



**„Der Durst des Weines“: Zusammenhang  
zwischen Bodenwasserstatus und Wasser-  
potential von Weinreben im Kremstal und in  
der Wachau**

**Masterarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

**Betreuer:**

**Loiskandl Willibald, Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.**

**Nolz Reinhard, Dipl.-Ing. Dr.**

**Cepuder Peter, Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.**

**Universität für Bodenkultur (BOKU)**

**Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)**

**Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)**

**Eingereicht von:**

**Daniel Josef Fuchs, BSc**

# Vorwort

Einleitend möchte ich mich bei jenen Personen bedanken ohne die der Abschluss meines Studiums und insbesondere die Abgabe dieser Masterarbeit wohl nur schwer möglich gewesen wäre.

In erster Linie möchte ich mich bei meinem Hauptbetreuer Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Nolz bedanken, der mich mit seiner Dynamik, seiner Hilfsbereitschaft und seinen kompetenten Ratschlägen vor allem bei der schriftlichen Ausarbeitung der Masterarbeit sehr geholfen hat. Gleich anschließen möchte ich bei Dipl.-Ing. Dr. Willibald Loiskandl, der mit seinem Engagement und der offiziellen Betreuung der Arbeit seinen Teil für die erfolgreiche Abgabe beitrug. Durch Dipl.-Ing. Dr. Peter Cepuder wurde der Erstkontakt zum IHLW hergestellt und anfangs wichtige Fragen abgeklärt, wodurch das Thema der Masterarbeit abgesteckt werden konnte. Bei der Bodenprobenentnahme und den Arbeiten im Labor waren Karl Haigner, Friedrich Forster und Andrea Fuchs durch ihre helfenden Hände sehr unterstützend.

Ein besonderer Dank gilt den Kontaktpersonen der WBS-Krems, durch die im Zuge eines Praktikums, die Idee für das Thema der Masterarbeit initiiert wurde. Dabei möchte ich besonders Ing. Erhard Kühner und Ing. Christoph Gabler hervorheben, die durch die Bereitstellung der Messinstrumente sowie der benötigten Informationen und durch die Unterstützung bei der Messdurchführung einen sehr großen Anteil an der Ausarbeitung der Masterarbeit hatten.

Für den erfolgreichen Abschluss meines Studiums möchte ich vor allem meiner Mutter Sabine, sowie meinen Geschwistern Matthias, Magdalena und Clara danken, die stets an mich glaubten und mich moralisch unterstützten. Gleiches gilt auch für meine Freundin Jennifer, die während der schriftlichen Ausarbeitung gut mit meiner schlechten Laune umgehen konnte und mir viel Kraft schenkte. Für das Lektorat möchte ich mich bei Christian Strasser bedanken.

Gewidmet sei die vorliegende Masterarbeit meinem Vater Armin, der sich während den Messdurchführungen völlig unerwartet von dieser Welt verabschiedete. Ohne seine finanzielle Unterstützung, seine bedingungslose Liebe, aber auch ohne seinen dezent ausgeübten Druck wäre der erfolgreiche Abschluss meines Studiums nicht möglich gewesen.

Mille grazie per tutto!

# Abstract

In view of the growing challenges, such as global warming and limited water supply, determining drought stress conditions in winegrowing will gain importance in the future. Drought stress conditions can be identified by analysing the plant and/or the soil. In this sense, the primary purpose of this master thesis was to determine a functional relationship between grapevine water potential and soil water status. The seasonal trend of grapevine water potential was determined with the help of the Scholander Chamber in two experimental fields named Sandgrube (Kremstal, Austria) and Loibenberg (Wachau, Austria).

The methods used in the vineyards to determine the plant water potential were the predawn leaf water potential and the midday stem water potential measure techniques. The soil water status was measured with Watermark 200 SS sensors which indicated the soil matric potential and Adcon SM1 sensors which recorded scaled frequency units. All relationships between plant water potential and soil water status were not highly correlated. The reasons for this are manifold: Firstly, vines experiencing limited water supply draw water from deeper zones which sensors cannot detect as they use single-depth soil moisture readings. Secondly, the watermark sensors were slow in responding to precipitation events and their recorded data was often unrepeatably and incomplete. The configuration in the depth was not optimal as well, the recording of precipitation often failed. Thirdly, the Adcon SM1 sensors could not be calibrated, since there are no configuration values available in current research.

The secondary purpose of this master thesis was to demonstrate the effects of irrigation treatment on the ripeness parameters sugar concentration (must weight), total titratable acid and yeast assimilable nitrogen as well as on the yield of the common Austrian grape vines Grüner Veltliner and Rheinriesling. The irrigation treatment showed positive effects on the sugar concentration along with increased grape weight and yield of Grüner Veltliner grapevines, but the results on the yield were not statistically stable. When considering the Rheinriesling grapevines in the context of irrigation, no significant effect on the sugar concentration could be found. However, an increase in the total titratable acid and yeast assimilable nitrogen could be detected and an increase of the grapevine yield was observed, but the latter was not statistically stable.

# Zusammenfassung

Im Hinblick auf die zunehmende wirtschaftliche Bedeutung des Qualitätsweinbaus und die wachsenden Herausforderungen in Punkto globaler Erwärmung respektive Klimawandel, gewinnt die Ermittlung von Trockenstressbedingungen im österreichischen Weinbau vermehrt an Bedeutung. Auf Grundlage dessen wurden an den Weinreben der zwei niederösterreichischen Versuchsstandorte Sandgrube (Kremstal) und Loibenberg (Wachau) Wasserpotentialmessungen mit Hilfe der Scholanderdruckkammer durchgeführt, um Trockenstressbedingungen zu eruieren. Dabei wurde an denselben Tagen sowohl das frühmorgendliche Blattwasserpotential, als auch das mittägliche Stammwasserpotential bestimmt. Eine Korrelation der beiden Messmethoden ergab sehr hohe lineare Zusammenhänge, wobei sich die Ergebnisse auf wenige Daten stützten. Diese enge Korrelation stimmte nicht mit der festgestellten Beobachtung überein, dass die mittäglichen Stammwasserpotentiale vom mittleren Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft beeinflusst wurden. Neben den Pflanzenwasserpotentialen wurde am Versuchsstandort Sandgrube der Bodenwasserstatus durch Watermark- und SM1-Sensoren bestimmt, um vorherrschende Trockenstressbedingungen im Boden aufzuzeigen. Witterungsdaten wurden durch die Adcon Telemetry Wetterstationen aufgezeichnet. Bodenphysikalische Laboranalysen dienten der Interpretation der Messwerte der SM1-Sensoren.

Das primäre Ziel der Masterarbeit war es einen funktionalen Zusammenhang zwischen den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen und den ermittelten Bodenwassermesswerten (Bodenmatrixpotential bzw. SFU-Werte) herzustellen. Bei einer sehr engen Korrelation könnten die arbeitsintensiven und zeitaufwändigen Pflanzenwasserpotentialmessungen durch automatisierte, zeitlich hochaufgelöste Bodenwasserstatusmessungen ersetzt werden. Ein enger Zusammenhang wurde jedoch nicht festgestellt. Die Gründe dafür waren sehr vielseitig. Zum einen waren Bodenwassersensoren vermutlich nicht in der Lage das gesamte für die Weinrebe zur Verfügung stehende Bodenwasser zu erfassen. Es handelt sich generell um punktuelle Messungen mit einer beschränkten Reichweite. Der Versorgungszustand der Rebe wurde dadurch nicht exakt wiedergegeben. Zum anderen waren die eingesetzten Bodenwassersensoren zur Bestimmung von Trockenstressverhältnissen nicht gut geeignet. Die Watermark-Sensoren reagierten sehr träge, oft unnachvollziehbar und es entstanden große Datenlücken aufgrund der mangelhaften Datenaufzeichnung. Auch die Tiefenanordnung der Watermark-Sensoren in 50, 100 und 150 cm Bodentiefe war nicht ideal, da dadurch Niederschlagsereignisse nur teilweise registriert wurden. Die SM1-Sensoren konnten nicht kalibriert werden, da keine Vergleichswerte in der Literatur zu finden waren und keine Feldfunktion erarbeitet wurde. Dadurch musste mit SFU-Werten („Hausnummern“) gearbeitet werden, wodurch aber kein sicherer Bezug zum Wasseranteil hergestellt werden konnte.

Das sekundäre Ziel der Masterarbeit war es, den Einfluss der Beregnung auf unterschiedliche Reifeparameter (Mostgewicht, titrierbare Gesamtsäure und

hefeverfügbarer Stickstoffgehalt) und den Ertrag der Sorten Grüner Veltliner bzw. Rheinriesling aufzuzeigen. Die Reifeparameter wurden anhand eines OenoFoss Gerätes bestimmt, der Ertrag im Feld mit Hilfe einer tragbaren Waage ermittelt. Bei der Sorte Grüner Veltliner wurde durch die Beregnung eine Erhöhung des Mostgewichts festgestellt. Gleichzeitig stiegen auch das durchschnittliche Traubengewicht und der Stockertrag, wobei diese Ergebnisse statistisch nicht haltbar waren. Bei der Sorte Rheinriesling konnten hingegen keine bedeutenden Effekte der Beregnung auf die Erhöhung des Mostgewichts aufgezeigt werden, lediglich der titrierbare Gesamtsäuregehalt und der hefeverfügbare Stickstoffgehalt wurden erhöht. Außerdem konnte eine statistisch nicht haltbare Steigerung des Ertrages pro Stock beobachtet werden. Grundsätzlich war die Sorte Rheinriesling weniger trockenstressempfindlich, was vermutlich auf das hohe Alter der Weinreben, aber auch auf eine höhere Trockenstressresistenz der Sorte Rheinriesling zurückzuführen war.

# Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	1
2. Fragestellung und Forschungshypothesen.....	4
3. Theoretische Grundlagen .....	5
3.1. Wasser in der Weinrebe .....	5
3.2. Wasser im Boden .....	7
3.2.1. Bodenwasserpotentialkonzept .....	8
3.2.2. Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung .....	9
3.2.3. Bodenhydraulische Kennwerte .....	11
3.3. Pflanzenwasserpotential.....	12
3.3.1. Frühmorgendliches Blattwasserpotential .....	13
3.3.2. Mittägliches Stammwasserpotential.....	13
3.3.3. Trockenstressauswirkungen der Pflanzenwasserpotentiale .....	14
4. Material und Methoden.....	15
4.1. Beschreibung des Projektgebiets .....	15
4.1.1. Versuchsstandort Sandgrube.....	16
4.1.2. Versuchsstandort Loibenberg .....	17
4.2. Messmethoden im Feld .....	20
4.2.1. Wetterdatenaufzeichnungen .....	20
4.2.2. Pflanzenwasserstatusmessungen.....	21
4.2.2.1. Bestimmung des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials .....	23
4.2.2.2. Bestimmung des mittäglichen Stammwasserpotentials.....	24
4.2.3. Bodenwasserstatusmessungen .....	25
4.2.3.1. Watermark 200 SS.....	25
4.2.3.2. SM1-Sensor .....	28
4.3. Bodenphysikalische Laboranalysen .....	29
4.3.1. Bodenprobenentnahme .....	29
4.3.2. Wassergehalt und Trockendichte.....	31
4.3.3. Feststoffdichte.....	33
4.3.4. Porenanteil.....	35
4.3.5. Korngrößen .....	35
4.3.6. Retentionsfunktion .....	38
4.4. Reifeparameteranalysen und Ertragsmessungen.....	41

4.4.1.	Reifeprobenentnahme .....	41
4.4.2.	Reifeparameter .....	41
4.4.3.	Ertrag .....	42
5.	Ergebnisse und Diskussion .....	43
5.1.	Verlauf der Witterungsdaten .....	43
5.2.	Verlauf Pflanzenwasserpotentiale .....	46
5.2.1.	Verlauf frühmorgendliches Blattwasserpotential .....	46
5.2.2.	Verlauf mittägliches Stammwasserpotential.....	53
5.3.	Verlauf Bodenwasserstatus.....	62
5.3.1.	Verlauf Bodenmatrixpotentiale .....	62
5.3.2.	Verlauf der „Scaled Frequency Units“ .....	70
5.3.3.	Bodenphysikalische Kennwerte .....	75
5.4.	Zusammenhang zwischen Pflanzenwasserpotentialen der Rebe und dem Wasserstatus des Bodens .....	84
5.4.1.	Korrelation der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den mittäglichen Stammwasserpotentialen .....	84
5.4.2.	Korrelation zwischen dem Pflanzenwasserpotential und dem Bodenmatrixpotential.....	87
5.4.3.	Korrelation zwischen dem Pflanzenwasserpotential und den Scaled Frequency Units .....	92
5.5.	Auswirkungen der Bewässerung .....	96
5.5.1.	Mostgewicht, Gesamtsäure und hefeverfügbarer Stickstoff.....	96
5.5.2.	Weinstockertrag und Traubengewicht.....	101
6.	Schlussfolgerungen .....	103
7.	Quellenverzeichnisse .....	109
7.1.	Literaturverzeichnis .....	109
7.2.	Abbildungsverzeichnis.....	118
7.3.	Tabellenverzeichnis.....	126

# Abkürzungsverzeichnis

$\Psi_{fm}$	frühmorgendliches Blattwasserpotential
$\Psi_{St}$	mittägliches Stammwasserpotential
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
d	Durchmesser
d <sub>max</sub>	maximaler Durchmesser
FK	Feldkapazität
GV	Grüner Veltliner
H <sub>2</sub> O	chemische Summenformel für Wasser
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
idgF.	in der geltenden Fassung
IHLW	Institut für Hydraulik und landeskulturelle Wasserwirtschaft
IP-67	International Protection-67
KMW	Klosterneuburger Mostwaage
LB-GV	Weingarten Grüner Veltliner des Versuchsstandortes Loibenberg
LB-RR	Weingarten Rheinriesling des Versuchsstandortes Loibenberg
N	Norden
nFK	nutzbare Feldkapazität
O	Osten
O <sub>2</sub>	elementarer Sauerstoff, Dioxygen oder Disauerstoff
pF	p für Potenz, F für freie Energie des Wassers
PVC	Polyvinylchlorid
PWP	Permanenter Welkepunkt
RR	Rheinriesling
SFU	Scaled Frequency Unit
SM1	Soil Moisture 1 (Bodenfeuchtesensor der Firma Adcon Telemetry)
SM1-BF1	Soil Moisture 1-Bodenfeuchtesensor Nr. 1
SM1-BF2	Soil Moisture 1-Bodenfeuchtesensor Nr. 2
SPAC	soil-plant-atmosphere-continuum
VPD	vapor pressure deficit (Wasserdampfsättigungsdefizit)
WBS-Krems	Wein- und Obstbauschule Krems
WM1...10	Watermark-Sensor Nr. 1...Nr. 10

# 1. Einleitung

Der kultivierte Anbau von Weinreben, den ältesten Nutzpflanzen der Menschen, hat in Österreich eine sehr lange Tradition (Redl et al. 1996, Werneck 1956). Nach zahlreichen zu bewältigenden Herausforderungen in der jüngsten Vergangenheit, wie dem Glykolwein-Skandal 1985 oder dem Beitritt Österreichs zur EU 1995, hat sich in Österreich der moderne Qualitätsweinbau durch bemerkenswerte Fortschritte in der Weinqualität, sowie wettbewerbsfähige, imagefördernde Vermarktungsstrategien etabliert. Der österreichische Wein erfreut sich aktuell wieder an internationaler Anerkennung und stellt ein Qualitätsprodukt dar (Egle 2007, ÖWM 2016a).

Für den Qualitätsweinbau spielen neben Pflegemaßnahmen und Fertigungsschritten, welche hohen Qualitätsanforderungen unterliegen, die Standorteigenschaften Boden (Bodenart, Bodengefüge, Bodenhydrologie), Klima (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer) und Lage (Neigung, Exposition, Höhe), sowie die optimale Versorgung der Weinrebe mit Wasser und Nährstoffen eine wesentliche Rolle (Vogt und Schruft 2000, Müller et al. 2008). Gegenwärtig stellt der anthropogen verursachte Klimawandel eine der größten Herausforderungen für den Qualitätsweinbau dar. Im Zuge dessen ist zukünftig in den gemäßigten Klimazonen mit einem Anstieg von Extremwetterereignissen, wie z.B. Dürren oder Überschwemmungen, zu rechnen (Pachauri et al. 2014). Daraus ableitbar werden in weiterer Folge auch Wasserstressperioden in österreichischen Weingärten zunehmen. Als Stress bezeichnet Larcher (1994) eine Belastungssituation, die in einem Organismus außergewöhnliche Abweichungen vom Normalverhalten auslöst. Übertragen auf Weinreben liegt Wasserstress vor, wenn das Wurzelsystem von zu viel oder zu wenig Bodenwasser umgeben ist. Wird der Begriff Wasserstress im Zusammenhang mit Wassermangel verwendet, in welchem Fall die Wurzeln auf zu wenig Wasser zugreifen, kann von Trockenstress gesprochen werden (Schopfer und Brennicke 2010).

Obwohl Weinreben angesichts ihres weitverzweigten und tiefreichenden Wurzelsystems zu den Pflanzen mit der höchsten Resistenz gegenüber Trockenstress zählen, lassen sich bei Wassermangel dennoch erhebliche Beeinträchtigungen der Weinrebenentwicklung beobachten (Patzwahl 2007). Dabei kommt es u.a. zu einer Reduzierung von Stoffwechselaktivitäten, einschließlich der Photosynthese und zu einem Stillstand des vegetativen Wachstums (Vogt und Schruft 2000). Durch den beeinträchtigten Kohlenhydratstoffwechsel werden Infektionsbedingungen für pilzliche Krankheitserreger begünstigt (Patzwahl 2007). Außerdem wird die stomatäre Leitfähigkeit (Dry und Loveys 1999) und der Ertrag (Medrano et al. 2003) negativ beeinflusst.

Vor dem Hintergrund der aufkommenden Trockenstressproblematik wird die Identifizierung von Trockenstressbedingungen und die Zusatzbewässerung im Qualitätsweinbau zukünftig immer mehr an Bedeutung gewinnen (Gruber 2013). Trockenstress kann dabei, wie es im österreichischen Weinbau traditionell üblich ist,

über den Pflanzenwasserstatus ermittelt werden. Um den Wasserstatus von Pflanzen zu identifizieren bzw. quantitativ zu ermitteln, hat sich in der Pflanzenphysiologie der Begriff (Pflanzen-) Wasserpotential durchgesetzt, womit der Wasserhaushalt von Pflanzen (Schopfer und Brennicke 2010), sowie deren Wasserverfügbarkeit beschrieben werden kann (Richter 1976). Dabei entspricht der Standardzustand von Wasser dem höchsten Wasserpotential (0 MPa), womit jedes von diesem Zustand abweichende Wasserpotential ein negatives Vorzeichen trägt (Patzwahl 2007). Aufgrund von unterschiedlichen Wasserpotentialdifferenzen innerhalb der Weinrebe kann der Wassertransport am besten anhand des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuums (engl. SPAC) erklärt werden: Höhere Landpflanzen, wozu auch Weinreben gehören, nehmen das Wasser in der Regel über die Wurzeln aus dem Boden auf. Es besteht eine durchgehende Verbindung zwischen dem Bodenwasser im Wurzelbereich über den Spross bis hin zu den Orten der Transpiration an den Blättern und somit letztendlich zur Atmosphäre. Der Energiestrom, welcher das Wasser vom Boden über die Pflanze in die Atmosphäre transportiert, entstammt der Wasserpotentialdifferenz zwischen Boden und Atmosphäre. Dabei fließt Wasser von Orten höheren (positiveren) zu Orten niedrigeren (negativeren) Wasserpotentials (Schopfer und Brennicke 2010).

Neben dem Pflanzenwasserpotential kann, zur Bestimmung des Trockenstress, auch der Bodenwasserstatus ermittelt werden. Der Bodenwasserstatus wird üblicherweise durch die Bestimmung des Bodenmatrixpotentials und/oder des Bodenwasseranteils identifiziert. Das Matrixpotential umfasst dabei sämtliche Kräfte, welche von der Bodenmatrix auf das Bodenwasser ausgeübt werden. Je weniger Wasser ein Boden enthält, desto stärker wird das Wasser durch die matrixbedingten Kräfte gehalten, es wird also immer schwerer dem Boden Wasser zu entziehen. Die Kräfte können dabei unterschiedlicher Art sein, wie z.B. Oberflächen-, Adsorptions-, Kapillar-, Quell-, Schrumpf-, Ionenanziehungs-, Dipol- und elektrostatische Kräfte (Kammerer und Loiskandl 2005). Der Wasseranteil, auch volumetrischer Wassergehalt genannt, wird definiert, als der volumetrische Anteil des Bodenwassers am Gesamtvolumen des Bodens (Cepuder et al. 2012).

Primär hat die vorliegende Masterarbeit die Bestimmung von Trockenstressbedingungen durch Pflanzen- und Bodenwasserstatusmessungen am Versuchstandort Sandgrube zum Ziel. Pflanzenwasserpotentiale wurden direkt an der Weinrebe mit Hilfe der Scholanderdruckkammer bestimmt. Hierbei wurde sowohl das frühmorgendliche Blattwasserpotential, als auch das mittägliche Stammwasserpotential als Trockenstressindikator gemessen. Bodenwasserstatusmessungen wurden mit Bodenwassersensoren realisiert, wobei Watermark-Sensoren zur Ermittlung des Bodenmatrixpotentials und Adcon SM1-Sensoren zur Festlegung des Bodenwasseranteils zum Einsatz kamen. Allgemein besitzen Bodenwassersensoren die großen Vorteile der kontinuierlich-automatisierten Aufzeichnung und der witterungsunabhängigen Einsetzbarkeit, sind jedoch aufgrund ihrer standort- und tiefenbezogenen Eingeschränktheit und der daraus ableitbaren Messungenauigkeit gegenüber Messungen mit der Scholanderdruckkammer im Nachteil (Starr 2005,

Jones 2007, Gruber 2013). Durch den parallelen Einsatz beider Messmethoden im Zuge der Masterarbeit soll daher untersucht werden, ob eine Korrelation zwischen den erhaltenen Daten besteht, um zu erörtern, ob bei Vorhandensein eines engen funktionalen Zusammenhangs die Messungen mit der Scholanderdruckkammer durch Bodenwassersensoren ersetzt werden können.

Sekundär hat die Masterarbeit die Erforschung der Auswirkungen von Trockenstressbedingungen auf reifephysiologische Parameter der Trauben (Klosterneuburger Mostwaage, titrierbare Gesamtsäure, hefeverfügbarer Stickstoff) und den Ernteertrag der Rebsorten Grüner Veltliner und Rheinriesling am Versuchsstandort Loibenberg zum Ziel. Damit soll aufgezeigt werden, dass eine zusätzliche Beregnung im Qualitätsweinbau im Hinblick auf die prognostizierte Trockenstressproblematik durchaus Sinn machen kann.

## 2. Fragestellung und Forschungshypothesen

Im Rahmen der Masterarbeit soll primär folgende Forschungshypothese am Versuchsstandort Sandgrube validiert werden:

- Die (zeitlich relativ hoch aufgelösten, automatisierten) Bodenwasserstatusmessungen repräsentieren die (traditionellen, manuellen) frühmorgendlichen Blatt- und mittäglichen Stammwasserpotentialmessungen.

Dahingehend wurden folgende Fragen definiert:

1. Wie korrelieren die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials mit jenen des mittäglichen Stammwasserpotentials?
2. Wie korrelieren die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale (Blatt- und Stammwasserpotentiale) mit den gemessenen Bodenmatrixpotentialen?
3. Wie korrelieren die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale (Blatt- und Stammwasserpotentiale) mit den gemessenen Bodenwasseranteilen?

Sekundär soll die anschließende Hypothese am Versuchsstandort Loibenberg überprüft werden:

- Ein Pflanzenwasserstatus, welcher durch Trockenstress beeinflusst wird, hat negative Auswirkungen auf die Reifeparameter der Trauben und deren Ertrag.

Standortbezogen wurden folgende Fragen definiert:

1. Wie korrelieren die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials mit jenen des mittäglichen Stammwasserpotentials?
2. Welche Auswirkungen hat eine mögliche Bewässerung auf die Reifeparameter und den Ertrag der Sorten Grüner Veltliner und Rheinriesling?
3. Sind bei den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen (Blatt- und Stammwasserpotentiale) der beregneten und nicht-beregneten Auswertereihen sortenspezifische Unterschiede zwischen den Sorten Grüner Veltliner und Rheinriesling erkennbar?

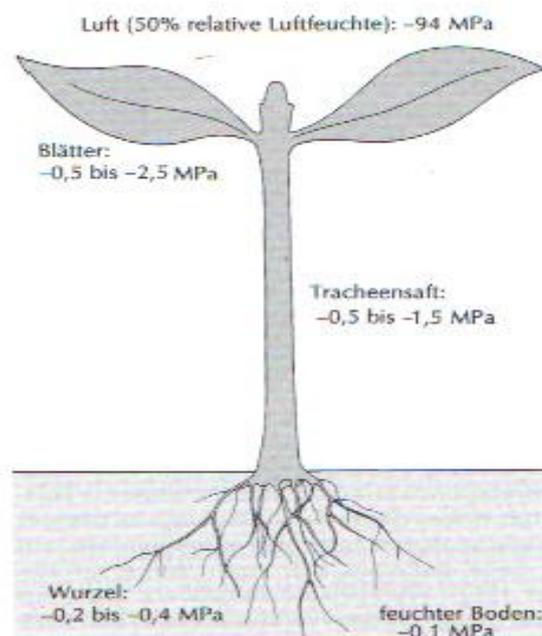
# 3. Theoretische Grundlagen

## 3.1. Wasser in der Weinrebe

Stoffwechselaktive Pflanzen bestehen zu 70 bis 95 % aus Wasser (Patzwahl 2007). Das Wassertransportsystem von höheren Pflanzen lässt sich nach Schopfer und Brennicke (2010) in drei Teilbereiche gliedern:

1. Wasseraufnahme durch das Wurzelsystem und Abgabe in die Leitbahnen (Kapillaren) des Xylems,
2. hydraulischer Langzeitstreckentransport in den Kapillaren des Xylems,
3. Zufuhr an die Sprossorganzellen und Abgabe an die Atmosphäre durch die Stomata (Spaltöffnungen) der Pflanzen.

Ein Wasserteilchen muss, um vom flüssigen Zustand im Boden bis zum gasförmigen Zustand in der Atmosphäre zu gelangen, eine Reihe von Widerständen überwinden (Richter 1977). Der Wassertransport erfolgt dabei auf Grundlage von Wasserpotentialdifferenzen innerhalb der Weinrebe und ihrer unmittelbaren Umgebung, welche durch das SPAC beschrieben und in Abbildung 1 veranschaulicht werden. Schopfer und Brennicke (2010) definieren das Wasserpotential über das chemische Potential des Wassers. Dabei wird das Wasserpotential einer Lösung, als die freie Enthalpie pro Einheitsvolumen Wasser bezogen auf den Standardzustand von Wasser (reines Wasser bei Normaldruck und  $-n$ -niveau) determiniert. Das Wasserpotential wird in Druckeinheiten (üblicherweise MPa) angegeben.



**Abbildung 1:** Repräsentative Wasserpotentiale entlang des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuums (25°C) (nach Schopfer und Brennicke 2010).

Die in der Abbildung 1 dargestellten Werte dienen als Anhaltspunkte und können je nach vorherrschenden Bedingungen variieren. Dabei ist deutlich erkennbar, dass die

Wasserpotentialwerte zwischen den einzelnen Blättern (-0,5 bis -2,5 MPa) und der nicht-wassergesättigten Atmosphäre (-94 MPa) schlagartig abnehmen. Der Hauptanteil der Energie für den Wassertransport wird dabei durch dieses Druckgefälle geliefert. Für den Wasserhaushalt der Weinrebe spielt somit vor allem die Transpirationsregulierung der Stomata an den Blättern eine entscheidende Rolle. Die Stomata befinden sich in der Epidermis, dem primären Abschlussgewebe der Blätter. Unkontrollierte Wasserabgaben über die Oberfläche der Pflanze werden durch die Dampfsperre der Cuticula (Wachsschicht) verhindert (Vogt und Schruft 2000).

Durch das komplexe Transportsystem verbreitet sich das Wasser im Weinrebenorganismus und übernimmt dabei eine Vielzahl von Funktionen. Zum einen dient das Wasser als Lösungs- und Transportmittel von Ionen, organischen Stoffen, sowie Gasen (Patzwahl 2007). Der pflanzliche Metabolismus benötigt parallel zu den Elementen Kohlenstoff (in Form von CO<sub>2</sub>) und Sauerstoff (in Form von O<sub>2</sub>), welche von der Atmosphäre bereitgestellt werden, mindestens 15 weitere Elemente, die vom Wasser und den darin gelösten anorganischen Nährstoffen aufgenommen werden. Somit ist Wasser für sämtliche Stoffwechselfvorgänge in der Pflanze, wozu auch die Photosynthese gehört, unentbehrlich (Schopfer und Brennicke 2010). Für die Weinproduktion hat die Zuckererzeugung durch den Prozess der Photosynthese, bei der unter Mitwirkung von Wasser und Sonnenlicht CO<sub>2</sub> zu Zucker aufgebaut wird, eine wesentliche Bedeutung (Niggli 2012). Zum anderen dient das Wasser der Temperaturregulation (Patzwahl 2007) und der vom Wasser ausgehende Druck hat eine Stützfunktion für die Weinreben, da infolgedessen die Gewebespannung in den Zellen aufrechterhalten wird (Vogt und Schruft 2000).

Gegenüber Trockenstress besitzen Weinreben, nicht nur aufgrund ihres komplexen Wurzelsystems, eine hohe Toleranz. Die Blätter der Weinreben werden durch feine Filzhaare geschützt, wodurch die Wirkung der Sonneneinstrahlung, sowie der Einfluss der blattnahen Luftströmungen gedämmt und folglich die Transpiration gehemmt wird (Niggli 2012). Zusätzlich besitzt die Weinrebe einige physiologische Regulierungsmechanismen um gegen Wassermangel anzukämpfen. Ausgelöst werden diese Mechanismen durch das Phytohormon Abscisinsäure, welches bei aufkommendem Trockenstress in den Wurzeln erzeugt und anschließend in die oberirdischen Pflanzenorgane transportiert wird. Die Abscisinsäure lanciert die Schließung der Spaltöffnungen und fördert somit einen wirtschaftlicheren Umgang mit Wasser (Prior 2004).

Schultz (2003) spricht von verschiedenen Reaktionstypen auf Trockenstress innerhalb der Art der Weinrebe. Im Hinblick auf unterschiedliche, sortenspezifische Reaktionsmuster unterteilt Patzwahl (2007) Weinreben in hydrostabile und hydrolabile Sorten. Hydrostabile Sorten haben die Fähigkeit, durch die Zelleinlagerung von osmotisch wirksamen Stoffen (z.B. Kalium, Aminosäure oder Zucker), das osmotische Potential und somit das Wasserpotential in der Zelle abzusenken. Folglich kann durch eine Reduzierung des Pflanzenwasserpotentials gegenüber jenem des Bodens die Wasseranziehungskraft gesteigert werden.

Außerdem ist die Spaltöffnungsregulierung von hydrostabilen Sorten gegenüber sich entwickelnden Trockenstress weniger sensibel, wodurch die Photosynthese noch bei sehr niedrigen Bodenwasserpotentialen aufrechterhalten wird.

