägezelle (Firma Bosche, 2011) 37

Abbildung 25: Rahmenkonstruktion für Wägezelle (BOKU, 02.07.2009) 37

Abbildung 26: Wetterstation (Deutsch – Wagram, 01.05.2010) 37

Abbildung 27: Datenlogger 37

Abbildung 28: Gräser und Kräutermischung (Deutsch – Wagram, 01.09.2009) 39

Abbildung 29: Aufgetragenes Saatgut 39

Abbildung 30: Eingebrachte Weidenäste 40

Abbildung 31: Aufbringen der Humusschicht (Deutsch – Wagram, 22.6.2009) 40

Abbildung 32: Messen der Weidenastlänge 41

Abbildung 33: Messung der Weidendurchmesser 41

Abbildung 34: nach Klassen unterteilte Biomasse (BOKU, 01.09.2010) 42

Abbildung 35: Bestimmen der Durchmesserklassen 42

Abbildung 36: Abwiegen der Durchmesserklassen 42

Abbildung 37: Weidenäste – unterteilt in Durchmesserklassen (BOKU, 01.09.2010) 42

Abbildung 38: Abwiegen der Stichprobe 43

Abbildung 39: Einscannen der Stichproben 43

Abbildung 40: am Computer bearbeitete Stichprobe 43

Abbildung 41: Darstellung der aufgeschnittenen Fässer (verändert nach OBRIEJETAN, 2010) 44

Abbildung 42: Abtragung Weidensprosse 44

Abbildung 43: Abtragen der Gräser und Kräutermischung (Deutsch – Wagram, 11.05.2010) 44

Abbildung 44: In 5 cm - Schichten gekennzeichnete Behälter 45

Abbildung 45: Aufschneiden der ersten Schicht 45

Abbildung 46: freigelegte oberste Bodenschicht 45

Abbildung 47: Abtragen der Weidenspreitlage (Deutsch – Wagram, 11.05.2010) 45

Abbildung 48: Weidenäste mit Wurzeln 45

Abbildung 49: In Sack verfüllte Erd- Wurzelschicht 45

Abbildung 50: Beschriften der Säcke 45

Abbildung 51: Einschütten der Erdschicht in Wanne (Deutsch - Wagram, 12.05.2010) 46

Abbildung 52: Füllen der Wanne 46

Abbildung 53: Aussieben der Wurzeln 46

Abbildung 54: Sieb mit Wurzeln 46

Abbildung 55: Ausgesiebtes Wurzelgemisch 47

Abbildung 56: Befreien der Wurzeln von Verunreinigungen (BOKU, 14.05.2010) 47

Abbildung 57: Reine Wurzelmasse wird mittels Pinzette aussortiert (BOKU, 19.09.2010) 47

Abbildung 58: Verunreinigtes Wasser 47

Abbildung 59: Messen der Wurzelproben 48

Abbildung 60: abgefüllte Wurzelproben 48

Abbildung 61: Weidenspreitlage nach 15 Monaten 50

Abbildung 62: Weidenspreitlage nach 10 Monaten 50

Abbildung 63: Weidenspreitlage nach 1 Monat 50

Abbildung 64: Weidenspreitlage nach 3 Monaten 50

Abbildung 65: Streudiagramm – Zusammenhang von Durchmesser und Länge der Weidensprosse nach 15 Monaten von Lysimeter 6 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010) 51

Abbildung 66: Streudiagramm – Zusammenhang von Durchmesser und Länge der Weidensprosse nach 15 Monaten von Lysimeter 20 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010) 52

Abbildung 67: Vergleich der gesamten Trockenbiomasse der Weiden aus der ersten (Lysimeter 1, 2009) und zweiten (Lysimeter 6,2010) Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 54

Abbildung 68: Vergleich der Sprossanzahl der Weiden aus der ersten (Lysimeter 1, 2009) und zweiten (Lysimeter 6, 2010) Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 54

Abbildung 69: Vergleich an Gesamtgewicht der Trockenbiomasse Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) – unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 55