## **3.2. Wasser im Boden**

Scheffer und Schachtschabel (2010) bezeichnen als Böden den belebten Teil der obersten Erdkruste, deren feste Bestandteile aus Mineralien unterschiedlicher Art und Größe, sowie dem Humus (organische Substanz) bestehen. Aufgrund seines porösen Mediums – einem charakteristischen Hohlraumsystem – wird der Boden durch das Verhältnis von fester Bodensubstanz (feste Phase), Bodenwasser (flüssige Phase) und Bodenluft (gasförmige Phase) bestimmt (Rowell 1997). Kammerer und Loiskandl (2005) sprechen von einem Mehrphasensystem. Ist dabei das Hohlraumsystem wassergesättigt, so besteht der Boden aus der festen und flüssigen Phase, ist es hingegen wasserungesättigt, so kommt noch die gasförmige Phase hinzu. Zwischen den Phasen existieren zahlreiche chemische und physikalische Wechselwirkungen. Als Bodenfruchtbarkeit, bezeichnen Scheffer und Schachtschabel (2010) die Veranlagung von Natur- und Kulturböden, den Pflanzen als Standort zur Verfügung zu stehen. Für die Weinreben dient der Boden vor allem als Wasser- und Nährstofflieferant (Pertoll und Raifer 2011). Die Reben sind dabei auf eine gute Durchlüftung des Bodens angewiesen, damit die Wurzeln sich weit verteilen bzw. stark wachsen können. Im Zuge dessen kann ein gutes Wasseraufnahmevermögen garantiert werden, außerdem dient der Wurzelraum der Rebe als Verankerung (Müller et al. 2008, Vogt und Schruft 2000). Ist ein Überangebot an Wasser im Wurzelbereich vorhanden, so wird die Durchlüftung des Bodens und in dessen Folge die O<sub>2</sub>-bedürftige Atmung der Wurzeln gehemmt, was bis zum Absterben derselben führen kann (Schopfer und Brennicke 2010).

Die elementare Grundlage für das Verständnis des Zusammenhangs zwischen Boden und Bodenwasser ist das Vermögen des Bodens Wasser zu leiten und zu speichern (Kastanek et al. 2001). Bodenwasser definiert jenes Wasser, welches bei einer Trocknung bei 105°C bis zur Massenkonstanz entfernt werden kann. Nicht zum Bodenwasser zählt das sog. Konstitutions- bzw. Kristallwasser der festen Bodenpartikel, das erst bei höheren Temperaturen verdunstet (Scheffer und Schachtschabel 2010). Das Bodenwasser kann in das Grundwasser und in das über dem Grundwasserspiegel auftretende Wasser der vadosen Zone differenziert werden, wobei Letzteres in Form von Sicker- oder Haftwasser auftritt (Kammerer und Loiskandl 2005). Das Sickerwasser ist für die Wasserbewegungen im Boden verantwortlich. Dabei wird das Wasser durch die Einwirkung der Gravitation in den Poren abwärts bewegt und erreicht folglich tiefere Bodenhorizonte. Dieser Vorgang wird auch als Infiltration bezeichnet, wodurch das bereits vorhandene Bodenwasser verdrängt und somit selbst zum Sickerwasser wird (Kettenreaktion). Das Haftwasser ist hingegen jenes Wasser, welches in der Bodenmatrix gegen die Schwerkraft gehalten wird. In Abhängigkeit von der Bindungsart wird das Haftwasser darüber hinaus in Kapillar- oder Adsorptionswasser unterteilt (Cepuder 2011). Zum

Adsorptionswasser zählen jene Wassermoleküle, welche sich in Form eines dünnen Wasserfilms an die feste Bodenmatrix (Mineraloberflächen) anlagern. Ursachen dieser Anlagerung sind osmotische Kräfte, elektrostatische Kräfte, Van-Der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen. Kapillarwasser wird hingegen durch stark gekrümmte Menisken in die Poren bzw. Kapillaren hineingezogen und dort festgehalten. Menisken entstehen an den Berührungsstellen der Mineralteilchen und vergrößern sich mit steigender Wasseranlagerung (Hartge und Horn 1999).

Der Bodenwassergehalt der vadosen Zone wird je nach vorherrschenden Witterungsverhältnissen (Niederschlägen) durch Vorgänge der Infiltration bzw. des kapillaren Aufstiegs, sowie durch die Evaporation des Bodens und die Transpiration der Pflanzen (zusammen Evapotranspiration) beeinflusst. Zusätzlich nehmen die Pflanzen durch abfallendes, bodenbedeckendes Laub, welches die Evaporation des Bodens verhindert, Einfluss auf den Bodenwassergehalt (Rowell 1997).

### **3.2.1. Bodenwasserpotentialkonzept**

Das Bodenwasser ist einer Vielzahl von möglichen Kräften ausgesetzt, mit der das Wasser im Boden bewegt bzw. festgehalten wird. Dabei resultieren diese schwer zu determinierenden Kräfte aus der gegenseitigen Anziehung zwischen der Bodenmatrix und dem Bodenwasser, dem Vorhandensein von aufgelösten Substanzen in der Bodenlösung, sowie der Wirkung von externen Gasdrücken und der Schwerkraft (Hillel 1998). In der Bodenphysik ist es weit verbreitet, an Stelle der schwer definierbaren Kraft, das sog. Potential – die Arbeitsfähigkeit der Kraft – zu betrachten. Buckingham (1907) prägte bei der Erforschung der Wasserbindung im Boden als Erster den Begriff des Potentials. Das Bodenwasserpotential entspricht dabei formal jener Arbeit, welche pro Einheit einer gewählten Bezugsgröße (z.B. Druckeinheit oder Einheitssäule H<sub>2</sub>O) an reinem Wasser aufgewendet werden muss, um eine infinitesimale Menge Wasser von einem Ausgangssystem reversibel und isothermal in ein Zielsystem zu bewegen (Soil Science Society of America 1997).

Da die Kräfte auf das Bodenwasser unterschiedlicher Art sind und keine gemeinsame Einflussgröße existiert, werden die Teilpotentiale der Kräfte miteinander addiert und spiegeln sich im Gesamtbodenwasserpotential wider. Die unterschiedlichen Teilpotentiale werden mit Ausnahme des osmotischen Potentials und des Schwerkraftpotentials in der Fachliteratur unterschiedlich aufgeteilt, bezeichnet und definiert (Kammerer und Loiskandl 2005). Nachfolgend wird das von Bolt et al. (1976) definierte Konzept zum Gesamtbodenwasserpotential verwendet und folgendermaßen anhand der Formel 1 determiniert.

$$\Psi_t = \Psi_o + \Psi_g + \Psi_p$$

$\Psi_t$  = Gesamtbodenwasserpotential

$\Psi_o$  = osmotisches Potential

$\Psi_g$  = Schwerkraftpotential

$\Psi_p$  = Druckpotential

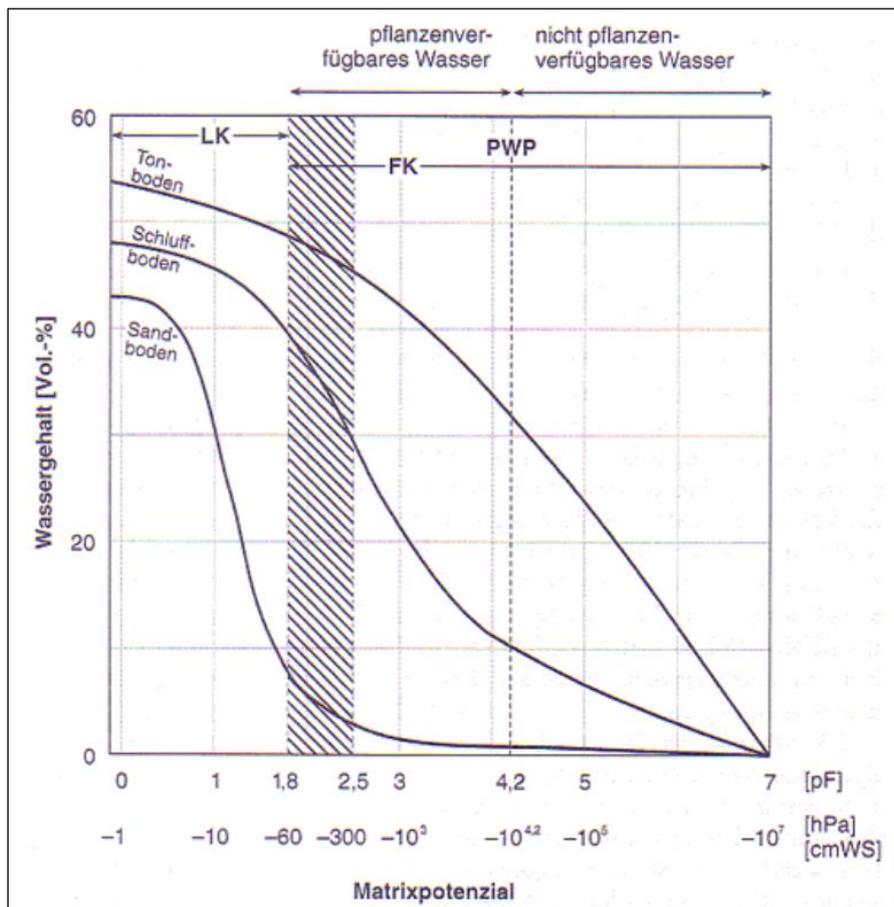
Das Druckpotential wird des Weiteren in das Gasdruckpotential (pneumatische Potential) und das Matrixpotential differenziert. Dabei gibt das Gasdruckpotential die Druckdifferenz zwischen Boden- und atmosphärischem Luftdruck wieder, welches in der Regel gleich Null ist und daher vernachlässigt werden kann. Wenn zusätzlich das osmotische Potential im Boden konstant und das Schwerkraftpotential bekannt sind, verbleibt letztendlich das Matrixpotential, als die maßgebend bestimmende Größe (Kammerer und Loiskandl 2005).

### 3.2.2. Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung

Das Matrixpotential und der Wasseranteil sind Kenngrößen für den Bodenwasserstatus. Das Matrixpotential wird in Druckeinheiten (Pa oder bar) oder cmWS (Zentimeter-Wassersäule) angegeben und ist dem Gravitationspotential entgegengesetzt, weshalb es stets ein negatives Vorzeichen aufweist. Als Synonym kann der Begriff Wasserspannung verwendet werden, welcher jedoch im Gegensatz zum Matrixpotential stets ein positives Vorzeichen besitzt. Das Matrixpotential kann auch als pF-Wert (negativer dekadischer Logarithmus der Wassersäule in cm) dargestellt werden. Der Wasseranteil wird in der Einheit Volumen/Volumen (z.B. cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) oder dimensionslos als Prozentsatz angegeben (Cepuder et al. 2012). Diese beiden Kenngrößen für den Bodenwasserstatus können für jeden Boden durch die sog. Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung miteinander verknüpft werden. Für die Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung existieren unterschiedliche Synonyme, wie z.B. Retentionsfunktion oder pF-Kurve. Dabei ist die Retentionsfunktion primär vom Porenvolumen und von der Porengrößenverteilung abhängig. Neben diesen ist die Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung mehr oder weniger von Einflussgrößen, wie der Bodenart (Korngrößenverteilung), der Trockendichte, dem Humusgehalt oder dem Anteil des organischen Kohlenstoffs geprägt (Kammerer und Loiskandl 2005).

In Abbildung 2 sind die Retentionsfunktionen für unterschiedliche Böden dargestellt. Auf der Abszisse (x-Achse) ist das Matrixpotential aufgetragen, auf der Ordinate (y-Achse) der Wasseranteil. Es lässt sich dabei gut erkennen, dass der Verlauf der Retentionsfunktion bei verschiedenen Böden (Sand, Schluff und Ton) unterschiedlich ist. Dabei ist die Bindungsstärke bei gleichbleibendem Wasseranteil mit abnehmendem Porenvolumen größer bzw. das Matrixpotential negativer, mit

anderen Worten hat der Sandboden im Vergleich zum Tonboden eine geringere Bindungsstärke. Bei einem Matrixpotential von 0 hPa sind die Poren aller dargestellten Böden vollkommen wassergesättigt, das entspricht einem Wasseranteil von 43 bis 53 %. Aus der Retentionsfunktion können außerdem bodenhydraulische Kennwerte, wie die Feldkapazität (FK) oder der Permanente Welkepunkt (PWP), bestimmt werden.



**Abbildung 2:** Zusammenhang zwischen Matrixpotential und Wasseranteil für drei unterschiedliche Böden (nach Scheffer und Schachtschabel 2010).

Die Retentionsfunktion kann unmittelbar durch Methoden im Labor (z.B. Druckplattenapparat) bzw. im Feld (z.B. Bodenwassersensoren) und indirekt durch Pedotransferfunktionen ermittelt werden (Kammerer und Loiskandl 2005). Die Pedotransferfunktion stellt den mathematisch-physikalischen Zusammenhang zwischen einer normalerweise hydraulischen Eigenschaft eines Bodens (abhängige Variable) und grundlegenden Kennwerten (unabhängige Variablen), welche der Beschreibung des Bodens dienen, dar (Hillel 1998). Beeinflusst wird die Retentionsfunktion nach Bear (1979) und Hartge und Horn (1999), neben den bereits erwähnten Einflussgrößen, von Be- und Entwässerungsprozessen. Je nach vorherrschendem Prozess ergeben sich dabei unterschiedliche Hysteresiseffekte. Die Hysteresis wird verursacht durch verschiedene Lufteinschlüsse während der Wasseraufnahme, durch Schrumpfung bzw. Quellung des Bodenkörpers, durch

Veränderungen der Benetzbarkeit oder durch die für Ent- oder Bewässerung gegensätzliche Wirkung von Porenengpässen (Scheffer und Schachtschabel 2010).

### 3.2.3. Bodenhydraulische Kennwerte

Begriffe wie Feldkapazität oder Permanenter Welkepunkt werden als bodenhydraulische Kennwerte bezeichnet und dienen als Richtwerte zur Beurteilung des Wasserhaushalts von Böden.

Veihmeyer und Hendrickson (1949) verstehen unter Feldkapazität die Menge an Bodenwasser welche im Boden gebunden wird, wenn das überschüssige Wasser entwässert und die senkrechte Abwärtsbewegung materiell beendet wurde. Bei durchlässigen Böden, mit einer einheitlichen Textur und Struktur, ist dies nach zwei bis drei Tagen nach einem Niederschlagsereignis oder einer Bewässerung der Fall. Mit anderen Worten wird die Feldkapazität als jener Wasseranteil definiert, welcher nach zwei bis drei Tagen nach Vollsättigung – entgegen der Schwerkraft – durch ein bestimmtes Matrixpotential gehalten wird. Kammerer und Loiskandl (2005) determinieren die Feldkapazität durch den Wasseranteil bei einem Matrixpotential von  $-0,1$  bis  $-0,3$  bar (pF-Wert von 2 bis 2,5). Die Werte des Matrixpotentials bei denen die Feldkapazität festgelegt wird, variieren jedoch in der Fachliteratur und sind keine Konstanten, sondern divergieren von Standort zu Standort. Sie sollten somit für jeden Bodentyp und den vorherrschenden Umweltbedingungen entsprechend durch eine Pedotransferfunktion bzw. über empirische Tafel- und Tabellenwerke angepasst werden (Hangen und Scherzer 2004).

Eine Pflanze beginnt ab einem bestimmten Punkt zu welken, an dem sie das Wasser, welche sie durch die Transpiration an die Atmosphäre abgibt, nicht mehr aus dem Boden ersetzen kann. Jener Wasseranteil, an dem die Pflanze den Zustand erreicht, dass sie nicht mehr in der Lage ist dem Boden Wasser zu entziehen und irreversible Schäden erleidet, wird als Permanenter Welkepunkt bezeichnet. Bei der Mehrheit der Kulturpflanzen entspricht dies einem Matrixpotential von  $-15$  bar (pF-Wert von 4,2) (Kastanek et al. 1980). Als Totwasser wird jenes Bodenwasser bezeichnet, welches bei Bindungskräften über einem pF-Wert von 4,2 nicht mehr aufgenommen werden kann (Müller et al. 2008). Wiederum kann je nach Gegebenheiten des Bodens und der Umwelt ein standortspezifischer Permanenter Welkepunkt durch Pedotransferfunktionen bzw. aus Tabellenwerken ermittelt werden (Hangen und Scherzer 2004).

Der bedeutendste Bodenkennwert bezüglich der Beurteilung des Trockenstresses von Weinreben ist jedoch die nutzbare Feldkapazität (nFK), welche dem pflanzenverfügbaren Bodenwasser innerhalb des effektiven Wurzelraums entspricht. Allgemein wird bei der nutzbaren Feldkapazität von jenem Wasseranteil gesprochen, der mit Bindungskräften zwischen ca. pF 2 und pF 4,2 im Boden gehalten wird (Müller et al. 2008). Die nutzbare Feldkapazität ergibt sich somit aus der Differenz zwischen Feldkapazität und Permanentem Welkepunkt (Formel 2).

$$nFK = FK - PWP$$

Der entsprechende Grad der Ausnutzung der verfügbaren Bodenwassermenge hängt aber schlussendlich von der effektiven Durchwurzelungstiefe und –intensität ab (Scheffer und Schachtschabel 2010).

### **3.3. Pflanzenwasserpotential**

Zu den traditionellen, pflanzenbasierten Messverfahren im Weinbau zählen Pflanzenwasserpotentialmessungen an Weinreben, welche mittels der Scholanderdruckkammer durchgeführt werden. Dabei besteht die Möglichkeit, sowohl das Blatt-, als auch das Stammwasserpotential der Reben zu bestimmen, um schlussendlich deren Wasserstatus bzw. den Trockenstressbereich zu ermitteln, in welchen sich die Reben befinden (van Leeuwen et al. 2009, Centeno et al. 2010, Gruber 2013). Messungen des Pflanzenwasserpotentials mit Hilfe der Scholanderdruckkammer werden nach dem Funktionsprinzip von Scholander et al. (1965) ausgeführt. Auf Grundlage des SPAC wird das Bodenwasser durch die Weinrebe in die Atmosphäre transportiert. Wird der Wasserstrom im Xylem durch die Entnahme eines Weinblattes und dem Abschneiden dessen Stielendes unterbrochen, ziehen sich die Wasserfäden von der Oberfläche zurück; die Wasserspannung wird dadurch abrupt beendet. Durch den in der Scholanderdruckkammer künstlich angelegten Druck – erzeugt durch elementaren Stickstoff – wird die ursprüngliche Spannung wieder hergestellt und das Wasser aus dem abgeschnittenen Stielende gedrückt. Der verwendete Druck entspricht dem Wasserpotential der Weinrebe (Waring 1970).

Grundsätzlich sind sowohl Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials, als auch des mittäglichen Stammwasserpotentials mit dem Vorteil verbunden, dass die Messwerte direkt an der Weinrebe erhoben werden können. Durch diese Untersuchungsmethode kann somit das gesamte für die Weinrebe erreichbare Wasser erfasst werden, ohne die Wurzeldichte und -verteilung im Boden zu kennen (Prior 2005). Jones (2004) und Geyrhofer (2011) unterstreichen diese Aussage indem sie darauf hinweisen, dass die Methode aufgrund ihrer Messgenauigkeit und Zuverlässigkeit das derzeit einzige Instrument ist, welches eine Bewertung im gesamten Wurzelraum der Rebe zulässt. Nachteilig wirken sich vor allem die mangelnde Handhabung und die damit verbundene fehlende Möglichkeit der Automatisierung aus (Gruber 2013). Dadurch sind die Pflanzenwasserpotentialmessungen sehr arbeits- und zeitintensiv. Im Gegensatz dazu lassen sich Bodenwassersensoren automatisieren und auf Grundlage dessen beseitigen sie die Nachteile der Messungen mit der Scholanderdruckkammer, wodurch an Personalkosten eingespart werden kann. Nachteilig wirkt sich der Umstand aus, dass es sich um punktuelle Messungen handelt. Daher haben die gewonnen Daten nur für

die unmittelbare Umgebung des Messfühlers eines Sensors Gültigkeit (Centeno et al. 2010).

### **3.3.1. Frühmorgendliches Blattwasserpotential**

Die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials ( $\Psi_{fm}$ ) werden kurz vor Sonnenaufgang an den Weinblättern vollzogen. Dahinter steckt die Überlegung, dass in der Nacht die mikroklimatischen Bedingungen zwischen den Blättern homogen sind und keine Transpiration stattfindet. Somit stellt sich kurz vor Sonnenaufgang ein Gleichgewichtszustand zwischen dem Blattwasserpotential der Rebe sowie dem Bodenwasserpotential des gesamten durchwurzeltten Raums ein (Medrano et al. 2003, Prior 2005, Heßdörfer 2010). Vor Sonnenaufgang hat jedes einzelne Weinblatt der Rebe ein gleiches Wasserpotential (van Leeuwen et al. 2009). Zu beachten ist aber, dass sich laut Améglio et al. (1999) die beobachtete Wiederbefeuchtung („rehydration“) der Weinreben über Nacht sehr negativ auf die Präzision der erhaltenen Werte auswirkt. Die frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale der Weinreben unter Trockenstressbedingungen weisen hierbei ähnliche Werte auf wie jene frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale von bewässerten Reben. Daraus lässt sich ableiten, dass die frühmorgendlichen Blattwasserpotentialmessungen für eine Bewässerungssteuerung nicht geeignet sind, da der Pflanzenwasserstatus bei heterogenen Bodenwasserinhalten nicht korrekt repräsentiert wird. Außerdem stellen die unattraktiven Tageszeiten der Messdurchführung einen Nachteil dar (Gruber 2013). Zusätzlich konnte im Zuge der Masterarbeit festgestellt werden, dass die spätsommerliche Taunässe für die frühmorgendlichen Messungen ein Problem darstellte, da dadurch die Messwerte verfälscht wurden.

### **3.3.2. Mittägliches Stammwasserpotential**

Als Lösung, für die angesprochenen Probleme bei den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialmessungen, können die mittäglichen Messungen des Stammwasserpotentials ( $\Psi_{st}$ ) dienen. Diese Messungen werden ebenfalls an Weinblättern durchgeführt, welche mindestens eine Stunde vor der Messung in einen lichtundurchlässigen Plastikbeutel gepackt werden (Begg und Turner 1970). Innerhalb dieser Zeitspanne stellt sich eine Balance zwischen dem Wasserpotential des Blattes und jenem des Stammes (Xylems) ein (van Leeuwen et al. 2009). Dennoch haben van Leeuwen et al. (2008) herausgefunden, dass bei Wasserpotentialmessungen an mehreren Blättern derselben Weinrebe, der Variationskoeffizient des mittäglichen Stammwasserpotentials konsistent niedriger ist im Vergleich zu jenem des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials. Der Grund liegt darin, dass Stammwasserpotentialmessungen von Witterungsbedingungen beeinflusst werden. Die Messungen sollten bei gleichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden, um einen Vergleich der Bodenwasserverfügbarkeit zwischen unterschiedlichen Messterminen zu ermöglichen (van Leeuwen et al. 2009). Dies stellt vor allem in mitteleuropäischen Weinbaugebieten (inkl. Österreich) ein Problem dar, da während der Vegetationsperiode der Weinreben mit ungleichmäßigen

Witterungsbedingungen zu rechnen ist. Heßdörfer (2015) empfiehlt daher eine Korrelation mit dem Wasserdampfsättigungsdefizit (VPD) der Luft.

### 3.3.3. Trockenstressauswirkungen der Pflanzenwasserpotentiale

Durch die ermittelten Wasserpotentiale können letztendlich Trockenstressbedingungen und die möglichen Auswirkungen auf wichtige Stoffwechselforgänge identifiziert werden. Die Kategorisierung des Trockenstresses basiert dabei auf Grenzwerten, welche jedoch in der Fachliteratur variieren (u.a. Deloire et al. 2005, van Leeuwen et al. 2009, Deloire und Heyns 2011). Dabei bestehen zwischen Weiß- und Rotweinsorten beachtliche sortenspezifische Unterschiede, da für Rotweinsorten ein höherer Grad an Trockenstress wünschenswert ist. Unter diesen Bedingungen kann die Anreicherung von phenolischen Substanzen (Tannine), sowie von Gerb- und Aromastoffen und die Farbausbildung gesteigert werden (Pertoll und Raifer 2011, Prior 2004). Bei Weißweinsorten wirkt hingegen ein angemessener Säuregehalt qualitätsfördernd, welcher bei zunehmendem Trockenstress verringert wird (Pertoll und Raifer 2011). Außerdem sind die Gefahren von Gärstörungen und Fehleraromen, wie z.B. untypische Alterungsnoten bei aufkommendem Trockenstress, höher (Prior 2005). Da in der vorliegenden Masterarbeit ausschließlich Weißweinsorten untersucht wurden, sollten die in der Tabelle 1 angeführten Werte sowie die davon ableitbaren Pflanzenreaktionen als Orientierung dienen, auch weil keine sortenspezifische Grenzwerte – speziell für die Weißweinsorten Grüner Veltliner und Rheinriesling – in der Literatur zu finden waren.

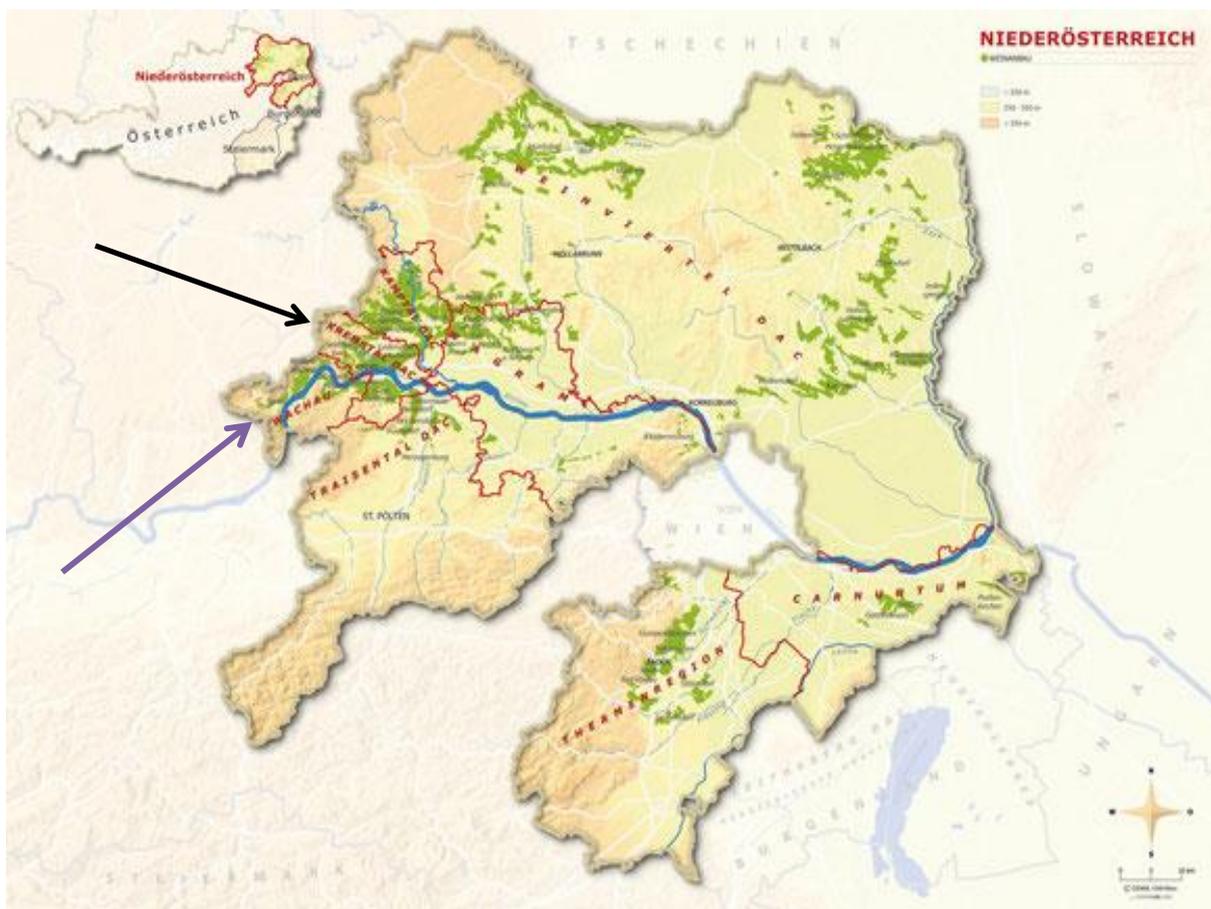
**Tabelle 1:** Übersicht der Auswirkungen unterschiedlicher frühmorgendlicher Blatt ( $\Psi_{fm}$ )- und mittäglicher Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{st}$ ) auf bedeutende Stoffwechselforgänge von Reben (verändert nach Schultz und Steinberg 2002, Kopyt und Ton 2005, van Leeuwen et al. 2009, Deloire und Heyns 2011).

<b>Trockenstress</b>	<b>kein Stress</b>	<b>moderater Stress</b>	<b>starker Stress</b>
$\Psi_{fm}$ (MPa)	0 bis -0,2	-0,2 bis -0,6	kleiner -0,6
$\Psi_{st}$ (MPa)	0 bis -0,6	-0,6 bis -1,2	kleiner -1,2
<b>Pflanzenreaktion</b>			
<b>Assimilation</b>	hoch	reduziert	stark reduziert
<b>Vegetatives Wachstum</b>	hoch	stark reduziert	eingestellt
<b>Blüteverlauf</b>	gut	gut	schlecht
<b>Ertrag</b>	hoch	etwas reduziert	stark reduziert
<b>Zuckergehalte</b>	hoch	sehr hoch	etwas bis stark reduziert
<b>Farbstoffausbildung</b>	reduziert	hoch	hoch
<b>Säure</b>	hoch	reduziert	reduziert
<b>Holzausreife</b>	gut	sehr gut	sortenabhängig gut bis schwach

## 4. Material und Methoden

### 4.1. Beschreibung des Projektgebiets

Das Projektgebiet umfasste die Versuchsstandorte Sandgrube und Loibenberg, welche sich im Bundesland Niederösterreich befanden und nach dem österreichischen Weingesetz (2009 idgF.) der Weinbauregion Weinland Österreich zugehörig waren. Werden die Versuchsstandorte in Anlehnung an dieses Gesetz geographisch detaillierter klassifiziert, so war der Standort Sandgrube im Weinbaugebiet Kremstal vorzufinden, während der Standort Loibenberg im Weinbaugebiet der Wachau beheimatet war. Im Zuge der letztmals durchgeführten Weingartengrunderhebung im Jahr 2009 war im Kremstal eine bepflanzte Weingartenfläche von circa 2.243 ha vorzufinden, während in der Wachau auf einer Fläche von circa 1.350 ha Wein angebaut wurde (Statistik Austria 2010). Zu den wichtigsten Rebsorten zählten in beiden Weinbaugebieten der Grüne Veltliner und der Riesling, aus denen Weißweine erzeugt werden können (ÖWM 2016b). Die detaillierte geographische Lage der beiden Weinbaugebiete innerhalb Niederösterreichs kann in Abbildung 3 betrachtet werden.



**Abbildung 3:** Überblick der geographischen Lage der Weinbaugebiete Kremstal (schwarzer Pfeil) und Wachau (violetter Pfeil) innerhalb Niederösterreichs (verändert nach ÖWM 2016c).

Das gesamte Projektgebiet war von dem Einströmen warmer pannonischer Luftmassen, aus dem Osten kommend, geprägt. Zusammen mit den kalten, kontinental beeinflussten Luftmassen aus dem nördlichen Weinviertel entwickelten sich große Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, welche vor allem in der Reifeperiode für die Aromaausbildung der Weißweine eine wesentliche Rolle spielten. Hinzu kam die temperaturregulierende Wirkung der Donau, welche im Winter als Wärmespeicher und im Sommer als kühlende Komponente wirkte (Gemünd 2013a, Fitz et al. 2014).

#### **4.1.1. Versuchsstandort Sandgrube**

Der Versuchsstandort Sandgrube (48°25'25.158"N, 15°37'13.872"O), welcher aus einem Weingarten bestand, lag im westlichen Teil der gleichnamigen Weinbauriede Sandgrube, welche an die östlichen Ausläufer der Stadt Krems an der Donau angrenzte (Gemünd 2013b). Der Versuchsstandort befand sich im Besitz der Wein- und Obstbauschule Krems auf einer Höhe von 237 m. Angebaut wurden im gesamten Weingarten der Sandgrube die beiden Rebsorten Grüner Veltliner und Gelber Muskateller, wobei die Letztere im Rahmen der Datenerhebung nicht berücksichtigt wurde und somit für die vorliegende Masterarbeit nicht relevant war. Beim Grünen Veltliner, welcher im Rahmen der Masterarbeit behandelt wurde, handelte es sich um den Klon Kr. 37 – 40 auf der Unterlagenrebensorte SO 4, welcher sich generell als kleinbeeriger, würziger Veltlinertyp auszeichnete. Die Reben wurden im Jahr 1993 eingepflanzt. Die Exposition des Standorts war gegen Süden ausgerichtet. Die Fahrgassenbreite zwischen den Weinreben betrug in etwa 300 cm, der Stockabstand der Reben circa 100 cm. Bei den Weinreben wurde mit dem klassischen Spalier als Erziehungssystem gearbeitet.

Das Bodenmanagement ließ sich dadurch beschreiben, dass die Fahrgassen alternierend zwischen gepflügten, offenen und unbearbeiteten, begrünten Varianten wechselten. In den jeweiligen Auswertereihen fand keine Unterstockbegrünung statt. Am Versuchsstandort Sandgrube wurde kein Bewässerungssystem installiert und somit fand auch keine künstliche Beregnung statt. In den letzten Jahren hatte die WBS-Krems den Versuchsstandort Sandgrube mit Bodenwassersensoren ausgestattet. Weitere Informationen zum Versuchsstandort Sandgrube, wie z.B. die Anordnung der Auswertereihen (Nr. 4 und Nr. 6) oder die Stockanzahl, können der Abbildung 4 entnommen werden, wobei zur besseren Übersicht nur die relevanten Reihen der Sorte Grüner Veltliner dargestellt werden. Die Auswertereihen sind durch die rot ausgefüllten Balken gekennzeichnet.

Versuchsstandort Sandgrube																							
Reihe	Sorte	Unterlage	Bemerkung	Pflanzjahr	Gstnr. 2737/2 Norden															St/Reihe	Parz.		
Grüner Veltliner 0,3657 ha																							
1	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	6	5	5	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	114	19	
			Klon		37-40																		
2	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	10	5	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	113	18	
			Klon		37-40																		
3	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	9	5	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	112	18		
			Klon		37-40																		
4	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	8	5	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	111	18		
			Klon		37-40																		
5	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	8	5	7	6	6	6	7	5	6	6	6	6	6	6	7	111	18		
			Klon		37-40																		
6	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	8	6	6	6	6	6	6	6	7	5	6	6	6	7	5	6	7	111	18
			Klon		37-40																		
7	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	8	6	6	6	7	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	106	17	
			Klon		37-40										36-31								
8	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1993	7	6	6	6	7	5	6	7	5	6	6	6	6	6	6	8	105	17	
			Klon		37-40										36-31								
9	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1992	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	5	7	5	6	6	8	104	17
			Klon		36-31																		
10	Grüner Veltliner	SO 4	Parzellen	1992	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	104	17	
			Klon		36-31																		
Süden																							

**Abbildung 4:** Übersicht über den Versuchsstandort Sandgrube (verändert nach Gabler und Kührer 2013).

Die Weinbauareale Sandgrube fußt auf einem mächtigen Lösshang, dessen Ausgangsmaterial meist aus Lockermaterial oder unterschiedlich stark aufgemürbtem Gestein besteht. Lössböden lassen sich durch ihren hohen Mineralienreichtum sowie durch ihre Fähigkeit zur Wasserrückhaltung und Wärmespeicherung charakterisieren (Gemünd 2013a). Löss, welcher gegen Ende der Eiszeit durch Windströmungen aus Schmelz- und Frostschuttagerungen aufgewirbelt und letztendlich sedimentiert wurde, besteht hauptsächlich aus Schluff (Scheffer und Schachtschabel 2010). Der Oberboden der Weinbauareale ist durch Rigolen gekennzeichnet. Als Rigolen wird eine Bearbeitung des Bodens charakterisiert, welche sich bis in eine Tiefe von einem Meter erstreckt und dabei auch den Untergrund durchmengt (Nestroy et al. 2011).

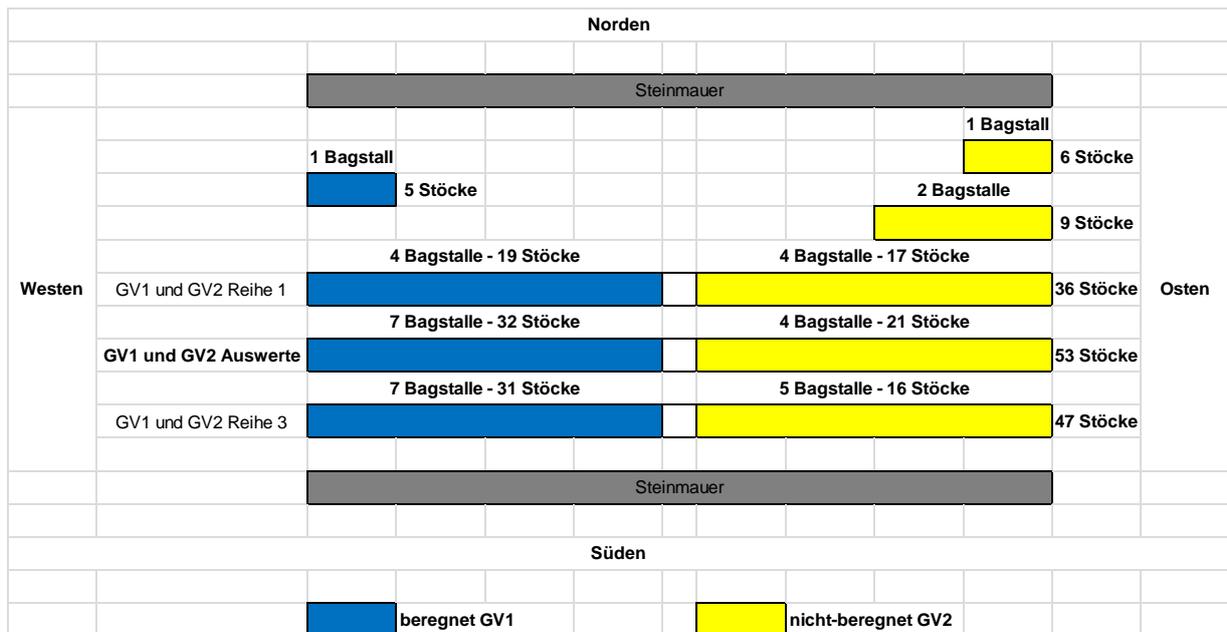
#### 4.1.2. Versuchsstandort Loibenberg

Der Versuchsstandort Loibenberg bestand aus zwei Weingärten, die auf Terrassen des gleichnamigen Loibengraben angelegt wurden. Der Loibenberg erstreckt sich oberhalb des Dorfes Unterloiben und ist seit 1971 der Stadtgemeinde Dürnstein zugehörig (Stadtgemeinde Dürnstein 2016). Die beiden Weingärten wurden von Steinmauern getragen, durch welche erst die Bewirtschaftung der Steilhänge ermöglicht wurde. Sie unterschieden sich voneinander aufgrund der angebauten Rebsorten. Auf dem etwas höher gelegenen Weingarten (48°23'39.656"N, 15°32'29.594"O, 291 m Höhe) wurde die Rebsorte Grüner Veltliner angebaut, während im tiefer gelegenen Weingarten (48°23'39.894"N, 15°32'34.634"O, 275

m Höhe) die Rebsorte Rheinriesling gedieh. Somit wurde Ersterer als Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner (LB-GV), letzterer als Weingartenterrasse LB-Rheinriesling (LB-RR) bezeichnet. Der bestehende Höhenunterschied zwischen den Weingärten war darin begründet, dass die beiden Weingärten durch Weingartenterrassen im Besitz anderer Winzer voneinander getrennt wurden. Der Versuchsstandort Loibenberg stand im Besitz des Weingutes Knoll und die beiden Weingärten waren Richtung Süden ausgerichtet. Bei der Sorte Grüner Veltliner handelte es sich um eigene Edelreiser der Selektion Knoll auf der Unterlage Kober 5 BB. Die Reben der Sorte Grüner Veltliner wurden im Jahr 2005 eingepflanzt. Bei der Sorte Rheinriesling war der Klontyp unbekannt. Als Setzjahrgang galt das Jahr 1960 (war jedoch nicht exakt feststellbar) auf der Unterlage Kober 5 BB. Die Breite der Fahrgassen zwischen den Reihen betrug in beiden Weingartenterrassen in etwa 150 cm, der Stockabstand der Reben circa 105 bis 110 cm. Die Reben wurden mit dem System klassischer Spalier erzogen.

Aufgrund der Steillagen und dem damit verbundenen terrassenförmigen Aufbau, sowie der engen Fahrgassen war eine maschinelle Bearbeitung des Bodens nicht möglich. Somit wiesen die Reihen während der Vegetationsperiode eine Unterstockbegrünung auf, auch die Fahrgassen blieben ganzjährig begrünt. Die beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling bestanden jeweils aus einer nicht-beregneten und einer beregneten Parzelle (Auswertereihe). Die beregneten Auswertereien wurden durch eine Tropfbewässerungsanlage versorgt, wobei der Tropfabstand jeweils 80 cm betrug. Auf dem gesamten Versuchsstandort Loibenberg wurden keine Sensoren installiert.

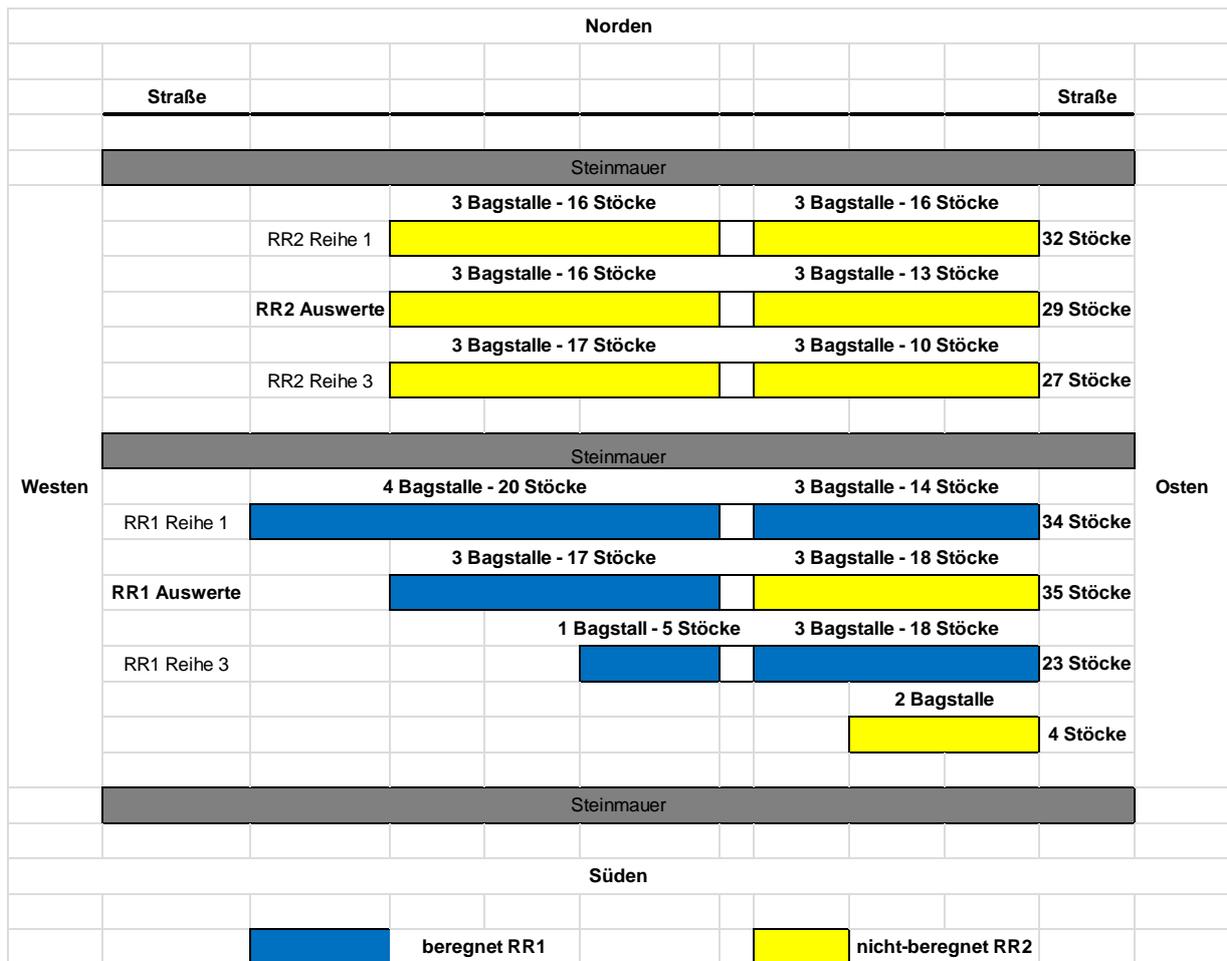
Die am Versuchsstandort Loibenberg vorkommenden Trockensteinmauern beeinflussten die Anordnung der Auswertereien erheblich. Generell sind Steinmauern ausgezeichnete Wärmespeicher und beeinflussen die Weinreben durch ihre nächtliche Wärmeabgabe (Fitz et al. 2014). Außerdem sammelte sich bei Niederschlägen das vom Mauerwerk abgeleitete Wasser im Boden unmittelbar vor den Steinmauern. Um diese Einflüsse auf die Auswertereien so gering wie möglich zu halten, befand sich zwischen Auswertereien und Steinmauern in beiden Weingartenterrassen mindestens eine weitere Reihe, welche zur Pufferung der Einwirkungen dienen sollte. Detaillierte Angaben zu den beiden Weingartenterrassen des Versuchsstandorts Loibenberg, wie die Anordnung der Auswertereien oder die Stockanzahl, können aus der Abbildung 5 und der Abbildung 6 entnommen werden.



**Abbildung 5:** Übersicht über die Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner (LB-GV).

Wie in Abbildung 5 ersichtlich ist, war in der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner die Tropfbewässerungsleitung in der mittleren Auswertereihe „GV1 und GV2 Auswerte“ – von Westen ausgehend – nach sieben Bagstalllängen abgekappt, um einen möglichst von den Bodenverhältnissen unbeeinflussten Vergleich zwischen beregneter und nicht-beregneter Auswertereihe ziehen zu können. Die beregnete Auswertereihe wurde als „GV1-Auswerte“ (sieben Bagstalllängen, 32 Stöcke), die nicht-beregnete als „GV2-Auswerte“ (vier Bagstalllängen, 21 Stöcke) bezeichnet.

In der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling hingegen befand sich die nicht-beregnete Parzelle in der etwas nördlich versetzten Terrasse, während in der, von einer Steinmauer getrennten, südlichen Terrasse die beregnete Parzelle angelegt war (Abbildung 6). Die nicht-beregnete Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling wurde als „RR2-Auswerte“, die beregnete als „RR1-Auswerte“ deklariert. Die nicht-beregnete Auswertereihe erstreckte sich über sechs Bagstalllängen (29 Stöcke), die beregnete Auswertereihe über drei Bagstalllängen (17 Stöcke).



**Abbildung 6:** Übersicht über die Weingartenterrasse LB-Rheinriesling (LB-RR).

Der Loibenberg ist durch seine Steilhänge mit den angelegten Terrassen aus Gföhler Gneis (Orthogneis) gekennzeichnet. Der Gföhler Gneis bildet dabei den geologischen Untergrund und ist durch seine kalkfreie, saure Zusammensetzung gekennzeichnet. Der schwach im alkalischen Bereich befindliche Oberboden mit seiner sehr geringen Lössauflage ist arm an Humus, sandig und karg (Fitz et al. 2014).

## 4.2. Messmethoden im Feld

Die Wetterstationen erfassen über Datenfernübertragung kontinuierlich die Witterungsdaten. Zusätzlich wurde im Feld zur Bestimmung von Trockenstressbedingungen der Pflanzenwasserstatus der Weinreben durch Wasserpotentialmessungen mit Hilfe der Scholanderdruckkammer und der Bodenwasserstatus durch Bodenwassersensoren ermittelt.

### 4.2.1. Wetterdatenaufzeichnungen

Die relevanten Wetterdaten wurden durch zwei bzw. drei Wetterstationen der Firma Adcon Telemetry automatisiert protokolliert. Dabei wurden sämtliche Daten durch einen Datenlogger erfasst, über eine GSM/GPRS Verbindung an einen zentralen Server gesendet und mit einer Anwendungssoftware verknüpft. Dadurch konnten die

Daten jederzeit online abgerufen werden. Die elektronischen Geräte der Wetterstationen wurden durch ein Solarpanel und einen Akkumulator mit Strom versorgt. Die Wetterdaten wurden in 2 m Höhe in 15-minütigen Intervallen erfasst.

Die Wetterdaten für den Versuchsstandort Sandgrube protokollierte die Adcon Telemetry Wetterstation Krems-Landersdorf, welche in etwa 2 km vom Standort entfernt stationiert war. Mit Hilfe dieser Wetterstation konnten Parameter, wie Lufttemperatur, Regen, Solarstrahlung, relative Luftfeuchtigkeit, Windrichtung und Windgeschwindigkeit bestimmt werden. Die Daten für den Versuchsstandort Loibenberg lieferte die Wetterstation Loiben-Loibenberg, deren Position sich in etwa 10 m unterhalb der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner befand. Da die Wetterstation erst im Laufe des Spätfrühlings installiert worden war und dadurch erst ab dem 10. Juni 2015 Wetterdaten aufzeichnete, wurden für die Auswertung ergänzend Daten der Wetterstation Loiben-Sätzen herangezogen. Diese befand sich in der Weinbauriede Sätzen, am Fuße des Loibenbergs. Beide Wetterstationen maßen Parameter wie Lufttemperatur, Regen und relative Luftfeuchtigkeit.

#### **4.2.2. Pflanzenwasserstatusmessungen**

Pflanzenwasserpotentiale, welche als Indikatoren zur Bestimmung des Versorgungszustands der Weinreben mit Wasser dienen, wurden mit Hilfe einer tragbaren Scholanderdruckkammer des Typs SK 16 gemessen (Abbildung 7).



**Abbildung 7:** SK 16 Scholanderdruckkammer.

Die SK 16, von „Wissenschaftliche Messgeräte Geißenheim“ entwickelt, ist komplett aus rostfreiem Edelstahl gefertigt und hat ein Gewicht von 9 kg, sowie eine Länge von 110 cm. Ein höhenverstellbarer Stellwinkel sorgt für einen sicheren Stand im Gelände. Der Messbereich liegt zwischen 0 und 16 bar (= 0 bis 1,6 MPa). Die Messkammer ist auf eine Höhe von 150 mm und einem Durchmesser von 65 mm ausgelegt, was auch die Bemessung von großen Weinblättern ermöglicht (MMM Mosler Tech Support 2016). Der Druck in der Druckkammer wird durch eine extern angeschlossene Druckluftgasflasche (Stickstoff) erzeugt.

Dabei wurden an den Weinreben der beiden Versuchsstandorte Sandgrube und Loibenberg sowohl das frühmorgendliche Blattwasserpotential als auch das mittägliche Stammwasserpotential gemessen. Als Messobjekte wurden gesunde, sonnenbeschienene Weinblätter – aus der Höhe der Traubenzone – von den Haupttrieben der Weinreben entnommen. Am Versuchsstandort Sandgrube wurden dabei pro Auswertereihe (Nr. 4 und Nr. 6) jeweils 16 Weinblätter untersucht und deren Mittelwerte berechnet, um die Einflüsse von starken statistischen Ausreißern zu eliminieren und somit repräsentative Ergebnisse für die gesamte Auswertereihe zu erhalten. Insgesamt wurden letztendlich am Versuchsstandort Sandgrube 32 Weinblätter pro Messtermin für die Messungen herangezogen. Am Versuchsstandort Loibenberg mit den Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling wurden insgesamt ebenfalls 32 Weinblätter – acht Weinblätter à zwei Auswertereien (nicht-beregnet und beregnet) pro Weingarten – bei jedem Messtermin untersucht.

Die Messungen mit der Scholanderdruckkammer wurden anhand eines einzelnen Blattes in folgenden Schritten chronologisch durchgeführt:

1. Vom entnommenen Blatt wurde das Blattstielende (circa 1 cm) mit einer scharfen Rasierklinge in einer durchgehenden Bewegung abgeschnitten.
2. Das abgeschnittene Blattstielende wurde in den Bajonettverschlussdeckel der Scholanderdruckkammer eingespannt (Abbildung 8).
3. Mit dem Verschlussdeckel wurde die Scholanderdruckkammer durch Dichtungsringe luftdicht abgeschlossen, was an der Einrastung des Deckels erkennbar war. Das Blatt befand sich nun in der verschlossenen Druckkammer, nur das Stielende ragte heraus.
4. Das Auslassventil der Druckkammer wurde geschlossen.
5. Das Einströmventil für den elementaren Stickstoff (durch eine extern angeschlossene Gasflasche) wurde langsam geöffnet, das Weinblatt somit unter Druck gesetzt.
6. Mit einer Lupe wurde das abgeschnittene Blattstielende beobachtet, beim ersten Austreten von Wasserbläschen wurde das Einströmventil wieder geschlossen.
7. Abschließend konnte der aufgewendete Druck (angegeben in bar) von der Druckanzeigevorrichtung der Scholanderdruckkammer abgelesen und ins Auswertungsdatenblatt eingetragen werden. Dieser entsprach dem Wasserpotential des Blattes bzw. des Stammes.



**Abbildung 8:** Einspannung des abgeschnittenen Blattstielendes in Bajonettverschluss der Scholanderdruckkammer (nach Gabler und Kühner 2014).

#### **4.2.2.1. Bestimmung des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials**

Die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials wurden an beiden Versuchsstandorten jeweils ein bis zwei Stunden vor Sonnenaufgang ausgeführt, um transpirationsunabhängige Messwerte zu erhalten. Die Weinblätter wurden nach der Abtrennung von den Reben in lichtundurchlässige Plastikbeutel gegeben, nur die Stiele der Weinblätter ragten hervor. Durch diese Einschlüsse und eine möglichst rasche Messdurchführung sollten in Anlehnung an Turner und Long (1980) Wasserverluste minimiert und somit negativere, verfälschte Wasserpotentialwerte verhindert werden. Im Spätsommer (September) stellte die auftretende Taunässe ein Problem dar, wodurch sich kleine Wassertropfen an die Weinblätter anhefteten und die Messwerte positiver erschienen ließen. Diese Messwerte wurden verworfen und auf Grundlage dessen darauf geachtet, die nachfolgenden Messungen nur bei trockenen Bedingungen durchzuführen.

Das frühmorgendliche Blattwasserpotential wurde innerhalb des festgelegten Untersuchungszeitraums, vom 01. Juni bis zum 30. September 2015, gemessen. An den Weinreben des Versuchsstandorts Sandgrube und der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner wurde mit den Messungen – zunächst in unregelmäßigen Abständen – ab der 24. Kalenderwoche (09. Juni bzw. 10. Juni 2015) begonnen. In der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling starteten die Messungen jedoch erst ab der 26. Kalenderwoche (25. Juni 2015). Ab der 29. und bis zur 38. Kalenderwoche wurden die Messungen jedoch in wöchentlichen Intervallen, an allen untersuchten Weinreben der beiden Versuchsstandorte fortgesetzt.

#### 4.2.2.2. Bestimmung des mittäglichen Stammwasserpotentials

Die Ermittlungen des mittäglichen Stammwasserpotentials wurden an den beiden Versuchsstandorten Sandgrube und Loibenberg jeweils um die Mittagszeit zwischen 10.30 und 13.00 Uhr durchgeführt. Bei der Auswahl der Weinblätter wurde hauptsächlich darauf geachtet, dass sich diese in der Stammnähe befanden. In Anlehnung an Begg und Turner (1970) wurden die ausgewählten Blätter vorerst nicht von der Rebe abgetrennt, sondern ein bis zwei Stunden vorher in lichtundurchlässigen Plastikbeutel gepackt. Nachdem diese Zeitspanne verstrichen war, wurden die verpackten Weinblätter für die Messung mit der Scholanderdruckkammer von der Rebe abgetrennt.

Der Untersuchungszeitraum wurde gleich wie bei den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialmessungen vom 01. Juni bis zum 30. September 2015 festgelegt. In beiden Versuchsstandorten wurden die Messungen des mittäglichen Stammwasserpotentials in der 29. Kalenderwoche gestartet (15. Juli bzw. 16. Juli 2015) und in zweiwöchentlichen Intervallen bis zur 37. Kalenderwoche kontinuierlich durchgeführt. Zusätzlich wurde eine Abschlussmessung in der 38. Kalenderwoche vollzogen. Dabei erfolgten die Messdurchführungen an den gleichen Tagen, wie jene des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials.

Da die vorherrschenden Witterungsbedingungen die Messwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale beeinflussen können, wurden sie mit dem Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft (VPD) in Zusammenhang gebracht. Das VPD wurde aus der gemessenen Tagesmitteltemperatur und der mittleren relativen Luftfeuchtigkeit des Tages errechnet. In Anlehnung an die Formel 3 ergab sich das VPD aus der Differenz zwischen dem Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) und dem aktuellen Dampfdruck ( $e$ ) nach Schulze et al. (2002).

Formel 3

$$VPD = e_s - e$$

In Anlehnung an Jones (1992) wurde der Sättigungsdampfdruck ( $e_s$ ) nach der Formel 4 berechnet.

Formel 4

$$e_s(T) = a * \exp (b * T / (c + T))$$

mit  $a = 613,75$ ;  $b = 17,502$ ;  $c = 240,97$ ;  $T$  in °C;  $e_s$  in Pa.

Aus der Berechnung der relativen Luftfeuchte (RL) nach Ehlers (1996) (Formel 5) konnte durch Umformung der aktuelle Dampfdruck (e) bestimmt werden, was in Formel 6 ersichtlich ist.

Formel 5

$$RL = (e/e_s) * 100$$

Formel 6

$$e = e_s * (RL/100)$$

### **4.2.3. Bodenwasserstatusmessungen**

Bodenwasserstatusmessungen wurden am Versuchsstandort Sandgrube durch Bodenwassersensoren realisiert. Bodenwassersensoren sind elektronische Messsysteme, wodurch die Möglichkeit der kontinuierlichen Datenerfassung geschaffen wird. Mithilfe von Bodenwassersensoren können Kennwerte für den Bodenwasserstatus, wie das Matrixpotential und der Wasseranteil, bestimmt werden. Sie dienen somit dem Monitoring des Bodenwassers (Kammerer und Loiskandl 2005). Jedoch wird für die Beurteilung von Anbauflächen mit großen punktuellen Unterschieden in der Bodenzusammensetzung eine große Anzahl von Sensoren benötigt, um repräsentative Aussagen für den gesamten Weingarten zu erzielen (Centeno et al. 2010). Nach Rupp (2009) ist für die Genauigkeit der erhaltenen Messwerte, die Qualität des Einbaus der Sonden und deren Einbauposition von entscheidender Bedeutung, denn in der Nähe des Stammes finden sich beispielsweise andere Feuchtigkeitsverhältnisse vor, als in der Mitte des Fahrgasse. Am Versuchsstandort Sandgrube kamen zum einen Watermark-Sensoren und zum anderen SM1-Sensoren zum Einsatz. Diese Bodenwassersensoren wurden vom 01. Juni bis 30. September 2015 ausgewertet, da für diesen Zeitraum Referenzwerte der Blatt- und Stammwasserpotentiale vorlagen.

#### **4.2.3.1. Watermark 200 SS**

Im Boden des Versuchsstandorts Sandgrube wurden im Jahr 2011 zehn Sonden des Watermark 200 SS © eingebaut. Der Watermark 200 SS ist ein „granular matrix sensor“ (GMS) der Firma Irrometer, Inc. und eine indirekte Methode, um das Bodenmatrixpotential zu ermitteln (Abbildung 9). Er besteht aus zwei nebeneinanderliegenden, korrosionsresistenten Elektroden, welche in ein hydrophiles, granulöses Matrixmaterial – bestehend aus gipsgetränkten Gewebeschichten – eingebettet sind. Die gipsgetränkten Gewebeschichten wirken als Puffer gegen die Effekte des in der Bodenlösung vorkommenden Salzgehalts. Das granulöse Matrixmaterial wird von einem gelochten Polyvinylchlorid- oder einem Edelstahlmantel umhüllt bzw. stabilisiert und in seiner Gesamtheit als Messblock bezeichnet. Nach der Einbringung des Messblocks in den Boden wird er vom

Bodenwasser durchfeuchtet. Durch den Stromanschluss an die zwei Elektroden wird eine schwache Spannung erzeugt und je nach vorliegendem Wassergehalt im Messblock dessen elektrischer Widerstand bestimmt. Dieser wird in cbar umgerechnet und dient als Maß für die Wasserspannung (Scanlon et al. 2002, Centeno et al. 2010, Irrrometer Company 2016). Dabei passt sich die Energie, mit der das Wasser im Messblock gehalten wird, ständig derjenigen Energie an, mit der das Wasser im umgebenden Boden gehalten wird. Die Matrixpotentiale der beiden Medien (Messblock und Boden) sind also gleich, die Wassergehalte, aufgrund der unterschiedlichen kapillaren Zusammensetzung der Medien, jedoch vollkommen verschieden (Kastanek 1996).



**Abbildung 9:** Watermark-Sensor 200 SS (nach Irrrometer Company 2016).

Watermark-Sensoren sind in der Regel einfach zu installieren bzw. anzuwenden und erfordern über einen minimalen Wartungsaufwand (Scanlon et al. 2002). Laut Herstellerangaben arbeiten sie in einem Messbereich von 0 bis  $-200$  cbar (=kPa) (Irrrometer Company 2016), am Versuchsstandort Sandgrube wurden jedoch Werte von bis zu  $-255$  kPa registriert. Die gewonnenen Daten sind einfach zu interpretieren. Eine weitere positive Eigenschaft ist, dass die Sensoren nicht frostempfindlich sind und dadurch ganzjährig im Boden verweilen können (Pertoll 2008). Grundsätzlich ist die Bestimmung eines akkuraten Bodenmatrixpotentials innerhalb der Rhizosphäre schwierig zu realisieren, da sich das Matrixpotential täglich zusammen mit den Wurzel- und Pflanzenwasserpotentialen verändert (Nadler und Heuer 1997). Außerdem reagieren Watermark-Sensoren im Vergleich zu anderen Sensoren konstruktionsbedingt – aufgrund des granulösen Matrixmaterials – etwas träge auf Bodenwasserstatusänderungen. Sie benötigen mehr Zeit, um sich auf einen stabilen Endwert einzustellen. Zusätzlich beeinflusst die Bodentemperatur die

Messgenauigkeit negativ. Die Haltbarkeit beschränkt sich auf drei bis fünf Jahre (Pertoll 2008).

Die am Versuchsstandort Sandgrube installierten Watermark 200 SS werden nachfolgend als WM1 bis WM10 bezeichnet. Die detaillierte Anordnung der Sensoren ist in Abbildung 10 ersichtlich. Dabei handelt es sich lediglich um einen Ausschnitt des Versuchsstandorts Sandgrube, wobei nur die Reihen der Sorte Grüner Veltliner dargestellt sind. Der WM2 befand sich in der Auswertereihe Nr. 4 im Unterstockbereich, während in der unmittelbaren Nähe der WM1 in der Fahrgasse a und der WM3 in der Fahrgasse b positioniert war. Circa 15 m weiter östlich befand sich in derselben Fahrgasse a der WM4 und in der Fahrgasse b der WM5. In der Auswertereihe Nr. 6 war der WM7 im Unterstockbereich installiert, wobei dieser von dem WM6 in der Fahrgasse a und dem WM8 in der Fahrgasse b umgeben wurde. Wiederum circa 15 m weiter östlich befand sich in derselben Fahrgasse a der WM9 und in der Fahrgasse b der WM10.