Abbildung 70: Weidensprossanzahl aus der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode in Durchmesserklassen untergeteilt (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 55

Abbildung 71: Gesamt - Gewicht der Trockenbiomasse aus der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode nach Durchmesserklassen sortiert (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 56

Abbildung 72: Anteil von Blättern und Zweigen der Weiden in Bezug auf die gesamte Trocken- 56

Abbildung 73: Anteil von Blättern und Zweigen der Weiden in Bezug auf die gesamte Trocken-biomasse unterteilt in Klassen – Vegetationsperiode 2 (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010) . 57

Abbildung 74: Vergleich von Gesamtgewicht der Blätter Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) - unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 57

Abbildung 75: Vergleich vom Gewicht der Zweige von Lysimeter 1 (2009) mit Lysimeter 6 (2010) – unterteilt in Klassen (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 58

Abbildung 76: Wurzeln dringen durch Vlies in Kiesdrainschicht (Deutsch – Wagram, 14.09.2010) 60

Abbildung 77: Starke Wurzelausbildung am Fassrand (Deutsch – Wagram, (14.09.2010)..... 60

Abbildung 78: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan - Wurzelvolumen Weiden Lysimeter 1 nach 11 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010)..... 61

Abbildung 79: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan - Wurzelvolumen Weiden Lysimeter 6 nach 15 Monaten (Versuchsanlage Deutsch - Wagram, 2010) 61

Abbildung 80: Wurzelsprossverhältnis der Weiden - Lysimeter 1 nach dem ersten Vegetationsjahr (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2009) 62

Abbildung 81: Wurzelsprossverhältnis der Weiden Lysimeter 6 – im zweiten Vegetationsjahr (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010) 62

Abbildung 82: Gräser- und Kräutermischung nach 2 Monaten (Deutsch – Wagram, 2009) 63

Abbildung 83: Gräser- und Kräutermischung nach 3 Monaten (Deutsch – Wagram, 2009) 63

Abbildung 84: Gräser- und Kräutermischung nach 12 Monaten (Deutsch – Wagram, 2010) 63

Abbildung 85: Gräser- und Kräutermischung nach 14 Monaten (Deutsch – Wagram, 2010) 63

Abbildung 86: Vergleich Wassersäulenmessung und Scan Gräser und Kräuter Lysimeter 17 – erste Vegetationsperiode (Deutsch – Wagram, 2009)..... 64

Abbildung 87 64

Abbildung 88: Wurzelentwicklung Ende der ersten Vegetationsperiode –Vergleich Gräser und Kräuter mit Weiden (Deutsch – Wagram, 2009)..... 66

Abbildung 89: Wurzelentwicklung nach der zweiten Vegetationsperiode –Vergleich Gräser und Kräuter mit Weiden (Deutsch – Wagram, 2010)..... 66

Abbildung 90: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 1 - März bis Mai (Deutsch – Wagram, 2010) 67

Abbildung 91: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 2 – Juni bis August (Deutsch – Wagram, 2010) 68

Abbildung 92: Tagesmittelwerte von Temperatur (rote Linie) und Niederschlag (blaue Balken) Zeitraum 3 – September bis Oktober (Deutsch – Wagram, 2010)..... 68

Abbildung 93: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010)..... 71

Abbildung 94: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010) 71

Abbildung 95: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010) 72

Abbildung 96: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 50 cm Tiefe – Zeitraum 1 (Deutsch - Wagram, März bis Mai 2010) 72

Abbildung 97: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch- Wagram, Juni bis August 2010) 73

Abbildung 98: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010) 74

Abbildung 99: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010) 74

Abbildung 100: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 50 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August 2010) 75

Abbildung 101: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 5 cm Tiefe- Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010) 76

Abbildung 102: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 15 cm Tiefe- Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010) 76

Abbildung 103: Tagesmittelwerte der Wasserspannung in 30 cm Tiefe- Zeitraum 3 (Deutsch – Wagram, September bis Oktober 2010) 77