Versuchsstandort Sandgrube (Sensorenanordnung)												
Reihe	Sorte	Bemerkung	Gstnr. 2737/2 Norden Reihenbreite 300cm Stocklänge 100cm									
			1									
2												
3												
4	Grüner Veltliner 0,3657	Fahrgasse a										
		Auswertereihe										
5												
6	Grüner Veltliner 0,3657	Fahrgasse a										
		Auswertereihe										
7												
8												
9												
10												
Süden												

**Abbildung 10:** Übersicht über die Anordnung der Sensoren am Versuchsstandort Sandgrube (verändert nach Gabler und Kühner 2013).

Die Watermark-Sensoren wurden nach der Fertigung vom Hersteller auf deren Funktionsfähigkeit getestet, jedoch nicht auf den Standort kalibriert. Vor dem Einschlämmen in den Boden wurden die Sonden der Sensoren in entionisiertem Wasser gesättigt. Die zehn Sensoren maßen jeweils in 50, 100 und 150 cm Bodentiefe. Außerdem war in 50 cm Tiefe ein Temperatursensor installiert, welcher bei der Auswertung jedoch nicht berücksichtigt wurde. Die Daten wurden allerdings nicht kontinuierlich aufgezeichnet, sondern nur falls der Sensor Wertänderungen von 2 kPa detektierte. Somit entstanden auch Datenlücken von einigen Tagen bzw.

Wochen. Die Aufzeichnungen erfolgten über einen Datalogger (Datensammler), wurden über Funk übertragen und konnten schlussendlich online über den Computer abgerufen werden.

#### **4.2.3.2. SM1-Sensor**

Im Boden des Versuchsstandorts Sandgrube wurden im Jahr 2014 zwei SM1-Sensoren der Firma Adcon Telemetry eingebracht. Der SM1 ist mit der kapazitiven Messmethode ausgestattet. Es handelt sich dabei um eine indirekte Messmethode, wodurch der Wasseranteil erst über die gemessene dimensionslose Dielektrizitätszahl des Bodens ermittelt werden kann. Somit wurden von den SM1-Sensoren zunächst dimensionslose SFU-Werte (frequency scaled units) innerhalb eines Messbereichs von vermutlich 0 bis 100 aufgezeichnet. Diese mussten erst über eine entsprechende Kalibrierungsfunktion in Wasseranteile umgerechnet werden. Die SM1-Sensoren messen außerdem die Bodentemperatur, welche aber in weiterer Folge nicht berücksichtigt wurde. Der Sensor ist nach der Schutzklasse IP-67 abgedichtet, wodurch auch kurzzeitige Überflutungen und Staubeinwirkungen dem System nicht schaden. Das Sensorrohr hat einen Durchmesser von 32 mm und besteht aus ultraviolettbeständigem PVC-Material (Abbildung 11). Über das SDI-12-Interfaceboard des Sensors werden die Daten an den Datalogger übertragen und dann per Funk an den Server versandt. Die Daten können jederzeit online über die Softwareprogramme „Adcon LiveData“ oder detaillierter über „Adcon addVANTAGE Pro 6.5“ abgerufen werden (AdconTelemetry 2014, Adcon Telemetry 2016).



**Abbildung 11:** SM1-Sensor (nach Adcon Telemetry 2016).

Ein wesentlicher Vorteil der SM1-Sensoren – in Analogie zu vergleichbaren Produkten – ist die große Eindringtiefe des Messsignals in den umgebenden Boden. Dadurch wird die Aussagekraft der erhaltenen Daten verbessert, da ein größerer

Bodenradius (10 cm rund um das Zugangsrohr) erfasst wird (Adcon Telemetry 2016). Grundsätzlich kann für die Interpretation der Daten von den Sensoren, welche indirekt den Wasseranteil des Bodens ermitteln, die Tiefenwurzelverteilung der Weinreben ein Problem darstellen. So kann beispielsweise ein SM1-Sensor sehr geringe SFU-Werte bis in eine Tiefe von 150 cm detektieren, was unter Umständen, in Abhängigkeit vom Bodenmatrixpotential, Trockenstressbedingen implizieren kann. Dennoch sind die Wurzeln der Weinrebe in der Lage, bei limitiertem Wasserangebot in den oberen Bodenhorizonten, das Wasser in tieferen Bodenzonen zu erreichen und somit die Rebe mit genügend Wasser zu versorgen (van Leeuwen et al. 2009).

Um die SM1-Sensoren des Versuchsstandorts Sandgrube voneinander unterscheiden zu können, werden sie nachfolgend als SM1-BF1 und SM1-BF2 bezeichnet. Die detaillierte Anordnung der Sensoren kann in Abbildung 10 betrachtet werden. Dabei befand sich der SM1-BF1 in der Auswertereihe Nr. 4 circa 2 m vom WM2 entfernt, während der SM1-BF2 in der Auswertereihe Nr. 6 circa 2 m vom WM7 installiert war. Die SM1-Sensoren wurden – im Gegensatz zu den Watermark-Sensoren – nicht in den Boden eingeschlämmt, sondern in das vorgebohrte Loch eingesetzt. Das Bohrloch war dabei exakt an den Rohrdurchmesser des SM1 angepasst, was Lufteinschlüsse verhinderte. Die SM1-Sensoren wurden nicht auf den Standort kalibriert. Die zwei Sensoren ermittelten alle 10 cm Tiefe kontinuierlich SFU-Werte (alle 15 Minuten) bis in eine Bodentiefe von 150 cm. Allerdings konnten beim SM1-BF2 innerhalb des Versuchszeitraums aufgrund eines Defekts der oberen Messplatine (Sensorboard) die Daten in 10, 20 und 30 cm Tiefe nicht ermittelt werden.

### **4.3. Bodenphysikalische Laboranalysen**

An den Versuchsstandorten Sandgrube und Loibenberg wurden Bodenproben am 22. Oktober 2015 und 27. Oktober 2015 für weitere bodenphysikalische Analysen entnommen. Je nach Untersuchungsziel wurden dabei für jede Entnahmestelle einmalig ungestörte bzw. gestörte Bodenproben gewonnen.

#### **4.3.1. Bodenprobenentnahme**

Ungestörte Bodenproben wurden mithilfe von Stechzylindern entnommen. Stechzylinder sind ringförmige Zylinder aus Edelstahl, welche aus nahtlosen Rohren bestehen und an der Außen- und Innenseite glatt verarbeitet sind. Um den Eindringungswiderstand so gering wie möglich zu halten, verfügt die untere Aufsatzfläche des Stechzylinders über eine zugeschnittene, scharfe Form (Eijkelkamp Soil & Water 2016). Jeder Stechzylinder war mit einer eingravierten Nummer versehen, um die unterschiedlichen Bodenproben nach der Entnahme voneinander unterscheiden zu können. Außerdem besaßen die Stechzylinder kein einheitliches Standardvolumen, sodass die Nummerierung bei der Identifizierung der einzelnen Stechzylinder dabei half, die Zuordnung der im Vorfeld bekannten Volumina zu ermöglichen. Mit Bohrstöcken wurden hingegen die gestörten Bodenproben entnommen, was eine schnelle Probenentnahme ermöglichte. Dadurch

waren jedoch die Analysemöglichkeiten im bodenphysikalischen Labor eingeschränkt.

Am Versuchsstandort Sandgrube wurden unter anderen zwei Probeentnahmestellen (Bodenprofilgruben) in der unmittelbaren Nähe der beiden SM1-Sensoren in der Auswertereihe Nr. 4 (SM1-BF1) und Nr. 6 (SM1-BF2) festgelegt. Diese wurden so ausgewählt, dass die Sensoren bei der Probenentnahme nicht beschädigt oder deren Messungen negativ beeinflusst werden konnten. Dabei wurden ungestörte Stechzylinderproben gewonnen. Der Entnahmeprozess erfolgte für jede einzelne Bodenprofilgrube nach folgendem Schema:

1. Mit Hilfe von Schaufeln und Flachspitzhacken wurde eine frische Bodenprofilgrube ausgehoben, um Zugang zu einer Stelle in der unmittelbaren Nähe des Sensors (ca. 20 bis 30 cm Abstand) zu erhalten (Abbildung 12, linke Seite).
2. Bei jeder im Vorfeld bestimmten Entnahmetiefe (von oben nach unten) war darauf zu achten, eine gerade, unbeeinflusste Ebene zu erhalten, an welcher die Proben gewonnen werden konnten.
3. Pro Entnahmetiefe wurden die Stechzylinder mit Hilfe einer Schlaghaube und einem Kunststoffhammer ins Erdreich getrieben, bis die Geländeoberfläche und die Stechzylinderoberkante eine gerade Ebene bildeten (Abbildung 12, rechte Seite).



**Abbildung 12:** Bodenprofilgrube (linke Seite) und Einbringen der Stechzylinder (rechte Seite).

4. Mit Messern und Spaten wurden die Stechzylinder wieder vorsichtig ausgegraben.

5. Die Stechringflächen wurden mit einem scharfen Messer glatt geschnitten. Dabei war darauf zu achten, dass es zu keiner Verschmierung der Poren kam.
6. Die im Stechzylinder befindlichen Proben wurden mit einem Plastikdeckel an jeder Seite verschlossen. Dadurch sollte der Verdunstungsverlust bis zum Transport ins Labor so gering wie möglich gehalten werden.

Da ab einer Tiefe von 70 cm der Boden sehr trocken war und zu bröckeln begann, wurde die Probeentnahme in dieser Tiefe abgebrochen. Insgesamt wurden Bodenproben in sechs Tiefen (10, 20, 30, 40, 50 und 60 cm) mit jeweils vier Zylindern pro Tiefe entnommen (24 Proben je Bodenprofilgrube). Außerdem wurden aus den frischen Bodenprofilgruben (in der Auswertereihe Nr. 4 und Nr. 6), wiederum in den sechs Tiefen, gestörte Proben mit einer Schaufel entnommen. Zusätzlich wurden vier Probeentnahmestellen, in der unmittelbaren Nähe der Watermark-Sensoren, ausgewählt. Da die Watermark-Sensoren gebündelt in vier Gruppen im Feld installiert wurden, stellte dies die beste Lösung dar. Dort wurden gestörte Proben mit dem Bohrstock gewonnen. Je Probeentnahmestelle wurde dabei der Bohrstock sechs Mal im Umkreis von 1 m mit Hilfe eines Kunststoffhammers in den Boden getrieben und die daraus erhaltenen Bodenproben zu einer Mischprobe zusammengefasst. In Anlehnung an die Stechzylinderprobeentnahmen wurden auch hier Bodenproben in sechs Tiefen entnommen (10, 20, 30, 40, 50 und 60 cm) und voneinander getrennt analysiert. Obendrein wurden nach derselben Vorgehensweise Bodenproben in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF1 und SM1-BF2 gewonnen.

Am Versuchsstandort Loibenberg wurden gestörte Bodenproben mithilfe des Bohrstocks gewonnen. Dabei wurden – analog zum Versuchsstandort Sandgrube – Proben in sechs Tiefen entnommen (10, 20, 30, 40, 50 und 60 cm) und voneinander getrennt ausgewertet. Je Weingartenterrasse (LB-GV bzw. LB-RR) wurde die Entnahme bis zu sechs Mal an unterschiedlichen Messpunkten wiederholt – um eine Mischprobe pro Weingartenterrasse zu erhalten – wobei jeweils drei Proben der beregneten (GV1-Auswerte bzw. RR1-Auswerte) und drei der nicht-beregneten Auswertereihe (GV2-Auswerte bzw. RR2-Auswerte) entnommen wurden.

### **4.3.2. Wassergehalt und Trockendichte**

#### **Wasseranteil**

Mit Hilfe der Trocknung einer feuchten Stechzylinderbodenprobe, im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz, konnte deren Wasseranteil bestimmt werden. Dafür war das Gesamtvolumen der Bodenprobe erforderlich, welches durch das im Vorfeld bekannte Stechzylindervolumen vorgegeben war. Aus der Differenz der Masse der feuchten Probe zu jener der trockenen Probe ergab sich die Masse des verdunsteten Bodenwassers. Dieser Wert wurde durch die Dichte des Wassers dividiert, sodass daraus das Volumen des Wassers resultierte.

Darauf aufbauend ließ sich der Wasseranteil anhand der Formel 7 folgendermaßen definieren (ÖNORM L 1062 2003).

Formel 7

$$n_w = \frac{V_w}{V}$$

$n_w$  (cm<sup>3</sup>\*cm<sup>-3</sup>) = Wasseranteil in der Bodenprobe

$V_w$  (cm<sup>3</sup>) = Wasservolumen in der Bodenprobe

$V$  (cm<sup>3</sup>) = Gesamtvolumen der Bodenprobe (Stechzylinder)

Der ermittelte Wasseranteil konnte dazu verwendet werden, um in Verbindung mit dem Matrixpotential (Druckplattenapparat) die Retentionsfunktion des Bodens zu bestimmen.

### **Massenwassergehalt**

Der Massenwassergehalt wurde, in Anlehnung an die Ermittlung des Wasseranteils, anhand der Trocknung einer feuchten, gestörten Bodenprobe im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz bestimmt. Das verdunstete Bodenwasser wurde wiederum aus der Differenz der feuchten Probenmasse zu jener der trockenen Probenmasse identifiziert. Dabei wurde im Gegensatz zur Ermittlung des Wasseranteils das Bodenvolumen nicht benötigt, was den Vorteil von weniger aufwendigeren Bodenprobenentnahmen mit sich brachte. Der Massenwassergehalt wurde nach ÖNORM L 1062 (2003) definiert und in Gewichtsprozent angegeben (Formel 8).

Formel 8

$$w = \frac{m_w}{m_s}$$

$w$  (g\*g<sup>-1</sup>) = Massenwassergehalt der Bodenprobe

$m_w$  (g) = Wassermasse der Bodenprobe

$m_s$  (g) = Feststoffmasse der Bodenprobe

Mit der Kenntnis der Trockendichte und der Dichte des Wassers konnte aus dem Massenwassergehalt der Wasseranteil berechnet werden.

## Trockendichte

Die Trockendichte ( $\rho_d$ ) wurde durch das Verhältnis von ofentrockenem Gewicht (Feststoffmasse der ungestörten Bodenprobe,  $m_s$ ) bezogen auf das Stechzylindervolumen ( $V$ ) bestimmt (Formel 9).

Formel 9

$$\rho_d = \frac{m_s}{V}$$

Zur Bestimmung des ofentrockenen Gewichts wurde die feuchte Stechzylinderbodenprobe im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz getrocknet und deren Gewicht bestimmt. Das Steckzylindervolumen war bereits im Vorfeld bekannt.

### **4.3.3. Feststoffdichte**

Durch die Anwendung des Pyknometers bestand die Möglichkeit, die Feststoffdichte von luftgetrockneten, gestörten Feinbodenproben zu bestimmen. Das Pyknometer besteht aus einem Glaskolben und einem Glasstoppel, wobei Letzterer eine Kapillare enthält. Das Volumen des trockenen Pyknometers war bereits im Vorfeld bekannt und genau justiert. Im Zuge der Masterarbeit geschah die Ermittlung aller Feststoffdichten auf Basis der folgenden Messdurchführung. Anfangs wurde das Gewicht des Pyknometers (inkl. Glasstoppel) mithilfe einer Präzisionswaage auf 1 mg genau bestimmt. Nachfolgend wurde das Pyknometer bis etwa zu einem Drittel mit luftgetrocknetem Feinboden gefüllt, die Gewichtbestimmung (inkl. Glasstoppel) mit der Präzisionswaage wiederholt und folglich das Pyknometer bis zur Hälfte mit entlüftetem Wasser gefüllt. Anschließend wurde die Suspension mit einem Bunsenbrenner aufgeköcht und dadurch die darin noch enthaltene Luft, sowie die im Wasser gelösten Gase ausgetrieben (Abbildung 13). Darauf folgten die Auffüllung des Pyknometers mit entlüftetem Wasser und die weitere Entlüftung der Suspension im Exsikkator über Nacht. Am nächsten Tag wurde das Pyknometer bzw. die Kapillare im Glasstoppel wiederum mit entlüftetem Wasser gefüllt und abschließend dessen Gewicht und Temperatur bestimmt.



**Abbildung 13:** Aufkochen der Suspension im Pyknometer mithilfe des Bunsenbrenners.

Für die Auswertung der Feststoffdichte der Bodenprobe war es außerdem von Bedeutung, den Massenwassergehalt der luftgetrockneten Probe separat zu ermitteln. Die Feststoffdichte wurde durch die Formel 10 nach ÖNORM L 1068 (2005) determiniert.

Formel 10

$$\rho_s = \frac{m_s}{V_s}$$

$\rho_s$  (g\*cm<sup>-3</sup>) = Feststoffdichte der Bodenprobe

$m_s$  (g) = Feststoffmasse der Bodenprobe

$V_s$  (cm<sup>3</sup>) = Feststoffvolumen der Bodenprobe

Die erhaltenen Feststoffdichten dienen vor allem der Ermittlung des Porenanteils, zusätzlich konnte die Trockendichte mit den ermittelten Korngrößen verglichen werden und deren Plausibilität überprüft werden.

#### 4.3.4. Porenanteil

Der berechnete Porenanteil diente zur Einschätzung der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Je höher der Porenanteil, desto höher ist die Wasserspeicherfähigkeit. Der Porenanteil gibt das Verhältnis des Porenvolumens bezogen auf das Gesamtvolumen wieder. Indirekt wurde er, in Anlehnung an die Formel 11, aus der zuvor ermittelten Feststoffdichte bzw. Trockendichte bestimmt.

Formel 11

$$n_p = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

Der Porenanteil  $n_p$  ( $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ ) wird nachfolgend in Prozent ( $n_p \cdot 100$ ) angegeben.

#### 4.3.5. Korngrößen

Im Hinblick auf die Korngrößenbestimmung konnten die mineralischen Bestandteile des Bodens in Grobboden ( $d \geq 2 \text{ mm}$ ) und Feinboden ( $d < 2 \text{ mm}$ ) differenziert werden, wobei der Feinboden in weiterer Folge in die Fraktionen Sand, Schluff und Ton unterteilt wurde (Tabelle 2). Die Korngrößenklassen des Feinbodens werden auch als Bodentextur bezeichnet.

**Tabelle 2:** Korngrößenklassen des Feinbodens (verändert nach ÖNORM L 1050 2004).

Fraktion	Kurzzeichen	Äquivalentdurchmesser (mm)
Sand	S	2 bis 0,063
Schluff	U	0,063 bis 0,002
Ton	T	< 0,002

Aufgrund des Massenanteils an organischer Substanz von kleiner als 5 % an der Gesamtprobe, was bei den untersuchten Proben nach visueller Beobachtung der Fall war, konnten die folgenden Verfahren ohne Vorbehandlung mit  $\text{H}_2\text{O}_2$  angewandt werden.

#### Grobbodenanteil

Im Vorfeld der Trockensiebung wurden jene Aggregate mit einem Durchmesser  $\geq 2 \text{ mm}$  durch einen Mörser mechanisch zerstört und der Feinboden von der restlichen Probemenge abgetrennt. Der übriggebliebene luftgetrocknete Grobboden wurde daran anschließend gewogen und auf den Grobboden-Siebsatz aufgebracht. Der Siebsatz enthielt je nach Größtkorn ( $d_{\text{max}}$ ) folgende Siebe: 16 mm – 11,2 mm – 8 mm – 5,6 mm – 4 mm – 2 mm. Die Trockensiebung wurde händisch so lange durchgeführt, bis sich die Korngrößenverteilung nicht mehr veränderte. Abschließend

wurden die einzelnen Siebrückstände gewogen und deren Massenanteile am Gesamtboden berechnet. Zusätzlich wurde der Anteil des Grobbodens an der Gesamtprobe berechnet und durch dessen Kenntnis konnte in weiterer Folge der Feinbodenanteil berechnet werden.

Die Unterteilung des Grobbodens in einzelne Korngrößen und die Berechnung des Grobboden- bzw. Feinbodenanteils an der Gesamtprobe wurde nur an den gestörten Mischproben des Versuchsstandorts Loibenberg durchgeführt, da die Mischproben am Versuchsstandort Sandgrube einen Grobbodenanteil < 10 % enthielten und daher aussagekräftige Ergebnisse nicht zu erwarten waren.

### **Schluff –und Tonanteil**

Das Pipettierverfahren nach Kubiena diente der Ermittlung des Schluff- bzw. Tonanteils der Mischproben, wobei nur der Feinboden der Probemenge für die Analyse verwendet wurde. Beim Versuchsstandort Loibenberg, wo eine Grobbodenanalyse erfolgte, wurde der Siebdurchgang 2 mm verwendet, während bei Mischproben des Versuchsstandorts Sandgrube (Grobbodenanteil < 10 %) der Feinboden durch eine Trockensiebung mit einem 2 mm Sieb gewonnen wurde.

Vor dem Pipettierverfahren nach Kubiena wurde in eine Kunststoffflasche 20 g Feinboden mit einer Präzisionswaage eingewogen und 50 ml Dispergiermittellösung zugesetzt. Nach einer Ruhephase von mindestens 8 Stunden konnten sich die Bodenaggregate auflösen bzw. eine Verklumpung der Bodenteilchen verhindert werden und in weiterer Folge wurden 200 ml entionisiertes Wasser zugegeben. Anschließend wurde die Kunststoffflasche verschlossen, in einem Überkopfschüttler eingespannt und mindestens 6 Stunden lang geschüttelt, um eine möglichst gute Verteilung der Bodenpartikel zu erreichen. Die dispergierte Bodenprobe wurde nach diesem Durchmischungsprozedere in ein Sedimentgefäß gegeben, wobei darauf zu achten war, dass anhaftende Bodenpartikel mithilfe einer Spritzflasche nicht zurückblieben. Das Sedimentgefäß wurde anschließend bis zur 1 l Markierung mit entionisiertem Wasser aufgefüllt. Bevor das automatisierte Pipettierverfahren gestartet wurde, mussten noch das Leergewicht der vier Abdampfschalen bestimmt (für die Korngrößen 0,063 mm – 0,02 mm – 0,0063 mm – 0,002 mm) und die Temperatur in der Pipettierwanne mittels Zufuhr von temperiertem Frischwasser auf 21°C ( $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$ ) eingestellt werden. Abschließend wurde das Sedimentgefäß in die Pipettierwanne bzw. die Abdampfschalen in die vorgesehenen Positionen gegeben und das automatisierte Pipettierverfahren konnte gestartet werden (Abbildung 14).



**Abbildung 14:** Automatisierte Pipettieranlage des IHLW.

Beim Pipettierverfahren wurde auf indirektem Weg mittels Absetzgeschwindigkeit der Massenanteil je Korndurchmesser ermittelt. Nach Abschluss des automatisierten Pipettierverfahrens beinhaltete der letzte Schritt das Trocknen der Abdampfschalen und der darin enthaltenen wässrigen Bodenprobe im Trockenschrank bei 105°C bis zur Massenkonstanz und dem abschließenden Abwägen der Abdampfschalen inkl. der Bodenprobe. Von den dabei erhaltenen Bodenmassen musste noch die Dispergiermittelmasse (0,0266 g pro Abdampfschale) abgezogen werden.

### **Sandanteil**

Der Inhalt des Sedimentgefäßes aus dem Pipettierverfahren nach Kubiena wurde daran anschließend für die Nasssiegung verwendet. Mithilfe der Nasssiegung konnten der Sandanteil und dessen unterteilte Sandfraktionen bestimmt werden. Dabei wurde der Sedimentgefäßinhalt in einen Siebturm geleert, der sich auf einem Rüttelgerät befand. Der komplette Siebsatz des Siebturms bestand von oben nach unten aus 2,0 mm – 1,0 mm – 0,63 mm – 0,20 mm – 0,125 mm – 0,063 mm Sieben. Anschließend wurde der Siebturm mit einem Wasserstrahl manuell durchgeschwemmt, um die Fraktion  $d < 0,063$  mm über den Ablauf abzuscheiden. Dadurch konnte das Siebgut vorab von Feinpartikeln gesäubert werden. Daraufhin wurde der gläserne Spülkopf aufgesetzt und der Siebturm circa 10 min lang mit Wasser unter Rütteln gespült (Abbildung 15).



**Abbildung 15:** Nasssiebapparatur.

Dabei blieben alle Bodenpartikel, deren kleinster Durchmesser größer als die Maschenweite war, auf dem Sieb liegen, alle anderen fielen hindurch und wurden vom nächsten Sieb aufgefangen etc., wobei Bodenpartikel  $d < 0,063$  mm wiederum verworfen wurden. Der Inhalt jedes Siebes wurde im Anschluss daran mittels einer Spritzflasche in eine zuvor abgewogene Abdampfschale gespült und in weiterer Folge im Trockenschrank bei  $105^{\circ}\text{C}$  bis zur Massenkonzanz getrocknet. Nach der Trocknung wurden die Abdampfschalen inkl. der Bodenprobe abgewogen. Da die Feinbodenprobe auch Grobkörner ( $d \geq 2,0$  mm) enthielt, wurde die Fraktion  $d \geq 2,0$  mm vom eingewogenen Gewicht abgezogen bzw. korrigiert.

#### **4.3.6. Retentionsfunktion**

Der Druckplattenapparat – auch Drucktopf genannt – ist eine Standardmethode nach Richards und Fireman (1943), um die Retentionsfunktion einer Bodenprobe bei bekanntem Matrixpotential zu ermitteln. Aus der Retentionsfunktion konnten als Referenz anzusehende wassergehaltsabhängige Bodenkennwerte, wie die FK oder der PWP, ermittelt werden. Generell bestand außerdem die Möglichkeit über die Retentionsfunktion die kontinuierlich aufgezeichneten Daten der SM1-Sensoren auf deren Plausibilität/Präzision zu untersuchen. Dafür mussten die Daten der SM1-Sensoren jedoch erst durch eine Kalibrierungsfunktion in Wasseranteile umgerechnet werden, was jedoch nicht unternommen wurde, da eine entsprechende

Kalibrierungsfunktion vom Hersteller nicht bereitgestellt werden konnte. Der Versuch wird in der ÖNORM L 1063 (2006) geregelt. Der Aufbau eines Druckplattenapparats und dessen Bestandteile können in der Abbildung 16 betrachtet werden.



**Abbildung 16:** Druckplattenapparat.

Die nachfolgend beschriebene Vorgangsweise bei der Versuchsdurchführung für eine Stechzylinderprobe wurde bei allen Stechzylinderproben nach demselben Schema durchgeführt. Vor der Versuchsdurchführung wurde die ungestörte Stechzylinderprobe mit entlüftetem, entionisiertem Wasser zwei bis drei Tage aufgesättigt und deren Sättigungsgewicht mit einer Waage bestimmt. Nachdem die poröse Keramikplatte simultan mit entlüftetem, entionisiertem Wasser aufgesättigt wurde (Dauer ebenfalls circa drei Tage), wurde die wassergesättigte Stechzylinderprobe auf die Keramikplatte aufgesetzt. Dabei musste darauf geachtet werden, dass zwischen den beiden ein guter Kontakt herrschte. Dieser gute Kontakt konnte durch das Aufbringen eines dünnen, entlüfteten Wasserfilms auf die Keramikplatte hergestellt werden. Zusammen mit der Keramikplatte wurde die gesättigte Stechzylinderprobe in weiterer Folge vorsichtig in den Drucktopf eingebracht und luftdicht verschlossen. Über einem dünnen Silikonschlauch wurde die Keramikplatte mit der Durchführung des Drucktopfs verbunden und durch einen weiteren Silikonschlauch eine Verbindung zu einem Messbecher hergestellt, welcher als Kontrolle diente (Kontrollgefäß). Anschließend wurde ein gewünschter Überdruck über einen Druckminderer bzw. Manometer an den Drucktopf angelegt und so ein (negatives) Matrixpotential erzeugt. Nach Erreichen der gewünschten Druckstufe wurde der Druck über einen gewissen Zeitraum konstant gehalten. Durch den Druckunterschied zwischen dem angelegten Druck im Inneren des Drucktopfs und dem Außendruck (Umgebungsdruck) wurde das Porenwasser aus der Stechzylinderprobe über die Keramikplatte bzw. über dem Drucktopf verdrängt, sowie schlussendlich im Kontrollgefäß gesammelt. Über das Kontrollgefäß konnte

durch mehrmaliges Wiegen beobachtet werden bis zu welchem Zeitpunkt der angelegte Druck kein Wasser mehr aus den Poren verdrängte, indem keine Massendifferenz mehr auftrat. Ab diesem Zeitpunkt wurde die angelegte Druckstufe beendet und der angelegte Druck im Inneren des Drucktopfs entsprach somit dem Matrixpotential. Je nach Druckstufe konnte dies bis zu einigen Wochen dauern (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3:** Druckstufen und deren abgeschätzte Dauer.

Druck (bar)	Dauer (Woche/Wochen)
0,1	1
0,2	1
0,3	1
0,5	2
1,0	3
3,0	3
15,0	4

Nach Beendigung jeder Druckstufe wurde die Stechzylinderprobe gewogen und so konnte die Masse an Wasser, welche aus der Bodenprobe gepresst wurde – verglichen mit dem Sättigungsgewicht vor Versuchsbeginn – bestimmt werden. Insgesamt wurden sieben Druckstufen (0,1 bar – 0,2 bar – 0,3 bar – 0,5 bar – 1 bar – 3 bar – 15 bar) angelegt. Für die Druckstufen 0 bis 3 bar und 3,01 bis 15 bar wurden unterschiedlich poröse Keramikplatten eingesetzt.

## **4.4. Reifeparameteranalysen und Ertragsmessungen**

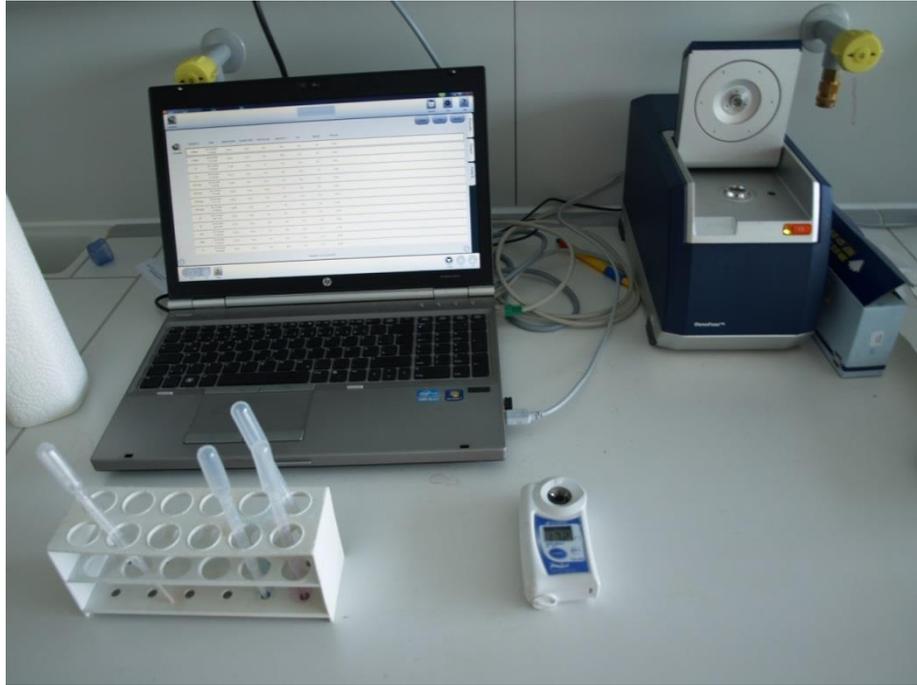
Im Laufe der Reifepériode wurden im Zuge der Laboranalysen Reifeparameter, wie das Mostgewicht (Klosterneuburger Mostwaage), der titrierbare Gesamtsäuregehalt und der hefeverfügbare Stickstoffgehalt der Beeren ermittelt. Außerdem wurde am Tag der Ernte der Ertrag gemessen.

### **4.4.1. Reifeprobentnahme**

Für die Laboranalysen zur Bestimmung der Reifeparameter wurden am Versuchsstandort Loibenberg in den beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling jeweils 100 Beeren der berechneten und 100 Beeren der nicht-berechneten Auswertereihe entnommen. Um möglichst repräsentative Ergebnisse für die jeweilige Auswertereihe zu erhalten, wurden von diesen 100 Beeren jeweils 50 Beeren der sonnenexponierten Seite der Auswertereihe, sowie 50 Beeren der nicht-sonnenexponierten Seite der Auswertereihe entnommen. Außerdem wurden die Beeren so ausgewählt, dass sie randomisiert entweder der Traubenschulter, der Traubenmitte oder der Traubenspitze entstammen. Zusätzlich war darauf zu achten, dass die Reifeprobentnahme an niederschlagsfreien Tagen stattfand, um die erhaltenen Werte durch das Niederschlagswasser nicht zu verfälschen. Die Proben wurden an fünf Tagen während der Reifepériode (01. September, 08. September, 15. September, 30. September 2015) und zusätzlich am Tag der Ernte (05. Oktober 2015) entnommen.

### **4.4.2. Reifeparameter**

Die Auswertung der Reifeparameter (Mostgewicht, titrierbarer Säuregehalt und hefeverfügbarer Stickstoffgehalt) erfolgte automatisiert anhand eines OenoFoss™ Gerätes der Firma FOSS GmbH und zwar an genau denselben Tagen, an denen die Reifeprobentnahmen auch entnommen wurden. Dafür wurden zuerst die entnommenen Beerenproben mithilfe einer Kartoffelpresse zu Traubenmost verarbeitet. Anschließend passierten die Traubenmostproben einen Papierfilter, wodurch Trübstoffe und Fruchtfleischreststücke abgetrennt werden konnten. Dies war nötig, um eine ordnungsgemäße Messdurchführung zu garantieren. Mithilfe einer Laborpipette wurde in weiterer Folge ein Tropfen des Traubenmostes dem OenoFoss Gerät zugefügt. Es kamen dabei keine Chemikalien zum Einsatz. Anschließend analysierte das Gerät die Reifeparameter anhand der FTIR-Technologie (Fourier Transform Infrarot). Die analysierten Parameter konnten über eine Software am Computer abgerufen werden (FOSS 2016). Der KMW-Gehalt wurde zusätzlich mit einem digitalen Handrefraktometer des Typs PAL-83S der Firma ATAGO® ermittelt, weil dieses Gerät erfahrungsgemäß höhere Genauigkeiten lieferte (Abbildung 17).



**Abbildung 17:** OenoFoss Gerät (rechts im Hintergrund) zur Bestimmung des Mostgewichts, des titrierbaren Säuregehalts und des hefeverfügbaren Stickstoffgehalts sowie digitales Handrefraktometers (rechts im Vordergrund) zur zusätzlichen Bestimmung des Mostgewichts.

#### 4.4.3. Ertrag

Die Trauben in den Auswertereihen der Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling wurden am 05. Oktober 2015 händisch mithilfe von Lesescheren geerntet. Dabei wurden jeweils sowohl die Trauben der berechneten, als auch jene der nicht-berechneten Auswertereihe zeitgleich gelesen, um den Einfluss der Berechnung auf den Ertrag zu eruieren. Anschließend wurde im Feld anhand einer tragbaren Waage das jeweilige Gewicht der Trauben, getrennt für jeden Weinstock, bestimmt. Daraus ließ sich die durchschnittliche Traubenanzahl pro Stock, das durchschnittliche Traubengewicht pro Stock (in g) und der durchschnittliche Gesamtertrag pro Stock (in kg) berechnen.

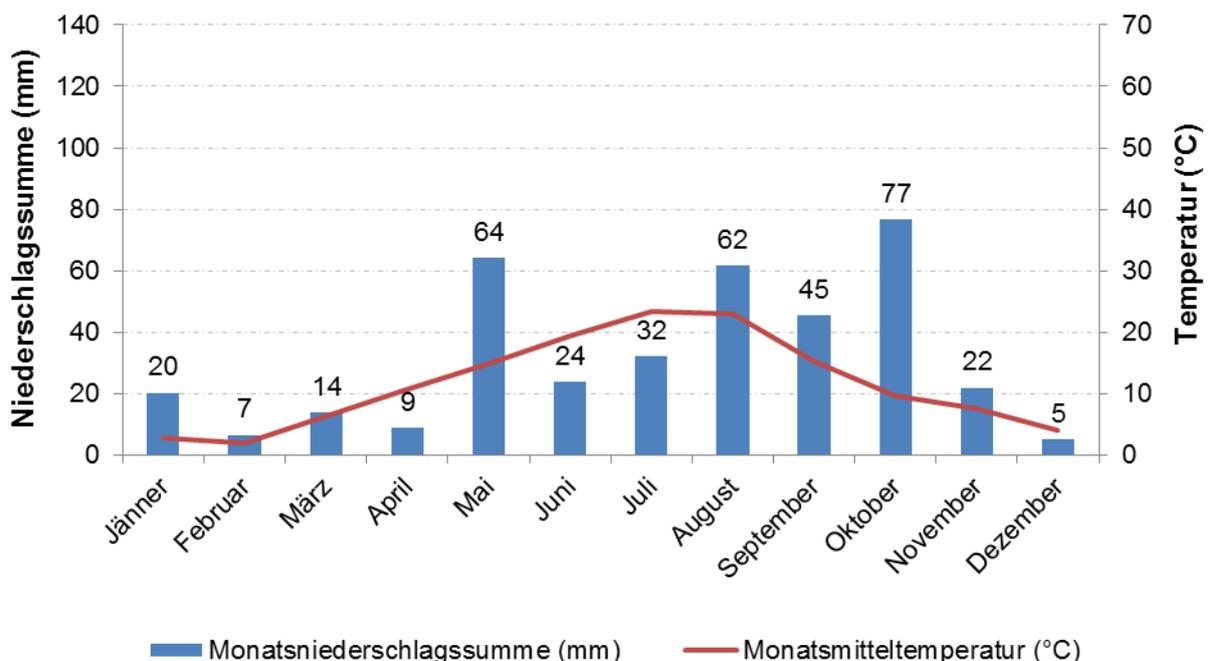
# 5. Ergebnisse und Diskussion

## 5.1. Verlauf der Witterungsdaten

### Versuchsstandort Sandgrube:

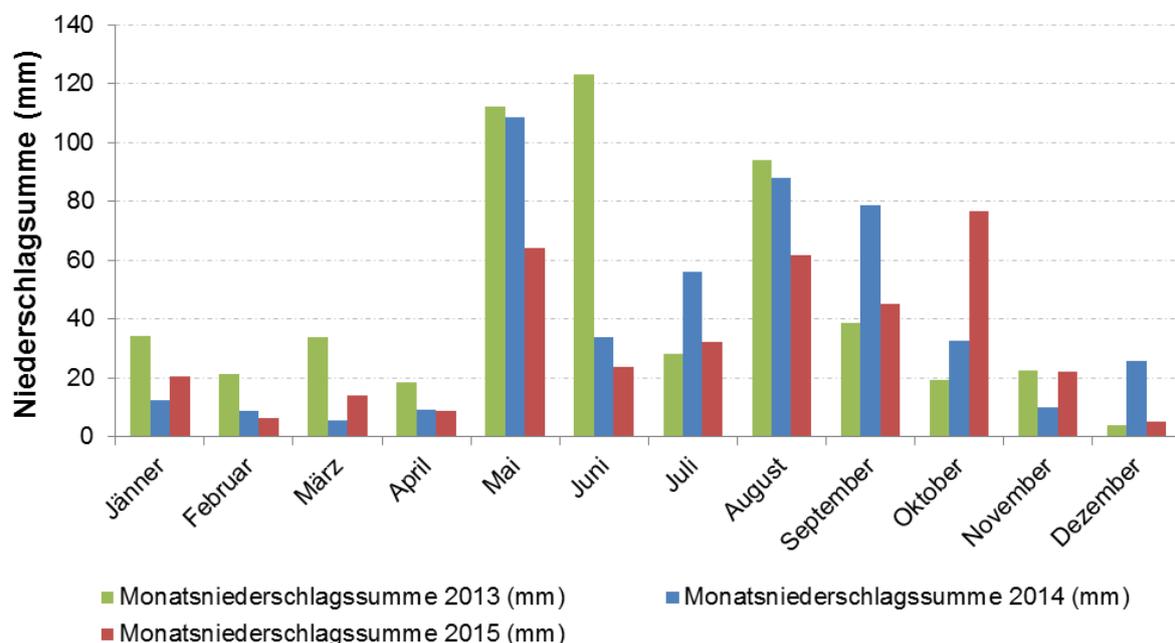
Zur Darstellung der Dynamik der Witterungsdaten für den Versuchsstandort Sandgrube wurden die Messdaten der Wetterstation Krems-Landersdorf herangezogen (Abbildung 18). Die protokollierte Jahresdurchschnittstemperatur im Jahr 2015 betrug 11,6°C, welche zu eine der höchsten in ganz Österreich zählte. Der aufgenommene Maximalwert ergab 38,5°C im Juli und der Minimalwert -6,7°C im Februar. Insgesamt fielen im Jahr 2015 380 mm Niederschlag. Laut Redl et al. (1996) sollten die jährlichen Niederschlagsmengen von 400 mm beim Anbau von Wein nicht unterschritten werden, was jedoch am Versuchsstandort Sandgrube der Fall war.

Für die vorliegende Masterarbeit war vor allem der Untersuchungszeitraum vom Juni bis September 2015 interessant. In dieser Zeitperiode regnete es insgesamt 163 mm, die Durchschnittstemperatur war 20,3°C. Innerhalb dieses Zeitraums war eine relativ trockene Periode vom 01. Juni bis 14. August 2015 feststellbar, in welcher die Verdunstung größer als der Niederschlag war. Dies ist in der Abbildung 18 ersichtlich, in welcher sich die Temperaturkurve in den Monaten Juni und Juli 2015 oberhalb der Niederschlagsbalken befindet. Zu großen Niederschlagsmengen kam es erst zwischen dem 15. und 20. August 2015 (57 mm) und zwischen dem 02. und 06. September 2015 (30 mm).



**Abbildung 18:** Monatsniederschlagssummen (Werte oberhalb der blauen Balken) und Monatsmittelwertverlauf der Temperatur des Jahres 2015 für den Versuchsstandort Sandgrube.

Im Vergleich zum Jahr 2014 hatte es in den Monaten April bis September 2015 – was in etwa der Vegetationsperiode entsprach – durchgehend weniger geregnet (Abbildung 19). Somit war die Vegetationsperiode 2015 durch sehr trockene Witterungsbedingungen geprägt. Insgesamt fielen in dieser Zeitperiode im Jahr 2015 um 37 % weniger Niederschläge als noch im Vorjahr (bezogen auf das Jahr 2013 sogar um 43 % weniger). Erst der Oktober 2015 zeichnete sich gegenüber dem gleichen Monat der Jahre 2013 und 2014 durch deutlich höhere Niederschlagsmengen aus. In der Vegetationsperiode 2015 betrug die Niederschlagssumme 236 mm, die Durchschnittstemperatur war 17,8°C. Rund 62 % der Jahresniederschlagssumme des Jahres 2015 wurden in dieser Zeitperiode verzeichnet.



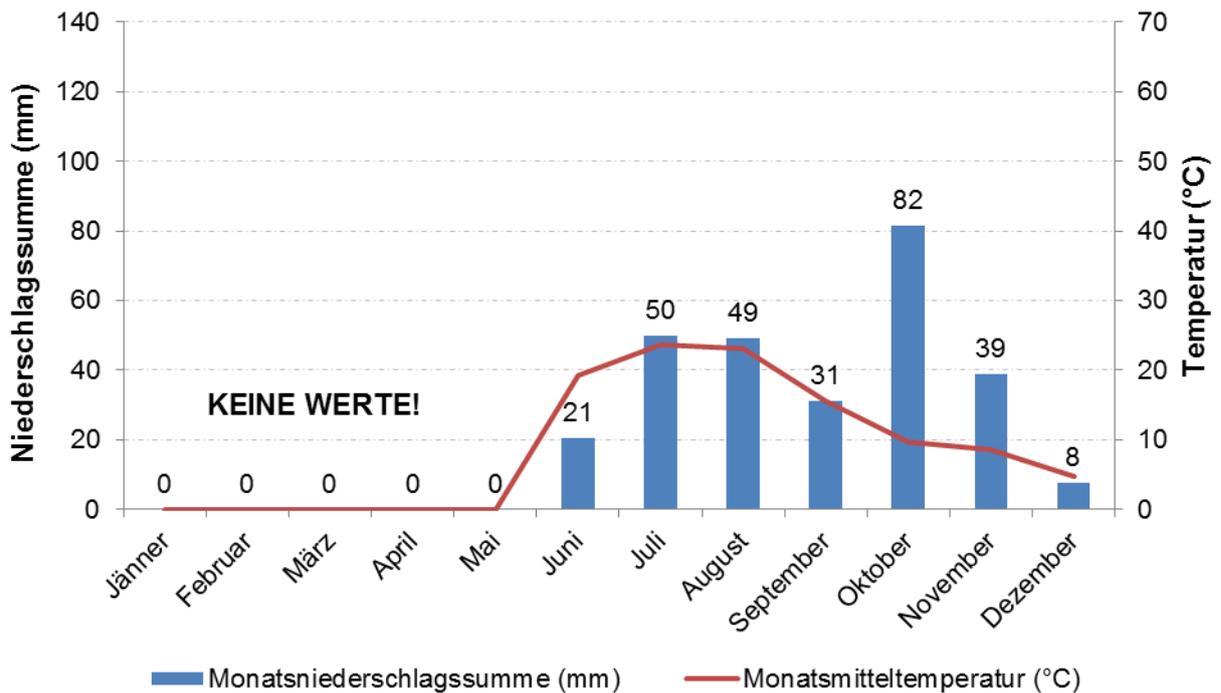
**Abbildung 19:** Monatsniederschlagssummen der Jahre 2013, 2014 und 2015 für den Versuchsstandort Sandgrube.

### **Versuchsstandort Loibenberg:**

Zur Darstellung der Witterungsdynamik für den Versuchsstandort Loibenberg wurden die Messwerte der Wetterstation Loiben-Loibenberg herangezogen. Wetterdaten waren erst ab dem 10. Juni 2015 verfügbar (Abbildung 20). Der Untersuchungszeitraum für den Versuchsstandort Loibenberg wurde ident zum Versuchsstandort Sandgrube festgelegt (01. Juni bis 30. September 2015). Fehlende Messwerte der Tagesmitteltemperatur vom 01. bis 09. Juni 2015 wurden von der nahen Wetterstation Loiben-Sätzen übernommen. Niederschlag trat in diesem Zeitraum keiner auf.

Die Niederschlagssumme vom 01. Juni bis 30. September 2015 betrug 151 mm, die Durchschnittstemperatur war 20,4°C. Bei sehr geringen Niederschlagsmengen (21 mm) und hohen Temperaturen, lässt sich auf eine Verdunstung im Juni 2015

schließen, die höher als der Niederschlag war (Abbildung 20). Auch die Monate Juli, August und September waren von geringen Niederschlagsmengen geprägt. Im Gegensatz zum Versuchsstandort Sandgrube regnete es jedoch im Juli 2015 am Versuchsstandort Loibenberg mehr als doppelt so viel, vor allem am 23. Juli wurde eine hohe Niederschlagsmenge von 24 mm aufgezeichnet. Außerdem kam es analog zum Versuchsstandort Sandgrube zwischen dem 15. und 20. August 2015 (46 mm) und dem 02. und 07. September 2015 (27 mm) zu großen Niederschlagsmengen.



**Abbildung 20:** Monatsniederschlagssummen (Werte oberhalb der blauen Balken) und Monatsmittelwertverlauf der Temperatur vom Juni bis Dezember 2015 für den Versuchsstandort Loibenberg.

## 5.2. Verlauf Pflanzenwasserpotentiale

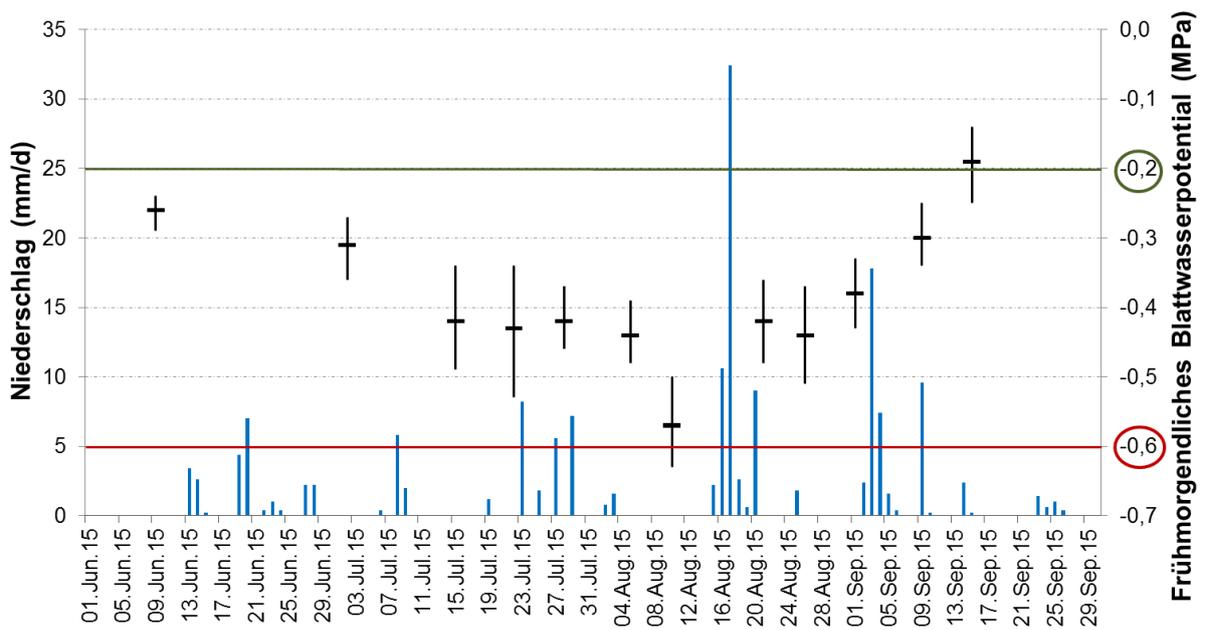
### 5.2.1. Verlauf frühmorgendliches Blattwasserpotential

#### Versuchsstandort Sandgrube:

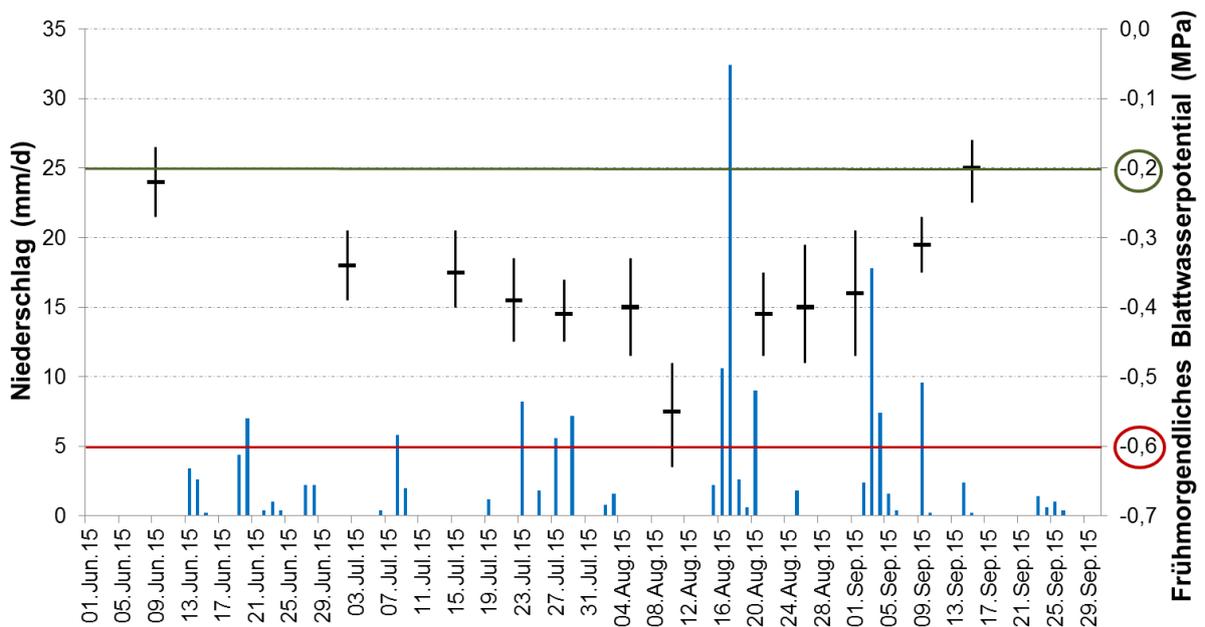
Zur Darstellung des Verlaufs der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale des Versuchsstandorts Sandgrube über den Untersuchungszeitraum wurde aus den 16 Einzelmessungen, welche pro Messtermin für jede Auswertereihe (Nr. 4 und Nr. 6) erhoben wurden, deren Mittelwert berechnet.

Die berechneten Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale stimmten in beiden Auswertereien sehr gut mit den täglichen Niederschlagsereignissen überein (Abbildung 21 und Abbildung 22). Vom 01. Juni bis 14. August 2015 regnete es insgesamt 58,4 mm. Während dieser Zeitperiode sanken die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale in beiden Auswertereien, was zeigt, dass die Niederschlagsmenge den Pflanzenwasserbedarf nicht ausgleichen konnte. Jedoch pufferten die geringen Niederschlagsmengen Ende Juli 2015 den anfänglichen, sprunghaften Abfall der Mittelwerte ein wenig ab, kurzfristig wurde sogar ein geringfügiger Anstieg registriert. In weiterer Folge sanken die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale deutlich ab (Messtermin am 10. August 2015). Die negativsten Mittelwerte wurden in beiden Auswertereien zu diesem Zeitpunkt erreicht, die starke Trockenstressgrenze ( $-0,6$  MPa) jedoch nicht unterschritten. Erst mit den großen Niederschlagsmengen vom 15. bis 20. August 2015 stiegen die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale wieder kontinuierlich an (kurzfristige Ausnahme: Auswertereihe Nr. 4, Messtermin 26. August 2015). Die zweite größere Regenperiode vom 02. bis 06. September 2015 führte zu einem nochmaligen sprunghaften Anstieg der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale und bis zum Abschlussmesstermin am 15. September 2015 näherten sich die Mittelwerte wieder dem Idealbereich (0 bis  $-0,2$  MPa) an bzw. überschritten diesen leicht in der Auswertereihe Nr. 4 am letzten Messtermin.

Somit konnte der Verlauf des Blattwasserpotentials in Bezug zum Niederschlag plausibel nachvollzogen werden. Zusammengefasst waren die Weinreben über den gesamten Untersuchungszeitraum einem moderaten Trockenstress ausgesetzt (mit Ausnahme der Abschlusstermine), was in Anlehnung an Tabelle 1 dem vegetativem Wachstum schadete und den Säuregehalt reduzierte, jedoch für die Zuckereinlagerung förderlich war.

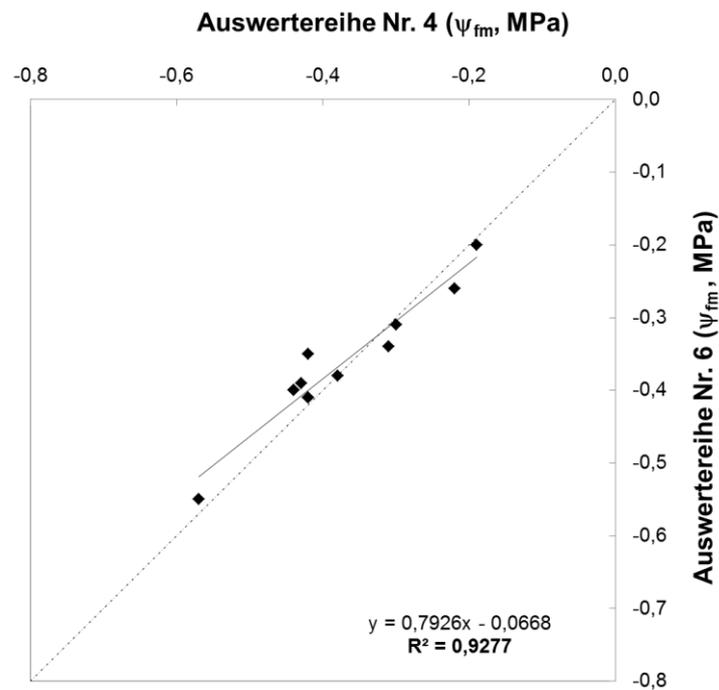


**Abbildung 21:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa).



**Abbildung 22:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa).

Die Korrelation zwischen den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale beider Auswertereien an den einzelnen Messterminen über den Untersuchungszeitraum war positiv, mit einem  $R^2$  von 0,9277 (Abbildung 23). Somit konnte ein sehr enger linearer Zusammenhang zwischen den gemessenen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen der beiden Auswertereien festgestellt werden. Anders ausgedrückt waren die Weinreben der beiden Auswertereien sehr ähnlichen Trockenstressbedingungen ausgesetzt.



**Abbildung 23:** Korrelation der Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{fm}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube in Kombination mit der 1:1 Geraden.

### Versuchsstandort Loibenberg:

Zur Darstellung der Dynamik der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale über den Untersuchungszeitraum wurden am Versuchsstandort Loibenberg für die beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling ebenfalls Mittelwerte aus den Einzelmessungen berechnet. Um den Einfluss der Beregnung aufzuzeigen, wurden dabei jeweils acht Einzelmessungen in der nicht-beregneten und acht in der beregneten Auswertereihe erhoben. In den beregneten Auswertereien wurde an jedem Beregnungstermin mit 22 mm bewässert. Beregnet wurde in fünf Turnussen mit jeweils 12 Stunden Dauer (Tabelle 4).

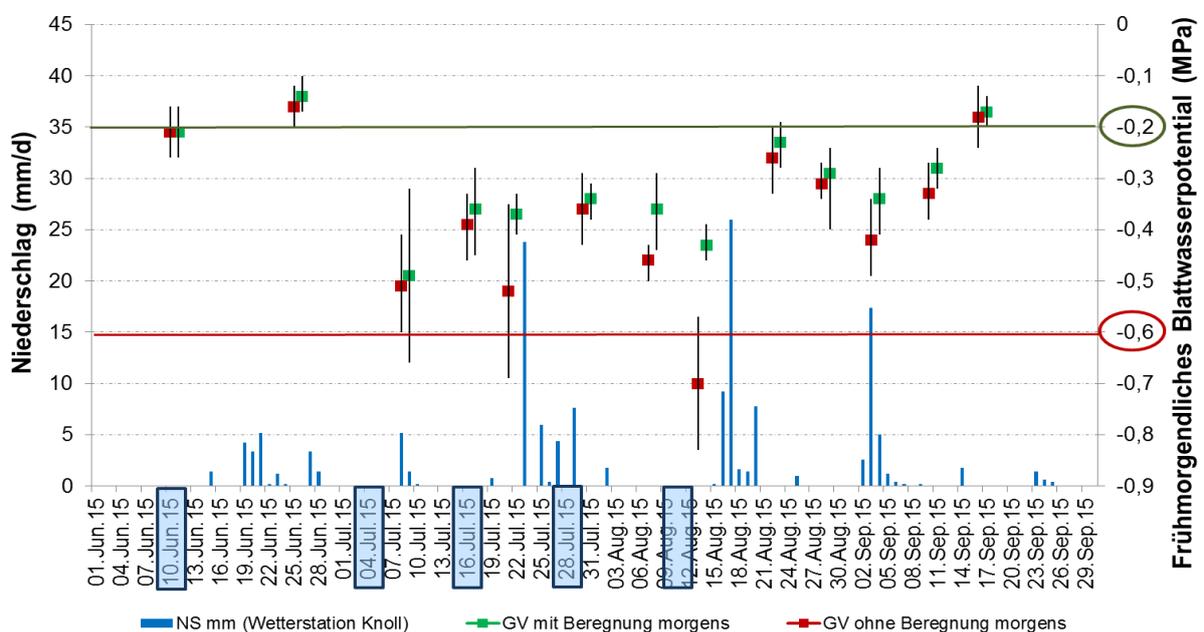
**Tabelle 4:** Bewässerungsturnusse (Datum und Zeit) der beregneten Auswertereien der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner und der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

Turnus (Nr.)	Weingartenterrasse LB-GV (Datum u. Zeit)	Weingartenterrasse LB-RR (Datum u. Zeit)
1	10.06.15 (07.00 – 19.00 Uhr)	09.06.15 (19.00 – 07.00 Uhr)
2	04.07.15 (19.00 – 07.00 Uhr)	04.07.15 (07.00 – 19.00 Uhr)
3	16.07.15 (19.00 – 07.00 Uhr)	16.07.15 (07.00 – 19.00 Uhr)
4	29.07.15 (07.00 – 19.00 Uhr)	28.07.15 (19.00 – 07.00 Uhr)
5	11.08.15 (19.00 – 07.00 Uhr)	11.08.15 (07.00 – 19.00 Uhr)

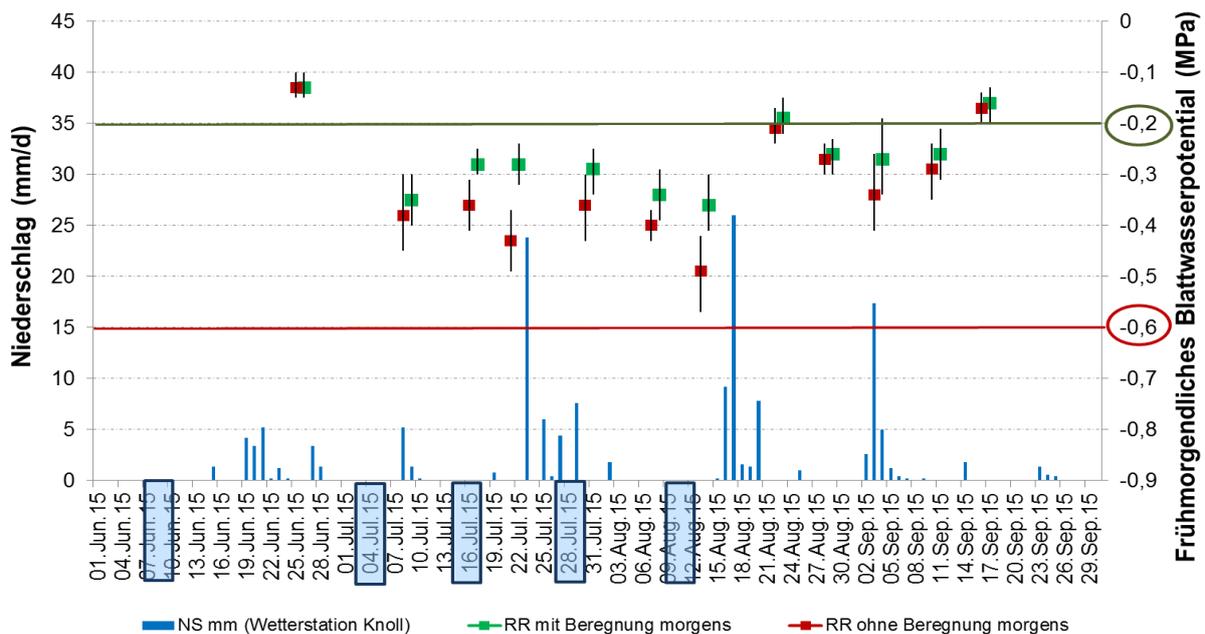
In den Darstellungen der beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner (Abbildung 24) und LB-Rheinriesling (Abbildung 25) ist der Einfluss der Beregnung sehr gut erkennbar. Vor allem die Bewässerungsturnusse am 16. Juli und 11. August 2015 zeigten eine große Wirkung, wo in weiterer Folge in beiden Weingartenterrassen die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe stark voneinander abwichen. Dabei stiegen die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale der beregneten Auswertereihe in weiterer Folge an. Die von Améglio et al. (1999) festgestellte Wiederbefeuchtung („rehydration“) der Weinreben über Nacht, welche laut den Autoren die Präzision des Vergleichs der nicht-beregneten mit den beregneten Weinreben negativ beeinflusst, konnte aufgrund der beobachtbaren Unterschiede nicht bestätigt werden. Nachdem ab dem 11. August 2015 keine Beregnung mehr stattfand und die Niederschläge zunahmen, glichen sich in weiterer Folge die frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale der nicht-beregneten und beregneten Auswertereien wieder an. Aufgrund der relativ großen Niederschlagsmengen vom 23. Juli 2015 (24 mm) wurden auch die Einflüsse der Beregnungsturnusse am 28. bzw. 29. Juli 2015 ein wenig abgedämpft.