Abbildung 104: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 1 78

Abbildung 105: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 1 ... 79

Abbildung 106: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 2 80

Abbildung 107: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 2 ... 80

Abbildung 109: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 30 cm Tiefe – Zeitraum 3 ... 81

Abbildung 108: Tagesmittelwerte des volumetrischen Wassergehalts in 5 cm Tiefe – Zeitraum 3 81

Abbildung 110: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010) 83

Abbildung 111: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010) 83

Abbildung 112: Beziehung von Wassergehalt und Wasserspannung – 30 cm Tiefe - gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010) 83

Abbildung 113: pF-Werte der Wasserspannung – Weiden (Deutsch – Wagram, 2010)..... 85

Abbildung 114: pF-Werte der Wasserspannung - Gräser und Kräuter (Deutsch – Wagram, 2010) 85

Abbildung 115: pF-Werte der Wasserspannung - ohne Bewuchs (Deutsch – Wagram, 2010) 85

Abbildung 116: Beziehung zwischen Wasserspannung und Wassergehalt des Bodens (als pF-Wert) für die Hauptbodenarten sowie für den Boden der Lysimeter..... 86

Abbildung 117: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 1 (Deutsch – Wagram, März bis Mai)..... 87

Abbildung 118: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 2 (Deutsch – Wagram, Juni bis August)..... 87

Abbildung 119: Vergleich der Sickerwassermenge von Weidensträuchern, Gräser Kräuter und des Lysimeters ohne Bewuchs – Zeitraum 3 (Deutsch – Wagraam, September bis Oktober) 88

Abbildung 120: reale Evapotranspiration ($ET_{a)}$ des Weidenstrauch- und Gräser- Kräuter- Lysimeters sowie die reale Evaporation (E_a) des Lysimeters ohne Bewuchs - gesamter Untersuchungszeitraum Deutsch- Wagram, (März - Oktober 2010)..... 90

Abbildung 121: Vergleich der potentiellen täglichen durchschnitts-Evapotranspiration und der monatlichen Evapotranspiration – gesamter Untersuchungszeitraum (Deutsch – Wagram, März bis Oktober 2010) 91

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteile von Bodenverdunstung, Interzeption und Transpiration bei verschiedenen Beständen 24

Tabelle 2: Saatgutmischung (OBRIEJETAN, 2010) 39

Tabelle 3: Zeitlicher Ablauf der Arbeiten zweite Vegetationsperiode (2010) 49

Tabelle 4: Vergleich von Durchmesser- und Längenverhältnis im Herbst der ersten (Lysimeter1, 2009) und zweiten Vegetationsperiode (Lysimeter 6, 2010) – Versuchsanlage Deutsch - Wagram 51

Tabelle 5: Vergleich von Durchmesser- und Längenverhältnis der ersten (2009) und zweiten (2010) Vegetationsperiode von Lysimeter 20 – Versuchsanlage Deutsch - Wagram 52

Tabelle 6: Biomassedaten Lysimeter 1 – Weiden nach 11 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, 2010) 53

Tabelle 7: Biomassedaten Lysimeter 6 - Weiden nach 15 Monaten (Versuchsanlage Deutsch – Wagram) 53

Tabelle 8: Blattflächenberechnungen Lysimeter 1 – Erste Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Sep. 2009) 59

Tabelle 9: Blattflächenberechnungen Lysimeter 6 – Zweite Vegetationsperiode (Versuchsanlage Deutsch – Wagram, Sep. 2010) 59

Tabelle 10: Niederschlag, Temperatur und Luftfeuchtigkeit im gesamten Untersuchungszeitraum ... 69

Tabelle 11: Strahlung und Wind im gesamten Untersuchungszeitraum 70

Tabelle 12: reale Evapotranspiration des Untersuchungszeitraumes (Deutsch–Wagram, März - Oktober 2010) 89

Tabelle 13: Durchschnittliche, monatliche ET_a und ET_p sowie der Vegetationskoeffizient der Weidensträucher und der Gräser und Kräuter – gesamter Untersuchungszeitraum 91