Dennoch befanden sich die berechneten Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale der beregneten Auswertereien der beiden Weingartenterrassen des Versuchsstandorts Loibenberg die meiste Zeit im moderaten

Trockenstressbereich – trotz der künstlichen, zusätzlichen Beregnung während des Untersuchungszeitraums. Ausnahmen bildeten die Messtermine am 25. Juni und am 16. September 2015, wo sich die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale sowohl der beregneten als auch der nicht-beregneten Auswertereien im Idealbereich befanden. Da jedoch unmittelbar vor den besagten Messterminen keine Beregnung stattfand und für beide Auswertereien kein Trockenstress vorlag, wurde dieser Zustand wahrscheinlich durch Niederschlag bedingt. Zusätzlich überschritt der Mittelwert der beregneten Auswerterei der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling am 22. August 2015 ebenfalls die Grenze bei  $-0,2$  MPa und lag somit im Idealbereich. Dies ließ sich jedoch vermutlich mehr auf die große Niederschlagsmenge vom 15. bis 20. August 2015 zurückführen und weniger auf den Bewässerungsturnus vom 11. August 2015, da sich der Mittelwert der nicht-beregneten Auswerterei am selben Messtermin auch sehr eng dem Idealbereich annäherte. Auf der anderen Seite befand sich der Mittelwert des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials der nicht-beregneten Auswerterei der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner am 13. August 2015 im starken Trockenstressbereich (kleiner  $-0,6$  MPa), jener der beregneten Auswerterei war jedoch deutlich positiver, wodurch an diesem Messtermin der Effekt der Beregnung wohl am besten erkennbar war.

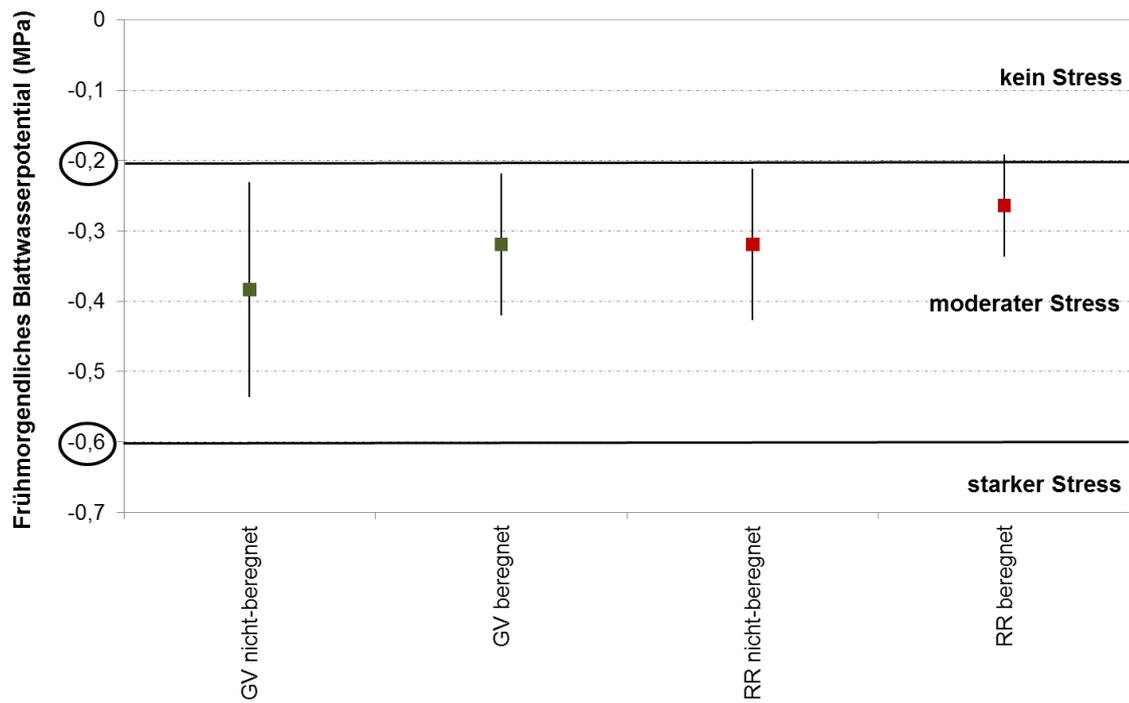


**Abbildung 24:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-beregneten Auswerterei und beregneten Auswerterei der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. Die Mittelwerte der beregneten Auswerterei wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an ( $-0,2$  MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich ( $-0,6$  MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.



**Abbildung 25:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-berechneten Auswertereihe und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. Die Mittelwerte der berechneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich ( $-0,2$  MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich ( $-0,6$  MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.

Tendenziell befanden sich die berechneten Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale (nicht-berechnet und berechnet) der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling im Vergleich zur Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner näher am Idealbereich „kein Stress“ (Abbildung 26). Dies war vermutlich auf das unterschiedliche Alter der Weinreben (ca. 45 Jahre) zurückzuführen. Dementsprechend waren die älteren Rheinriesling-Reben weniger trockenstressempfindlich. Auch sortenspezifische Unterschiede könnten eine Rolle gespielt haben. Dies konnte jedoch mit den vorliegenden Daten nicht beurteilt werden.



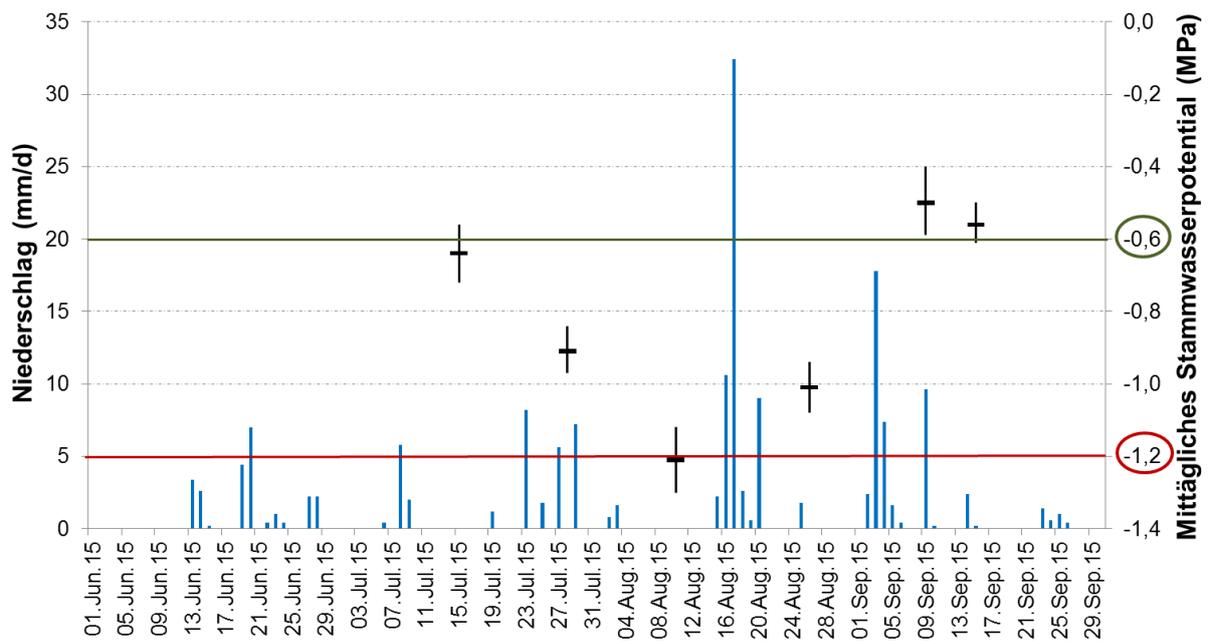
**Abbildung 26:** Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale – berechnet aus allen Messwerten des Untersuchungszeitraums – der Sorten GV (grün) und RR (rot), jeweils getrennt in nicht-berechnete und berechnete Auswertereien und deren Zuordnungen zu den in Tabelle 1 definierten Trockenstressbereichen.

## 5.2.2. Verlauf mittägliches Stammwasserpotential

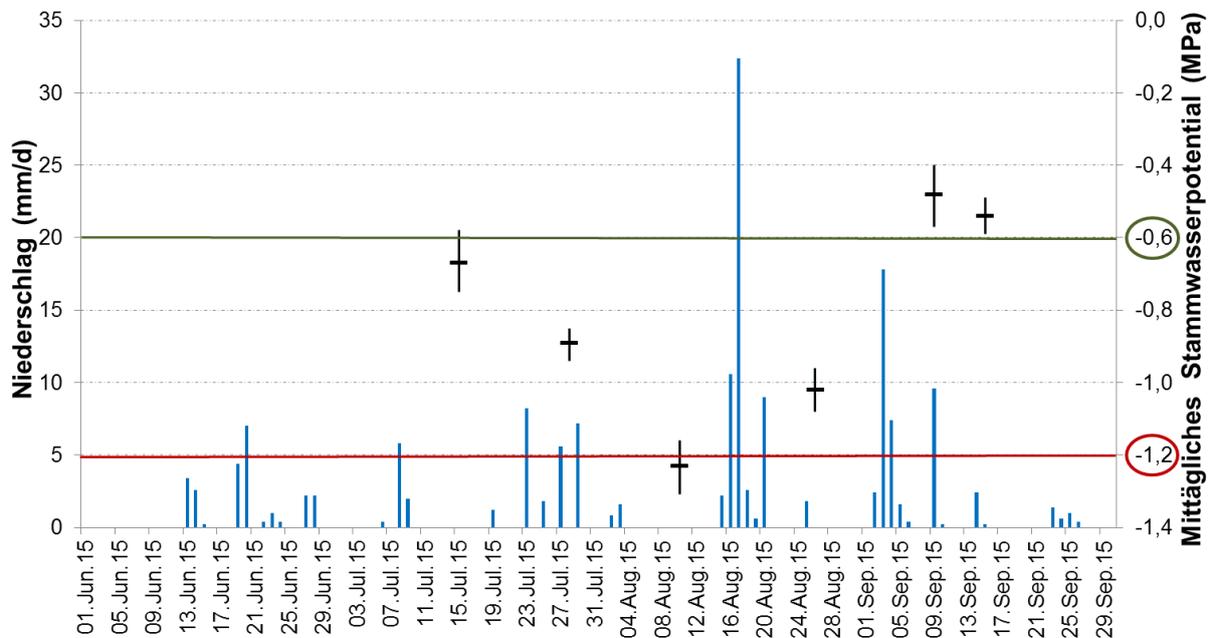
### Versuchsstandort Sandgrube:

Bei der Auswertung der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden, wie bei jener der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale, Mittelwerte aus den Einzelmessungen berechnet. Dadurch konnte der Verlauf der mittäglichen Stammwasserpotentiale beider Auswertereihen Nr. 4 und Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube über den Untersuchungszeitraum in übersichtlicher Form dargestellt werden. Da die Messungen jedoch in einem Zeitabstand von zwei Wochen – ab dem 15. Juli 2015 – durchgeführt wurden, konnten nur sehr wenige Messwerte suggeriert bzw. Mittelwerte errechnet und abgebildet werden. Generell sind, im Gegensatz zu den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen, die Trockenstressgrenzen bei den mittäglichen Stammwasserpotentialen bei negativeren Wasserpotentialen angesetzt (Tabelle 1), da diese um die Mittagszeit ermittelt werden und daher die erhaltenen Messwerte von der Sonne bzw. von deren Auswirkung auf andere fühlbare Wetterelemente beeinflusst werden.

Die berechneten Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale stimmten in beiden Auswertereihen gut mit den Niederschlagsereignissen überein (Abbildung 27 und Abbildung 28). Bei den ersten beiden Messterminen am 15. und 28. Juli 2015 befanden sich die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale im moderaten Trockenstressbereich, mit deutlich negativeren Messwerten am zweiten Messtermin. Am dritten Messtermin, dem 10. August 2015, erreichten die Mittelwerte beider Auswertereihen den starken Trockenstressbereich. Diese Entwicklung erschien plausibel, da es zuvor über einen längeren Zeitraum relativ wenig geregnet hatte. Vor allem verteilten sich die Niederschlagsmengen auf einzelne Tage, wodurch der Wasserbedarf der Reben nicht gedeckt wurde. Nach der ersten großen Niederschlagsmenge zwischen dem 15. und 20. August 2015 stiegen die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wieder an. Bei den beiden letzten Messterminen am 09. und 15. September 2015 befanden sich die berechneten Mittelwerte nicht mehr im Trockenstressbereich (0 bis  $-0,6$  MPa), was durchaus als Folge des zweiten großen Niederschlagsereignisses zwischen dem 02. und 06. September 2015 gedeutet werden könnte.

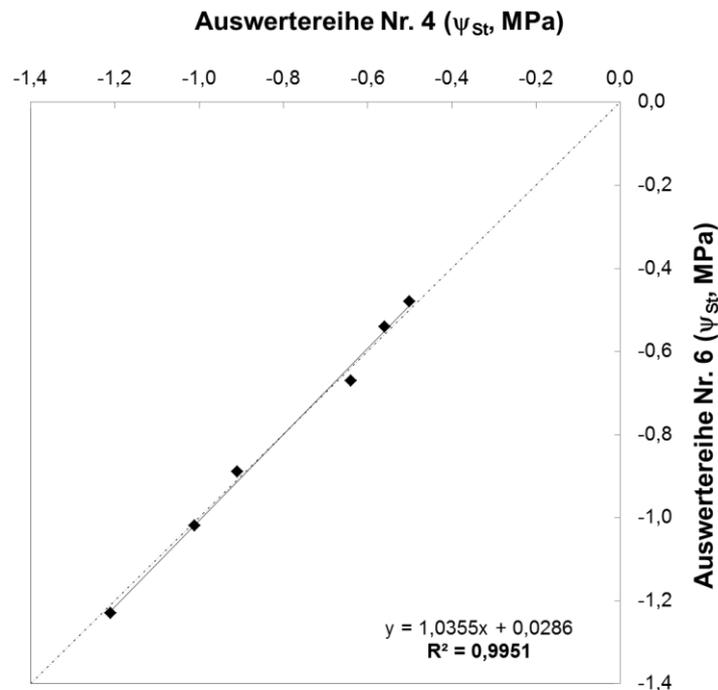


**Abbildung 27:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,6 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-1,2 MPa).



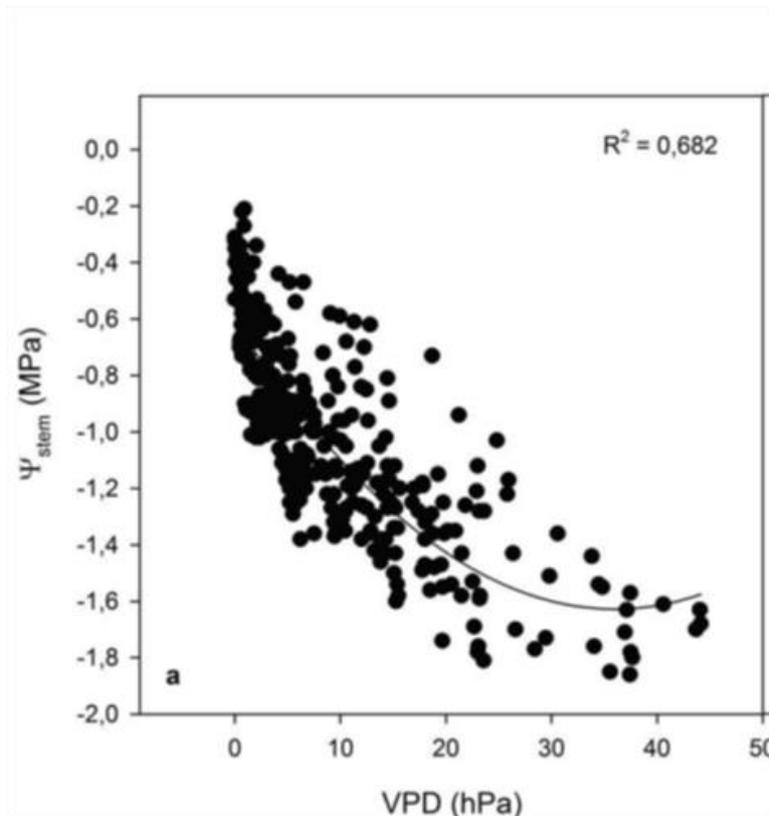
**Abbildung 28:** Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,6 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-1,2 MPa).

Die Korrelation der Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale der beiden Auswertereien Nr. 4 und Nr. 6 ergab einen sehr engen linearen Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,9951 (Abbildung 29). Somit wurden in beiden Auswertereien fast identische Ergebnisse suggeriert, was wiederum gleiche Trockenstressbedingungen impliziert. Eine ähnlich hohe Korrelation wurde bereits anhand der Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale erzielt.



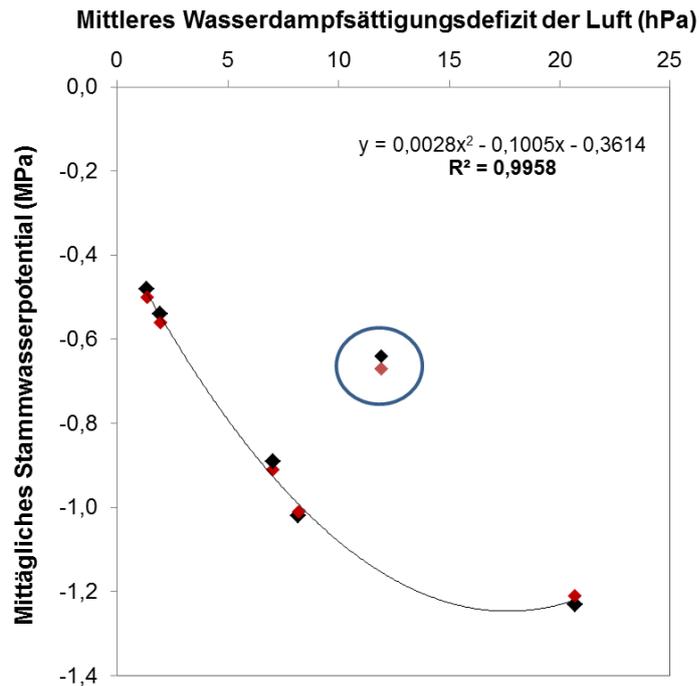
**Abbildung 29:** Korrelation der Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{st}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube in Kombination mit der 1:1 Geraden.

Die mittäglichen Stammwasserpotentiale werden jedoch von den Temperatur und dem Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft beeinflusst, da sie am Mittag und nicht in der Nacht gemessen werden (Van Zyl 1986, Williams und Baeza 2007). Diese Annahme sollte berücksichtigt werden, da in Österreich über die Sommermonate üblicherweise keine beständige Witterungssituation, mit gleichbleibender Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit, anzutreffen ist. Unter anderem lieferte Heßdörfer (2015) den Beweis eines Zusammenhangs, indem er das Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft (VPD) mit dem Stammwasserpotential an mehreren Tagen (zwischen 08.00 und 20.00 Uhr) bei unterschiedlich vorherrschenden Witterungsbedingungen korrelierte (Abbildung 30).



**Abbildung 30:** Beziehung zwischen dem Wasserdampf-sättigungsdefizit (VPD) und dem Stammwasserpotential  $\Psi_{St}$  (nach Heßdörfer 2015).

Auf Grundlage dessen wurden für den Versuchsstandort Sandgrube die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale beider Auswertereien mit dem mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft (VPD) an denselben Tagen korreliert, um den Einfluss der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit aufzuzeigen (Abbildung 31). Dabei stellten wahrscheinlich die beiden Wertepaare der Auswertereihe Nr. 4 (VPD: 11,91 hPa;  $\Psi_{St}$ : -0,67 MPa) und der Auswertereihe Nr. 6 (VPD: 11,91 hPa;  $\Psi_{St}$ : -0,64 MPa) – im Vergleich mit der von Heßdörfer (2015) aufgestellte Korrelation – Ausreißer dar, welche stark von der Trendlinie abwichen und sich somit außerhalb der Korrelation befanden. Sie wurden bei Durchlegung des Polynoms nicht berücksichtigt und dadurch konnte ein sehr hoher nicht-linearer Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,9958 festgestellt werden. Die tiefsten Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden somit an Tagen mit einem hohen mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizit der Luft ermittelt und vice versa, was durchaus plausibel erschien. Der sehr hohe Zusammenhang ist aber vermutlich auf die nicht ausreichende Menge von Daten zurückzuführen. Mehrere Messungen wären dafür in Zukunft interessant.

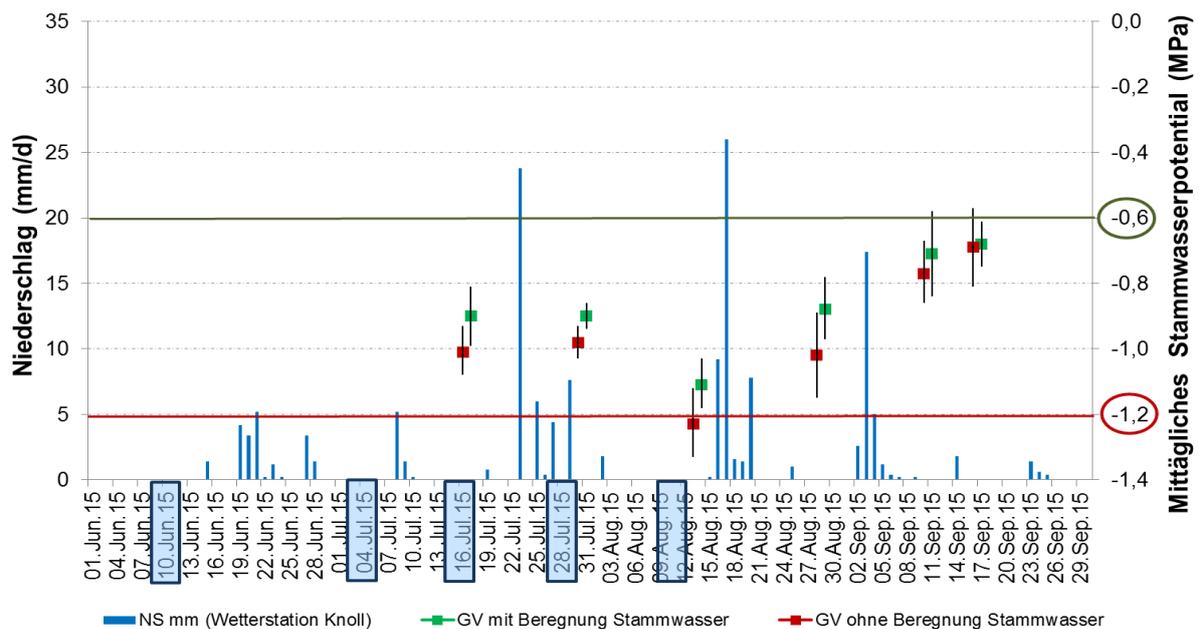


**Abbildung 31:** Korrelation des mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizits der Luft mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale der Auswertereihe Nr. 4 (rote Markierungspunkte) und der Auswertereihe Nr. 6 (schwarze Markierungspunkte) des Versuchsstandorts Sandgrube. Der blaue Kreis umfasst die vermuteten Ausreißer.

### Versuchsstandort Loibenberg:

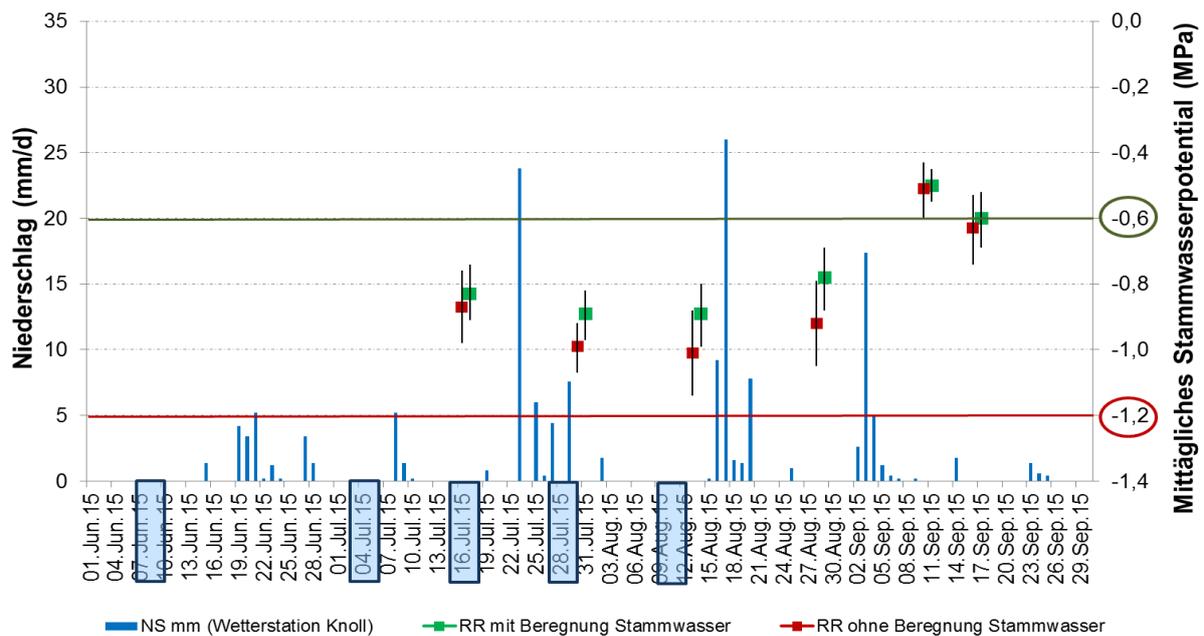
Zur Darstellung der Dynamik der mittäglichen Stammwasserpotentiale über die untersuchte Zeitperiode wurden am Versuchsstandort Loibenberg für die beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling wiederum aus den Einzelmessungen Mittelwerte berechnet.

Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale – der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner – lagen fast über den gesamten Untersuchungszeitraum, mit einer Ausnahme am 10. August 2015, im moderaten Trockenstressbereich zwischen  $-0,6$  und  $-1,2$  MPa (Abbildung 32). Am besagten Tag – kurz vor der großen Niederschlagsmenge zwischen dem 15. und 20. August 2015 – erreichten die mittäglichen Stammwasserpotentiale ihre tiefsten Mittelwerte. An diesem Tag befand sich der Mittelwert der nicht-berechneten Auswertereihe im starken Trockenstressbereich. Diese Beobachtung stimmte sehr gut mit den Auswertungen der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale derselben Auswertereihe überein, wo ebenfalls die nicht-berechnete Auswertereihe am selben Messtermin dem starken Trockenstress ausgesetzt war. In weiterer Folge verzeichneten die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale bis zum Ende des Untersuchungszeitraums wieder positivere Werte. Der Bereich, in welchem kein Trockenstress vorherrscht (0 bis  $-0,6$  MPa), wurde aber in beiden Auswertereihen innerhalb des Untersuchungszeitraums nicht erreicht.



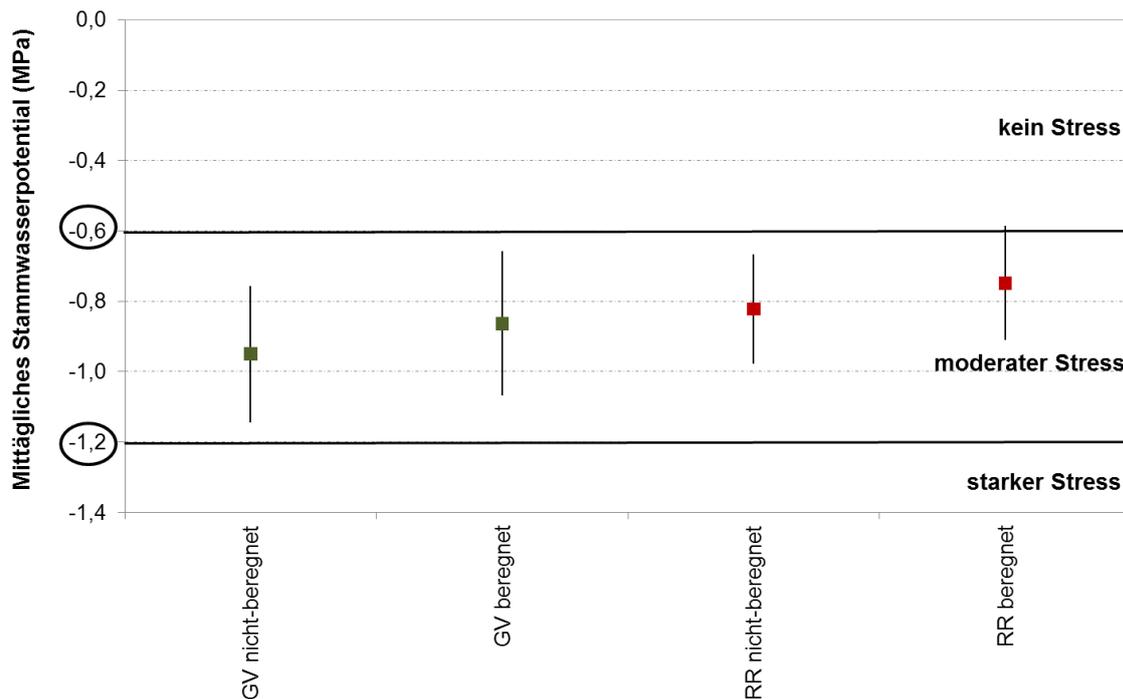
**Abbildung 32:** Tagesniederschlagsmengen und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-beregneten Auswertereihe und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. Die Mittelwerte der beregneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich ( $-0,6$  MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich ( $-1,2$  MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.

Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale – der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling – zeigten während des Untersuchungszeitraums im Vergleich zu jenen der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner einen fast identischen Verlauf (Abbildung 33). Die tiefsten Mittelwerte wurden wiederum am 10. August 2015 erreicht und in weiterer Folge stiegen diese wieder an. Eine große Abweichung stellten aber die Messungen vom 09. September 2015 dar, wo die gemittelten Stammwasserpotentiale beider Auswertereien sprunghaft bis in den Idealbereich – wo kein Trockenstress vorlag – anstiegen, um dann am Abschlusstermin wieder geringfügig abzusinken. Da die beiden Weingartenterrassen sehr nahe beieinander lagen, konnte kein zusätzliches Niederschlagsereignis für den sprunghaften Anstieg verantwortlich sein. Aufgrund der geringen Standardabweichung wurden auch Messfehler ausgeschlossen. Die genaue Ursache dieser auffallenden Abweichung konnte letztendlich nicht geklärt werden.



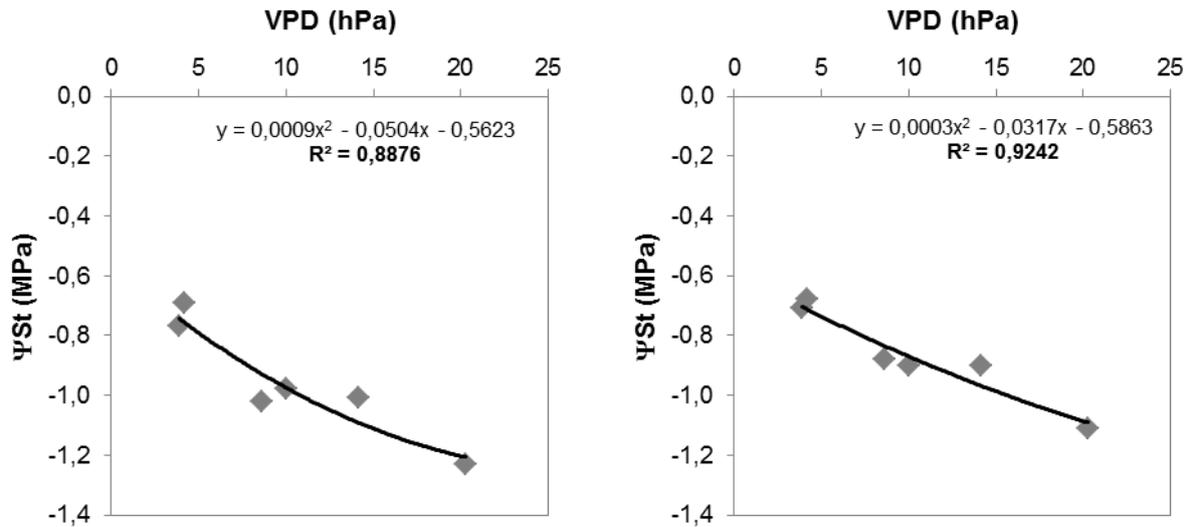
**Abbildung 33:** Tagesniederschlagsmengen und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-berechneten Auswertereihe und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. Die Mittelwerte der berechneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an ( $-0,6$  MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich ( $-1,2$  MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.

Generell bestand der große Unterschied zwischen den beiden Weingartenterrassen darin, dass die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling über den betrachteten Untersuchungszeitraum tendenziell positiver, als jene der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner waren und zwar sowohl in der nicht-berechneten, als auch in der berechneten Auswertereihe (Abbildung 34). Dasselbe Resultat konnte auch bei der Auswertung der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale erzielt werden. Im Gegensatz zu den Auswertungen der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale war jedoch der Einfluss der Beregnung, im Zuge der Aufarbeitung der mittäglichen Stammwasserpotentiale, in beiden Weingartenterrassen weniger stark beobachtbar.

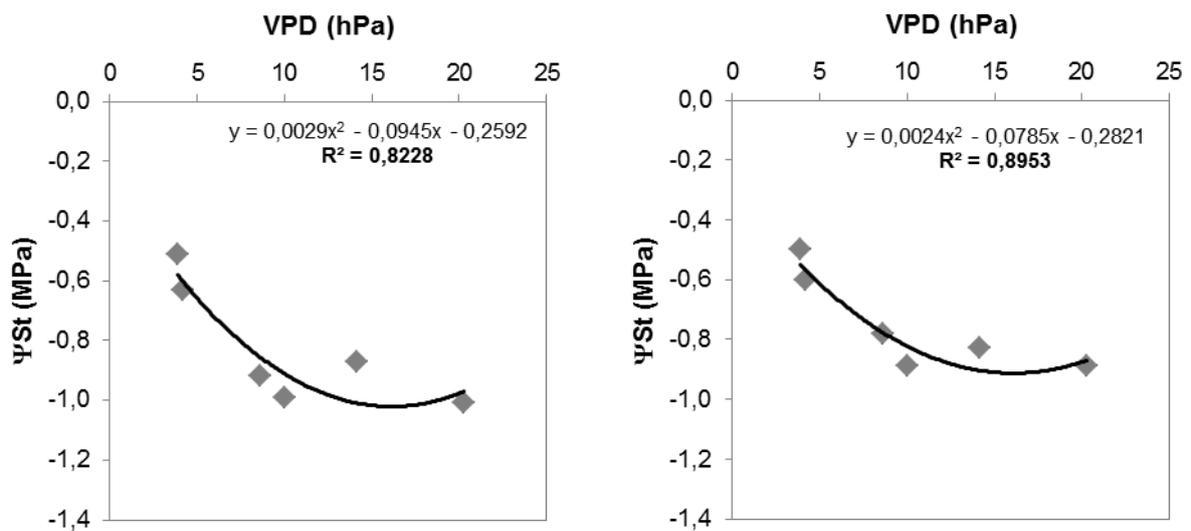


**Abbildung 34:** Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale – berechnet aus allen Messwerten des Untersuchungszeitraums – der Sorten GV (grün) und RR (rot), jeweils getrennt in nicht-berechnete und berechnete Auswertereien und deren Zuordnungen zu den in Tabelle 1 definierten Trockenstressbereichen.

Das könnte mit den vorherrschenden Witterungsverhältnissen am Mittag zusammenhängen, da die erhaltenen mittäglichen Stammwasserpotentiale von den gegebenen Witterungsbedingungen beeinflusst werden. Dadurch könnte die Größenordnung der Unterschiede zwischen berechneter und nicht-berechneter Auswertereihe verfälscht werden. Daher wurden die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der beiden Weingartenterrassen mit dem mittleren Wassersättigungsdefizit der Luft (VPD) korreliert, um einen eventuell vorhandenen Zusammenhang aufzuzeigen. In der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner wurde in der nicht-berechneten Auswertereihe ein sehr enger nicht-linearer Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,8876, in der berechneten Auswertereihe ein noch engerer nicht-linearer Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,9242 festgestellt (Abbildung 35). In der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling ergab die Korrelation für die nicht-berechnete Auswertereihe ( $R^2$  von 0,8228), sowie für die berechnete Auswertereihe ( $R^2$  von 0,8963) einen sehr starken nicht-linearen Zusammenhang (Abbildung 36). In der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling war ein starkes Abflachen der Regressionsgeraden ab circa 10 hPa zu beobachten und dies führte verhältnismäßig zu einer geringeren Reduzierung der gemittelten mittäglichen Stammwasserpotentiale. Dennoch wurden lediglich sechs Wertepaare miteinander korreliert, wodurch nicht zu viel in die erhaltenen Ergebnisse hineininterpretiert werden sollte.



**Abbildung 35:** Korrelation des mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizits der Luft (VPD) mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{st}$ ) der nicht-berechneten (links) und der berechneten (rechts) Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.



**Abbildung 36:** Korrelation des mittleren Wasserdampf-sättigungsdefizits der Luft (VPD) mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{st}$ ) der nicht-berechneten (links) und der berechneten (rechts) Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

## 5.3. Verlauf Bodenwasserstatus

### 5.3.1. Verlauf Bodenmatrixpotentiale

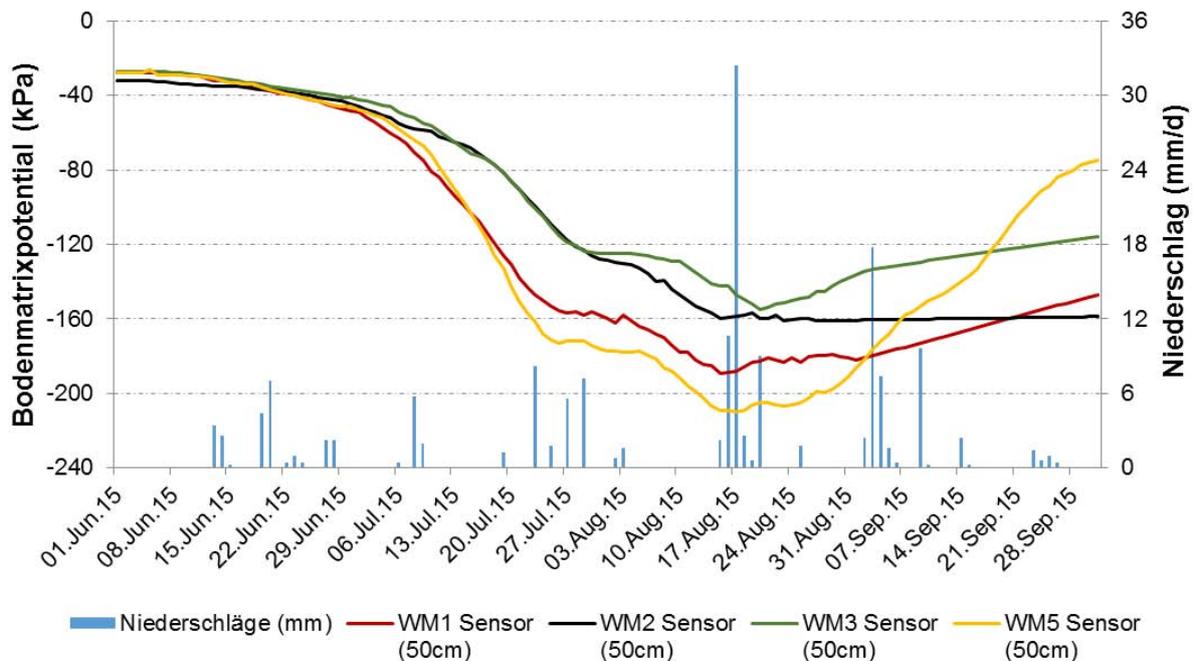
Laut Hersteller sendeten die Watermark 200 SS Sensoren, aufgrund des installierten Datenübertragungssystems, lediglich Wertveränderungen von 2 kPa an den Datalogger und dadurch kam es zu sehr unregelmäßigen Datenaufzeichnungen. Verstärkt wurden diese Messungenauigkeiten dadurch, dass die aufgezeichneten Wertveränderungen oft mehr als 2 kPa betragen. Aufgrund dieser Umstände, entstanden Datenlücken, welche durch die lineare Interpolation beseitigt wurden, was jedoch der Messgenauigkeit schadete. Vor allem entstanden große Datenlücken ab Ende August/Anfang September 2015, wo anhand der linearen Interpolation die realen Messwerte vermutlich nicht zufriedenstellend abgeschätzt werden konnten. Außerdem wurden oft mehrere Werte pro Tag aufgezeichnet, wobei in diesem Fall der Tagesmittelwert berechnet wurde. Durch die angewandte Datenverarbeitung mit Hilfe der linearen Interpolation und Tagesmittelwertberechnung war es möglich, pro Tag einen Wert zu generieren und somit die Watermark-Sensoren untereinander zu vergleichen. Dennoch war die installierte, diskontinuierliche Datenaufzeichnung für Messungen von Trockenstressbedingungen, aufgrund der geringen zeitlichen Auflösung, nicht unbedingt geeignet.

#### **Versuchsstandort Sandgrube – Auswertereihe Nr. 4:**

In der Auswertereihe Nr. 4 wurde der Watermark-Sensor Nr. 4 (WM4) für die Datenanalyse nicht weiter berücksichtigt. Diese Entscheidung wurde mit dem Argument begründet, dass der WM4 nur in einem Messbereich von  $-26$  bis  $-66$  kPa agierte und dies in allen messbaren Tiefen (50, 100, 150 cm). Vor allem in 50 cm Bodentiefe müssten deutlich negativere Bodenmatrixpotentiale erreicht werden. Diese Behauptung konnte durch einen Vergleich mit den anderen Watermark-Sensoren der Auswertereihe Nr. 4 bekräftigt werden. Es handelte sich somit vermutlich in 50 cm Bodentiefe um einen Fehler in der Aufzeichnung bzw. Übertragung der Daten oder es lagen punktuell sehr feuchte Bodenverhältnisse vor, welche somit aber nicht repräsentativ für die Auswertereihe gewesen wären. Außerdem könnte ein fehlerhafter Kontakt der Messsonde zur umgebenden Bodenmatrix für die nicht-plausiblen Datenaufzeichnungen verantwortlich sein. Vermutlich lieferte – in der Auswertereihe Nr. 4 – der Watermark-Sensor Nr. 5 (WM5) bei der Datenaufzeichnung in allen gemessenen Tiefen die zuverlässigsten Daten, da während des Untersuchungszeitraums keine größeren Datenlücken entstanden sind.

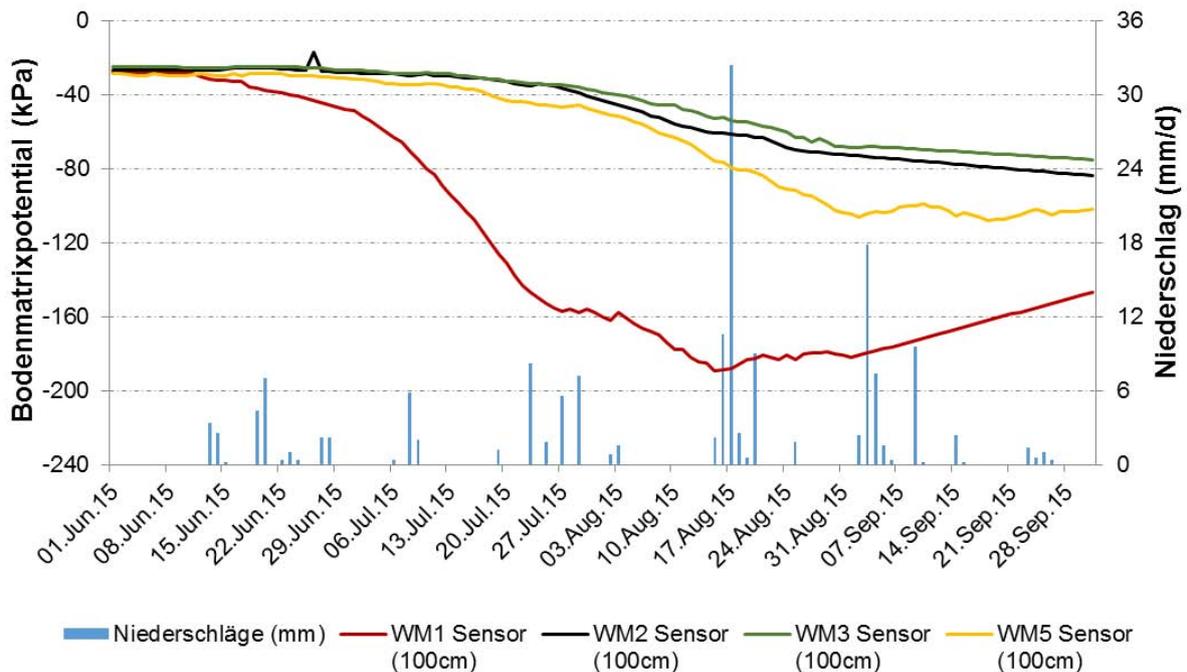
Der Verlauf der Bodenmatrixpotentiale in 50 cm Bodentiefe nahm bei den ausgewerteten Watermark-Sensoren zwischen Anfang Juli und Mitte August 2015 konstant ab, die Bodenmatrixpotentiale wurden also – ausgedrückt in absoluten Zahlen – negativer (Abbildung 37). Vom 15. bis 23. August 2015 erreichten die Verläufe der Bodenmatrixpotentiale bei allen vier Sensoren ihre Tiefpunkte und stiegen in weiterer Folge bis zum Ende des Untersuchungszeitraums wieder an. Eine

Ausnahme bildete der Verlauf des Watermark-Sensors Nr. 2 (WM2), welcher ab Mitte August nach Erreichen des Tiefstands auf ungefähr dem gleichen Niveau stagnierte. Der beobachtete Anstieg nach den Tiefstständen stimmte sehr gut mit den hervorstechenden, großen Niederschlagsmengen zwischen dem 15. und 20. August 2015 überein, wobei der Watermark-Sensor Nr. 3 (WM3) auf diese etwas verspätet reagierte.

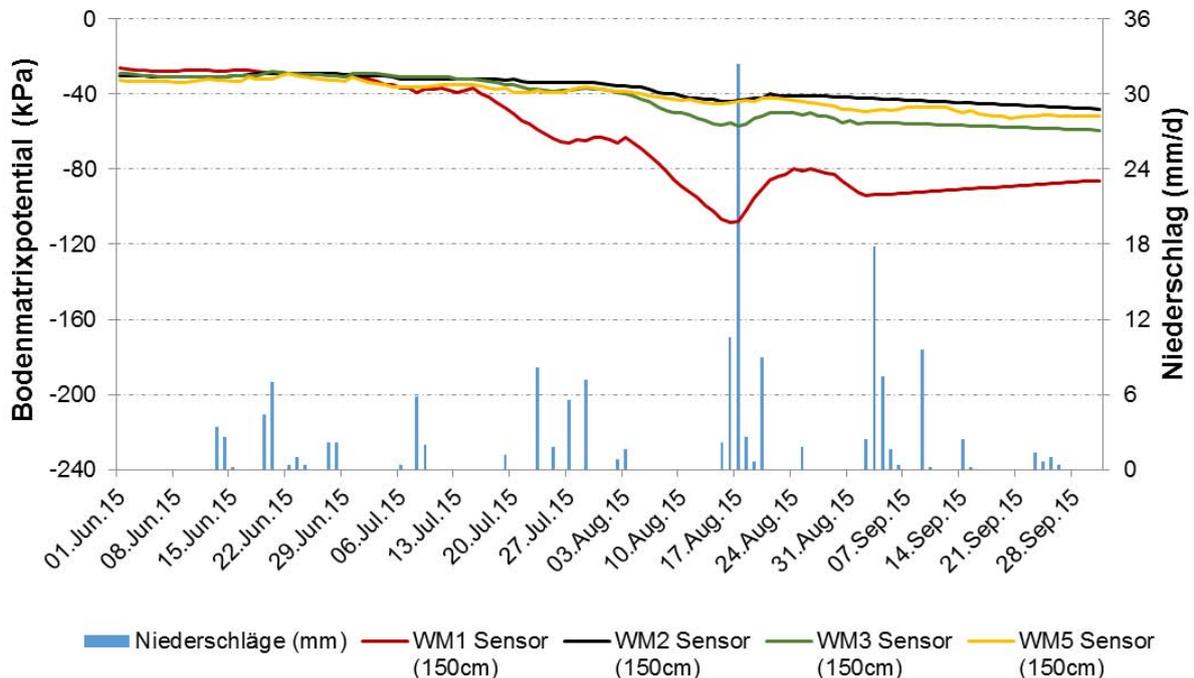


**Abbildung 37:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

In 100 und 150 cm Messtiefe stießen die Aufzeichnungen des Watermark-Sensors Nr. 1 (WM1) sofort ins Auge, da sich diese von den Aufnahmen der anderen Watermark-Sensoren deutlich unterschieden (Abbildung 38 und Abbildung 39). Die vom WM1 ermittelten Bodenmatrixpotentialverläufe ähnelten dabei jenen in 50 cm Bodentiefe, mit sehr starken Schwankungen und Reaktionen auf Niederschlagsereignisse. Der WM1 wurde von der Versickerung beeinflusst, stellte jedoch eine Ausnahme dar und war somit nicht repräsentativ für die gesamte Auswertereihe. Die anderen Watermark-Sensoren WM2, WM3 und WM5 sprachen in 100 cm Tiefe gar nicht auf große Niederschlagsperioden an, deren Bodenmatrixpotentiale wurden bis zum 30. September 2015 konstant – wenn auch geringfügig – negativer. In 150 cm Bodentiefe, war eine kleine Reaktion der WM2, WM3 und WM5 auf die Regenperiode Mitte August 2015 feststellbar, jedoch auch in dieser Bodentiefe sanken die ermittelten Bodenmatrixpotentialverläufe bis zum Ende des Untersuchungszeitraums sehr geringfügig ab.



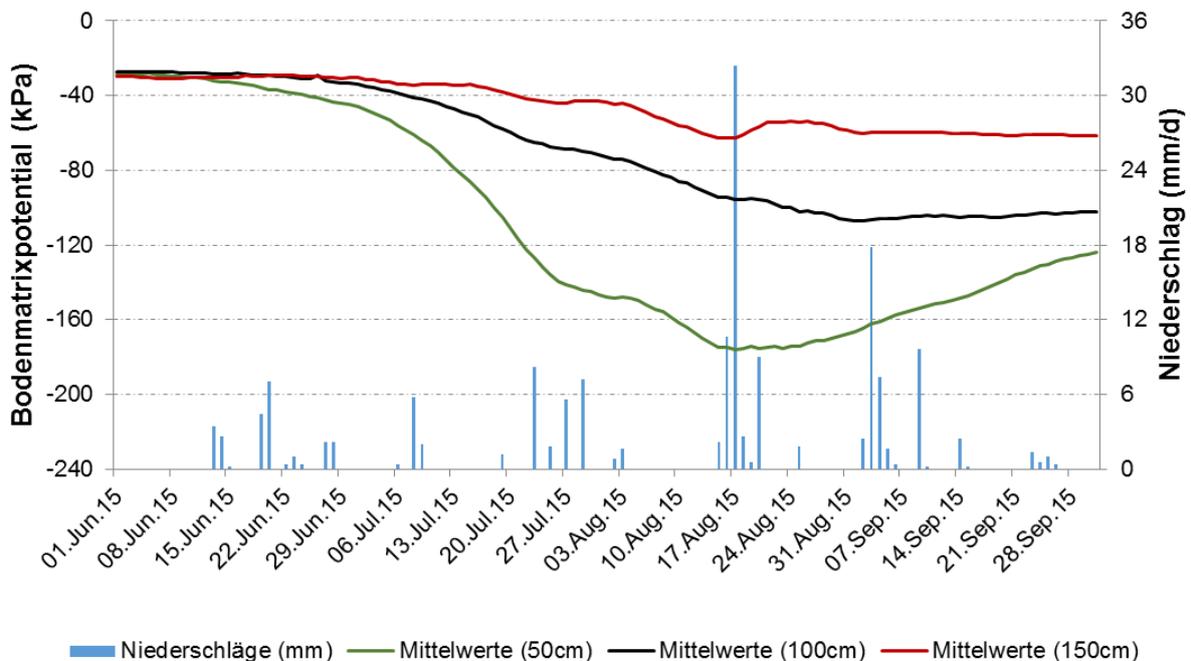
**Abbildung 38:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.



**Abbildung 39:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Watermark-Sensoren – im Vergleich untereinander – relativ große Messwertabweichungen anzeigten, wobei diese Unterschiede am meisten in 50 cm Bodentiefe beobachtet werden konnten. In 100 und 150 cm Bodentiefe wichen vor allem die Messwerte des WM1 von den

anderen ab. Trotz dieser Umstände wurden für alle Messtiefen (50, 100 und 150 cm) aus den Messdaten der untersuchten Watermark-Sensoren Mittelwerte berechnet. Die gemittelten Bodenmatrixpotentiale waren in 50 cm Bodentiefe im Vergleich zu jenen in tieferen Bodenschichten negativer und reagierten am stärksten auf die auftretenden Niederschlagsereignisse (Abbildung 40). Dies war an den großen Schwankungen des Bodenmatrixpotentialverlaufs erkennbar. Auffallend war dabei vor allem die sprunghafte Abnahme des Verlaufs bis zur ersten starken Niederschlagsperiode vom 15. bis 20. August 2015. Diese und die zweite große Niederschlagsperiode zwischen dem 02. und 06. September 2015 bewirkten in weiterer Folge einen Anstieg des Bodenmatrixpotentialverlaufs bis zum Ende des Untersuchungszeitraums, was sehr gut mit den Niederschlagsereignissen, als auch mit den ermittelten Pflanzenwasserpotentialen zusammenpasste. Die gemittelten Bodenmatrixpotentialverläufe in 100 und 150 cm Bodentiefe reagierten wenig auf die Niederschlagsereignisse. Der gemittelte Gradient in 100 cm Bodentiefe, stieg innerhalb des Untersuchungszeitraums nicht an und wurde somit nicht vom Regenwasser beeinflusst. Es fand keine Versickerung statt. Der gemittelte Gradient in 150 cm Tiefe verzeichnete mehr Bewegungen in Richtung eines positiveren Matrixpotentials. Verläufe in diesen Tiefen könnten jedoch von Wasserbewegungen aus tieferen Bodenschichten beeinflusst werden (Centeno et al. 2010). Laut Myburgh (2003) ist mit Trockenstress zu rechnen, sobald die Bodenmatrixpotentiale unter  $-70$  kPa fallen, was bei dem gemittelten Bodenmatrixpotentialverlauf in 50 cm Bodentiefe, ab Anfang Juli 2015, der Fall war. In 100 cm Bodentiefe wurde diese Untergrenze erst Anfang August 2015 erreicht, in 150 cm Tiefe während des gesamten Untersuchungszeitraums nie.

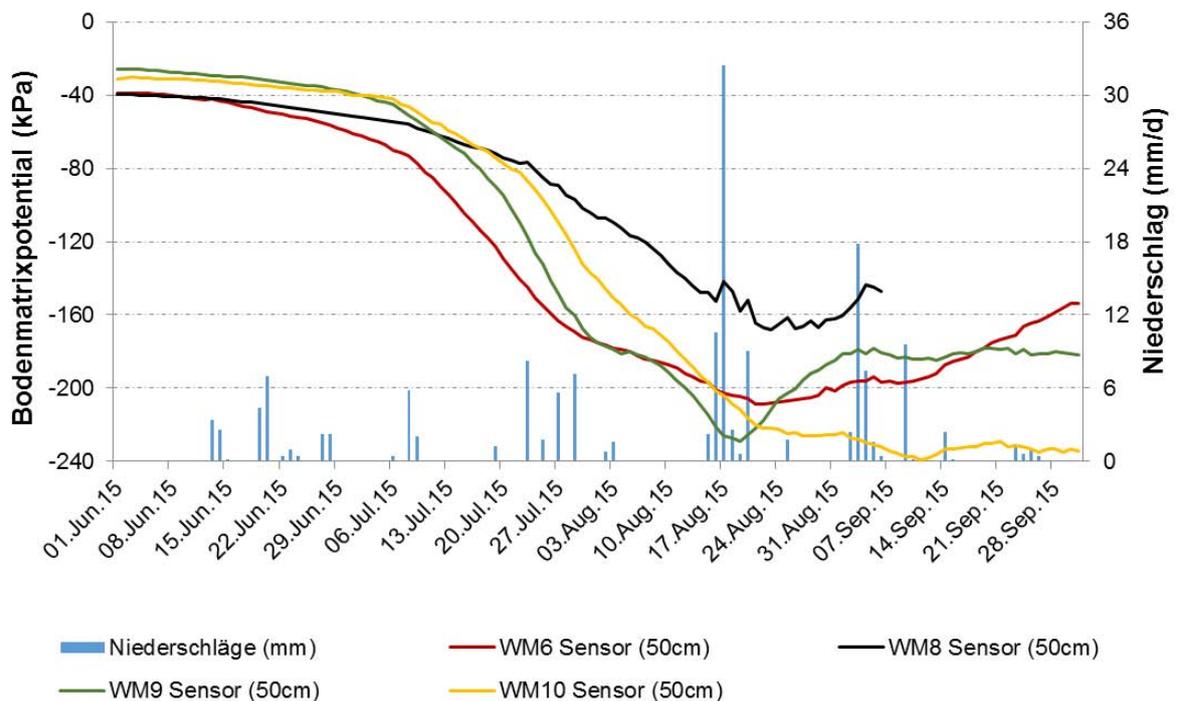


**Abbildung 40:** Gemittelte Bodenmatrixpotentialverläufe (aus den Tagesmittelwerten der Watermark-Sensoren Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 5 berechnet) der Auswertereihe Nr. 4 in 50, 100, und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

### **Versuchsstandort Sandgrube – Auswertereihe Nr. 6:**

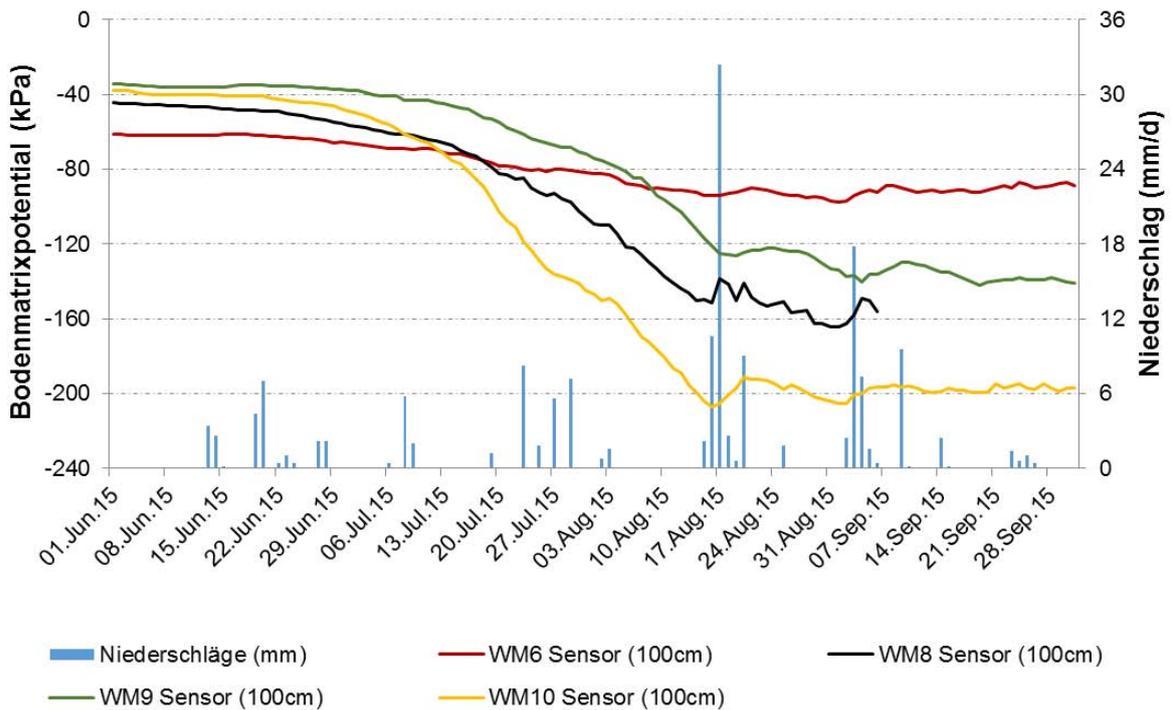
In der Auswertereihe Nr. 6 wurde der Watermark-Sensor Nr. 7 (WM7) für die weitere Datenauswertung nicht herangezogen, da in 50 und 150 cm Bodentiefe die Werte schon am Beginn der Aufzeichnungen bei circa  $-120$  kPa starteten, sich innerhalb von wenigen Wochen dem minimal aufgezeichneten Wert von  $-255$  kPa annäherten und durchgehend in diesem Messbereich verweilten. Im Vergleich zu den anderen Watermark-Sensoren der Auswertereihe Nr. 6 konnte bei weitem keine zufriedenstellende Übereinstimmung in den genannten Bodentiefen erzielt werden. Ob der Sensor nicht in einem guten Kontakt zum Boden stand oder heterogene Bodenverhältnisse für die Abweichungen verantwortlich waren, konnte nicht festgestellt werden. Beim Watermark-Sensor Nr. 8 (WM8) wurde bei der Auswertung festgestellt, dass nur bis zum 06. September 2015 Messwerte aufgezeichnet wurden. Dadurch war auch keine lineare Interpolation bis zum Ende des Untersuchungszeitraums möglich. Der Bodenmatrixpotentialverlauf des WM8 endet somit ab diesem Datum in den dargelegten Abbildungen.

Interessant war – fast identisch zu den Auswertungen der Auswertereihe Nr. 4 – dass die untersuchten Bodenmatrixpotentialverläufe, zwischen Anfang Juli 2015 und Mitte August 2015, in 50 cm Bodentiefe begannen sprunghaft abzusinken, deren Bodenmatrixpotentiale also konstant negativer wurden (Abbildung 41). Somit erreichten die Bodenmatrixpotentialverläufe der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8) und Nr. 9 (WM9) Mitte August 2015 ihre absoluten Tiefststände. Nach den ersten großen Niederschlagsmengen zwischen dem 15. und 20. August 2015 wurden die Bodenmatrixpotentiale in weiterer Folge wieder positiver. Eine Ausnahme bildete der Bodenmatrixpotentialverlauf des Watermark-Sensors Nr. 10 (WM10), welcher in der ausgewerteten Zeitperiode kontinuierlich bis zum 12. September 2015 auf  $-238$  kPa absank und folglich bis zum Ende des Untersuchungszeitraums in der Nähe dieses Messwertes stagnierte. Er reagierte somit überhaupt nicht auf die erste große Niederschlagsperiode vom 15. bis 20. August 2015.

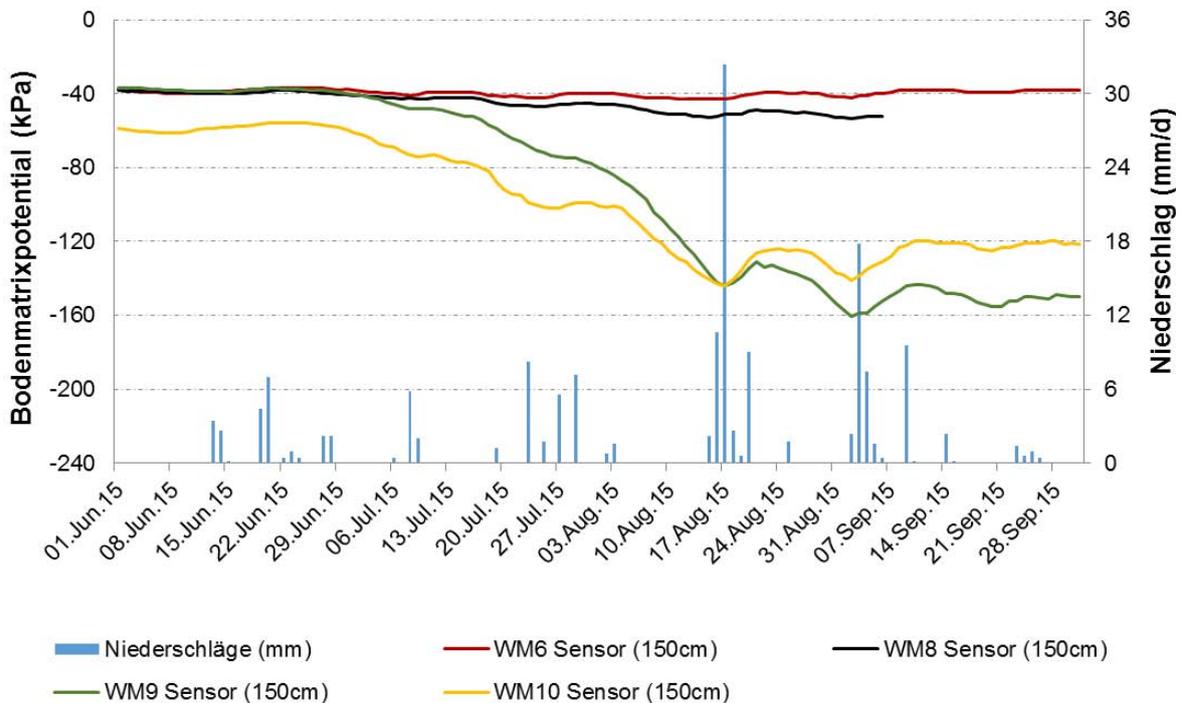


**Abbildung 41:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

In 100 cm Bodentiefe war feststellbar, dass die untersuchten Watermark-Sensoren größere Schwankungen – als jene in der Auswertereihe Nr. 4 – registrierten, mit Ausnahme des WM6, welcher von diesem Trend abwich (Abbildung 42). Der WM6 verhielt sich in 100 cm Tiefe über den gesamten Untersuchungszeitraum statisch und beschränkte sich auf einen Messbereich von  $-64$  bis  $-97$  kPa. Dennoch wurden die zwei großen Niederschlagsperioden während des Untersuchungszeitraums von allen Watermark-Sensoren der Auswertereihe Nr. 6 in 100 cm Bodentiefe stark bis geringfügig angezeigt, im Gegensatz zu den Sensoren der Auswertereihe Nr. 4, wo kaum Reaktionen festgestellt werden konnten. In 150 cm Bodentiefe war die Reaktion auf die ersten (Mitte August 2015) und zweiten großen Niederschlagsmengen (Anfang September 2015) bei dem WM9 und dem WM10 deutlich feststellbar (Abbildung 43). Der WM6 und der WM8 verhielten sich in 150 cm Bodentiefe sehr statisch in einem Messbereich von  $-37$  bis  $-53$  kPa.

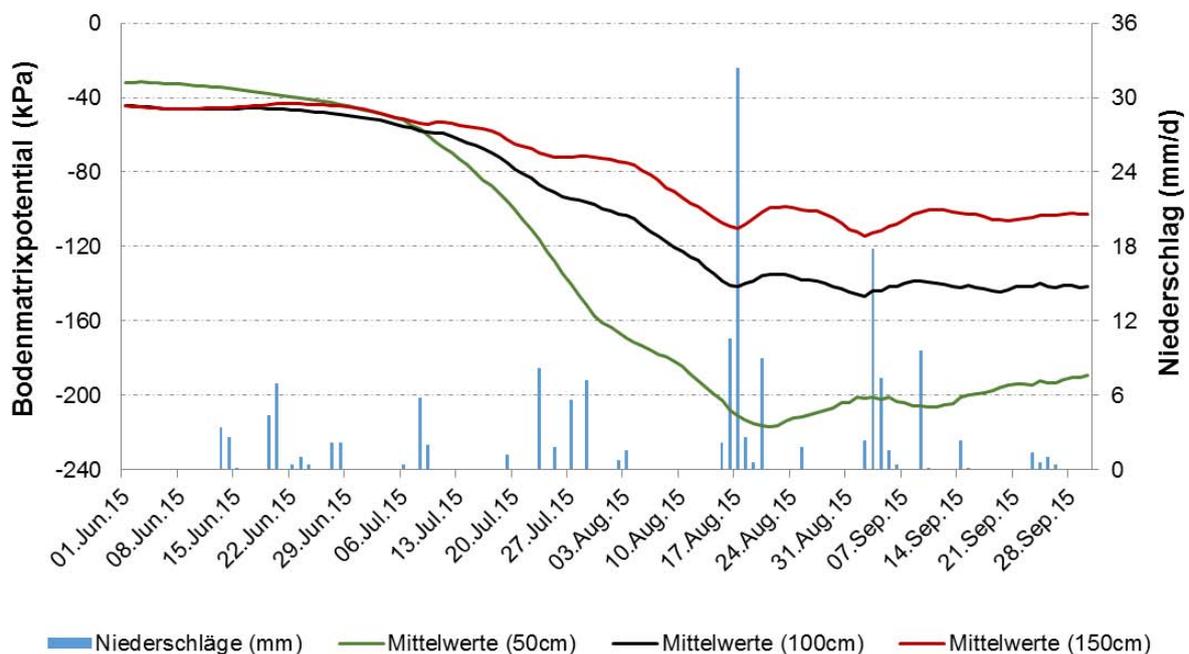


**Abbildung 42:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.



**Abbildung 43:** Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Die gemittelten Bodenmatrixpotentiale, welche aus den untersuchten Watermark-Sensoren der Auswertereihe Nr. 6 berechnet wurden, waren jenen in der Auswertereihe Nr. 4 sehr ähnlich. Der WM8 wurde in dieser Auswertung jedoch nicht berücksichtigt, da er nur bis zum 06. September 2015 Messwerte lieferte. Die Bodenmatrixpotentiale in 50 cm Bodentiefe waren während des Untersuchungszeitraums, im Vergleich zu jenen in 100 und 150 cm Bodentiefe, negativer. Eine anfängliche Ausnahme bildete der Juni 2015 (Abbildung 44). Im Gegensatz zur Auswertereihe Nr. 4 wurde, neben der großen Niederschlagsperiode vom 15. bis 20. August 2015, auch die zweite große Regenperiode vom 02. bis 06. September 2015 in allen Bodentiefen registriert, wenn auch teilweise nur geringfügig und etwas verspätet. Dennoch konnte mit den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen die größte Übereinstimmung in 50 cm Bodentiefe gefunden werden, da der Bodenmatrixpotentialverlauf in dieser Tiefe bis zum Ende des Untersuchungszeitraums, nach Erreichen des Tiefststands Mitte August 2015, kontinuierlich anstieg, was sich mit dem Verlauf der Pflanzenwasserpotentiale deckte. Im Gegensatz zur Auswertereihe Nr. 4 fiel auch der mittlere Bodenmatrixpotentialverlauf in 150 cm Bodentiefe, ab Anfang August 2015, unter die Trockenstressgrenze von  $-70$  kPa.



**Abbildung 44:** Gemittelte Bodenmatrixpotentialverläufe (aus den Tagesmittelwerten der Watermark-Sensoren Nr. 6, Nr. 9 und Nr. 10 berechnet) der Auswertereihe Nr. 6 in 50, 100, und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Allgemein kann festgehalten werden, dass die Watermark-Sensoren für die Ermittlung von Trockenstressbedingungen bzw. in weiterer Folge für die Bewässerungssteuerung nicht geeignet waren. Niederschläge wurden unzureichend

registriert. Dafür wären Messungen in den oberen Bodenschichten (0 bis 40 cm) notwendig gewesen, wie auch die Auswertung der SM1-Sensoren bestätigt.

### **5.3.2. Verlauf der „Scaled Frequency Units“**

Im Gegensatz zu den Watermark-Sensoren war bei den SM1-Sensoren die Datenaufzeichnung lückenlos, in 15-minütigen Intervallen konnten die gemessenen SFU-Werte online abgerufen werden. Somit musste keine lineare Interpolation vorgenommen werden, um fehlende Daten abzuschätzen. Damit die erhaltenen SFU-Werte in Relation zu den Tagesniederschlagsmengen gesetzt werden konnten, wurden für alle messbaren Bodentiefen (10 bis 150 cm) Tagesmittelwerte berechnet.

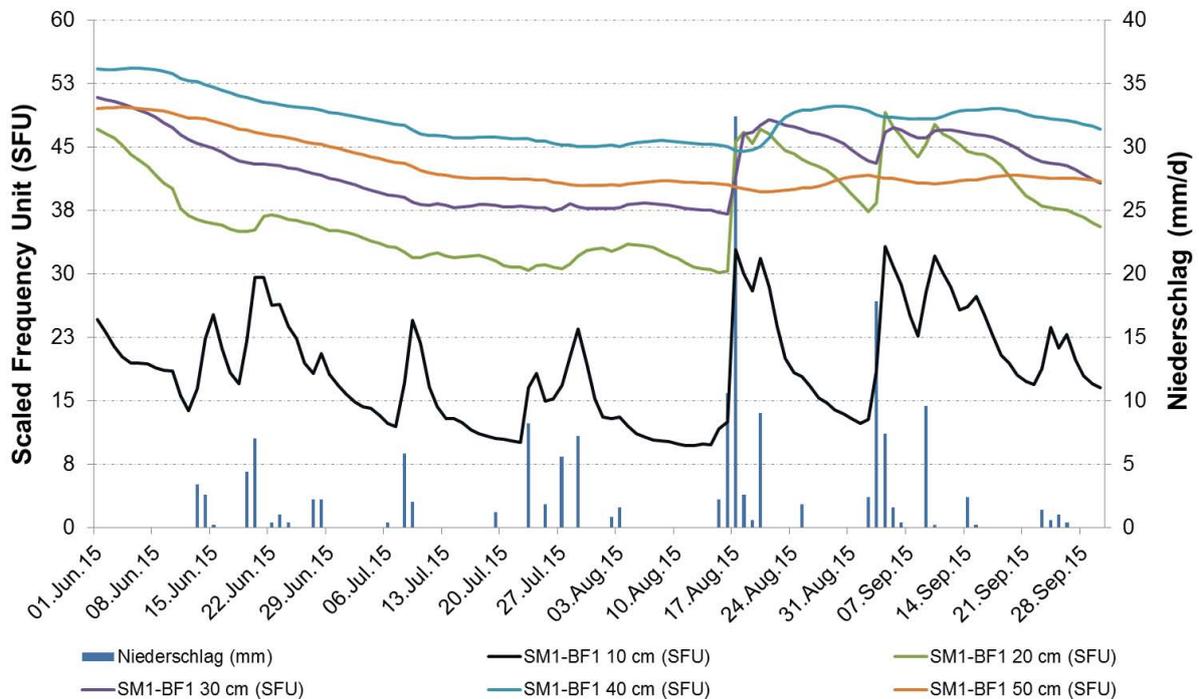
Die Kalibrierung der SM1-Sensoren, zur Bestimmung von Bodenwasseranteilen, war nicht möglich, da keine Vergleichswerte in der Literatur vorhanden waren und keine Feldfunktion erarbeitet wurde.

#### **Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 4:**

In der Auswertereihe Nr. 4 des Versuchsstandorts Sandgrube befand sich der SM1-BF1. Der Verlauf in 10 cm Bodentiefe stimmte sehr gut mit den täglichen Niederschlagsmengen überein (Abbildung 45). Zum großen Teil wurden in dieser Tiefe auch sehr geringe Niederschlagsmengen (kleiner als 5 mm pro Tag) durch den SM1-BF1 wahrgenommen. Allgemein schwankten während des Untersuchungszeitraums die gemessenen Werte in der besagten Tiefe sehr stark und zwar um bis zu 23 SFUs, wobei am 12. August 2015 mit 9,7 SFU der geringste und am 04. September 2015 mit 33,2 SFU der höchste Wert aufgezeichnet wurde. Generell ist der Schwankungsbereich des Wassergehaltes in atmosphärennahen Bodenschichten am größten und nimmt mit zunehmender Bodentiefe ab, was auch an den SFU-Tagesmittelwertverläufen in tieferen Bodenschichten erkennbar war, welche nicht mehr so starke Messwerteschwankungen registrierten. In 20 und 30 cm Bodentiefe reagierte der SM1-BF1 auf kleinere Niederschlagsmengen nicht mehr so deutlich. Dennoch sprang der Sensor in diesen Tiefen sprunghaft auf die großen Niederschlagsmengen zwischen dem 15. bis 20. August 2015 und zwischen dem 02. und 06. September 2015 an. Der Verlauf in 40 cm Bodentiefe reagierte nur mehr deutlich auf die Regenperiode, welche Mitte August 2015 stattfand. Beim Verlauf in 50 cm hingegen konnten kaum noch Niederschlagsereignisse registriert werden.

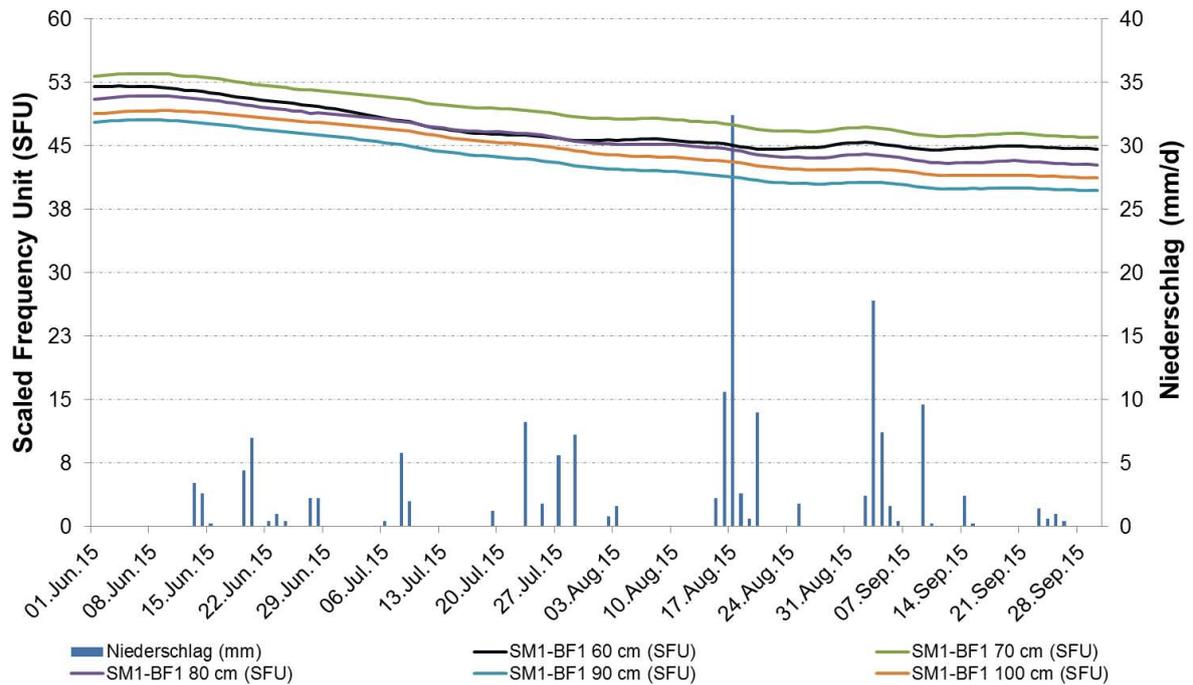
Generell wurden in 10 cm Bodentiefe die geringsten SFU-Tagesmittelwerte im Vergleich zu den anderen Tiefen detektiert. Dies legte den Schluss nahe, dass in dieser Tiefe die Wasserspeicherfähigkeit sehr eingeschränkt war. Interessant war, dass die SFU-Tagesmittelwerte in 50 cm Bodentiefe im gesamten Untersuchungszeitraum unter jenen in 40 cm Bodentiefe lagen. Ab dem großen Niederschlagsereignis zwischen dem 15. und 20. August 2015 lagen die SFU-Werte in 50 cm Tiefe auch zum Teil unter jenen in 20 und 30 cm Bodentiefe. Dies könnte auf den vergleichsweise geringen Porenanteil in 50 cm Bodentiefe (Tabelle 8) und auf die damit einhergehende Wasserdurchlässigkeit zurückgeführt werden.

Dennoch sollte angemerkt werden, dass ohne Kalibrierung der SM1-Sensoren kein sicherer Bezug zu dem tatsächlichen Wasseranteil generiert werden kann.

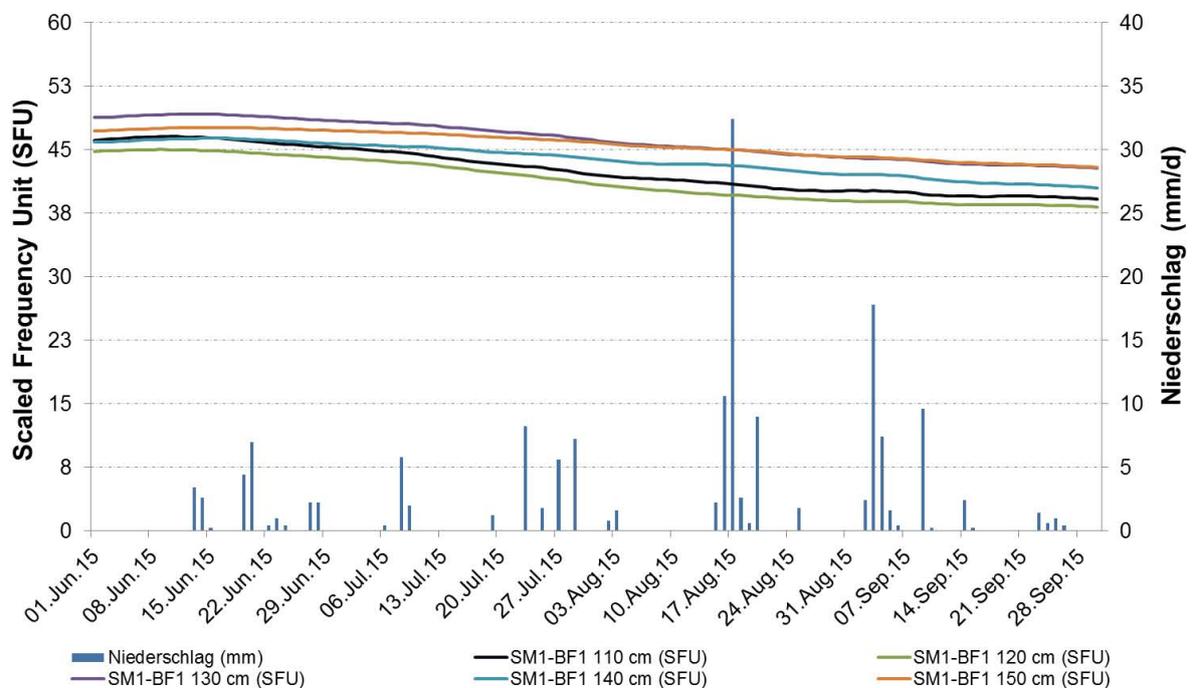


**Abbildung 45:** SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 10, 20, 30, 40 und 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Die berechneten SFU-Tagesmittelwertverläufe in 60 bis 100 cm Bodentiefe verzeichneten einen sehr geringfügigen Abfall bis zu den ersten großen Niederschlagsmengen zwischen dem 15. und 20. August 2015 (Abbildung 46). Erst nach Versickerung dieser Niederschläge stiegen die SFU-Werte wieder minimal an, erreichten ein bestimmtes Messniveau und stagnierten dort bis zum Ende des Untersuchungszeitraums. Unterstützt wurde diese Stagnation durch die Niederschlagsversorgung aus den starken Regenereignissen zwischen dem 02. und 06. September 2015. Die geringen Niederschläge im Juni und Juli 2015 erreichten die Bodentiefe von 60 bis 100 cm Bodentiefe kaum bis gar nicht, erst stärkere Niederschlagsperioden zeigten ihren Einfluss. Die SFU-Tagesmittelwertverläufe in 110 bis 150 cm Bodentiefe wurden von sämtlichen Niederschlagsereignissen während des Untersuchungszeitraums gar nicht beeinflusst (Abbildung 47). Die Verläufe sanken vom 01. Juni 2015 bis zum 30. September 2015 kontinuierlich ab, wodurch geschlussfolgert werden konnte, dass die Niederschlagsmengen während des Untersuchungszeitraums zu gering waren, um die untersten gemessenen Bodenschichten zu erreichen. Generell wurden durch den SM1-BF1 in den Messtiefen 110 bis 150 cm geringere SFU-Werte als in den Messtiefen 60 bis 100 cm festgestellt.



**Abbildung 46:** SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 60, 70, 80, 90 und 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

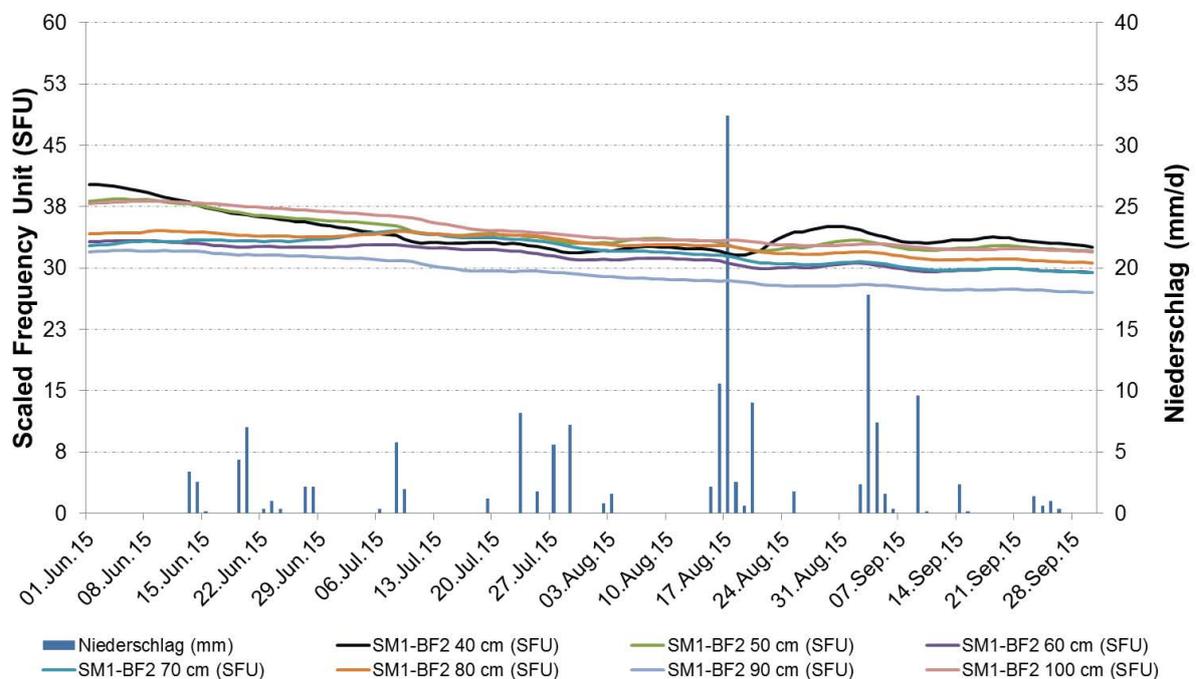


**Abbildung 47:** SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 110, 120, 130, 140 und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

## Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 6:

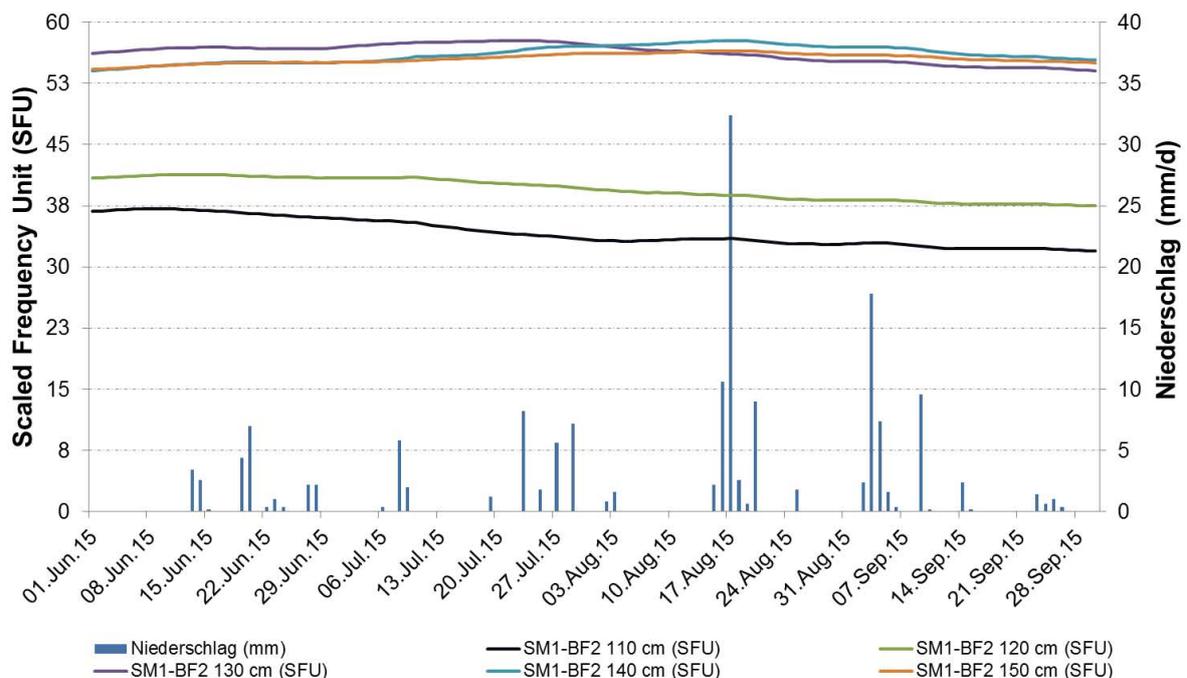
In der Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube befand sich der SM1-BF2. Bei diesem war die obere Messplatine defekt und daher konnten die Messtiefen 10 bis 30 cm für die Auswertung nicht herangezogen werden. Diese Bodentiefen wären vor allem für die Beurteilung der Auswirkungen der Niederschlagsmengen auf den Bodenwasserhaushalt interessant gewesen, da, wie bei der Auswertung des SM1-BF1 ersichtlich war, vor allem diese obersten Bodenschichten auf Niederschlagsereignisse am deutlichsten reagierten.

Der SFU-Tagesmittelwertverlauf in 40 cm Bodentiefe zeigte erwartungsgemäß die stärkste Reaktion auf die Niederschläge, wobei lediglich die großen Niederschlagsmengen zwischen dem 15. und 18. August 2015 eine eindeutige Steigerung des Verlaufs bewirkten (Abbildung 48). Ähnlich zu den SFU-Tagesmittelwertverläufen in 60 bis 100 cm Bodentiefe des SM1-BF1 verhielten sich die Verläufe des SM1-BF2 in denselben Tiefen. Bis zu der Niederschlagsperiode am Anfang der zweiten Augushälfte 2015 sanken die Verläufe kontinuierlich ab, um nach der Versickerung dieser Niederschläge minimal anzusteigen und bis zum 30. September 2015 auf diesem Niveau zu stagnieren. Die vom SM1-BF2 in der Auswertereihe Nr. 6 ermittelten SFU-Werte in 60 bis 100 cm Tiefe waren jedoch deutlich geringer im Vergleich zu jenen in der Auswertereihe Nr. 4.



**Abbildung 48:** SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF2 der Auswertereihe Nr. 6 in 40, 50, 60, 70, 80, 90 und 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Die SFU-Tagesmittelwertverläufe in 110, 120 und 130 cm Messtiefe sanken während des Untersuchungszeitraums kontinuierlich ab, wenn auch nur marginal (Abbildung 49). Dieses Phänomen konnte auch schon in der Auswertereihe Nr. 4 in den tiefsten bemessenen Bodenschichten beobachtet werden. Dies ließ den Schluss zu, dass die Niederschlagsmengen innerhalb des Untersuchungszeitraums diese Bodentiefen nicht erreichten. Diesem Trend stehen die geringfügigen Anstiege der Verläufe in 140 und 150 cm Bodentiefe bis zum 17. August 2015 entgegen, welche jedoch nicht von den Niederschlagsmengen während des Untersuchungszeitraums beeinflusst wurden, sondern von Niederschlägen vor dem betrachteten Zeitraum oder von Wasserbewegungen aus tieferen Bodenschichten (aufsteigendes Kapillarwasser) stammen könnten. Im Gegensatz zu der Auswertereihe Nr. 4 waren die SFU-Tagesmittelwerte in 130, 140 und 150 cm Messtiefe deutlich höher als in allen anderen gemessenen Tiefen, was vermutlich an einer hohen Wasserspeicherkapazität in diesen Bodentiefen lag.



**Abbildung 49:** SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF2 der Auswertereihe Nr. 6 in 110, 120, 130, 140 und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen.

Aus dem Umstand, dass in der Auswertereihe Nr. 6 im Vergleich zur Auswertereihe Nr. 4, z.B. in 40 bis 100 cm Bodentiefe, niedrigere SFU-Werte im Verlauf des Untersuchungszeitraums festgestellt wurden, lässt sich nicht ableiten, dass die Wasserversorgung der Reben dadurch verbessert wurde. Fast identische frühmorgendliche Blatt- und mittägliche Stammwasserpotentialmessungen wurden in beiden Auswertereihe festgestellt. Dies lag daran, dass der vermutlich höhere Wasservorrat (ausgedrückt in SFU-Werten) in der Auswertereihe Nr. 4 entweder nur unter starkem Stress, also mit niedrigen Matrixpotentialwerten, oder gar nicht aufgenommen werden konnte.

### **5.3.3. Bodenphysikalische Kennwerte**

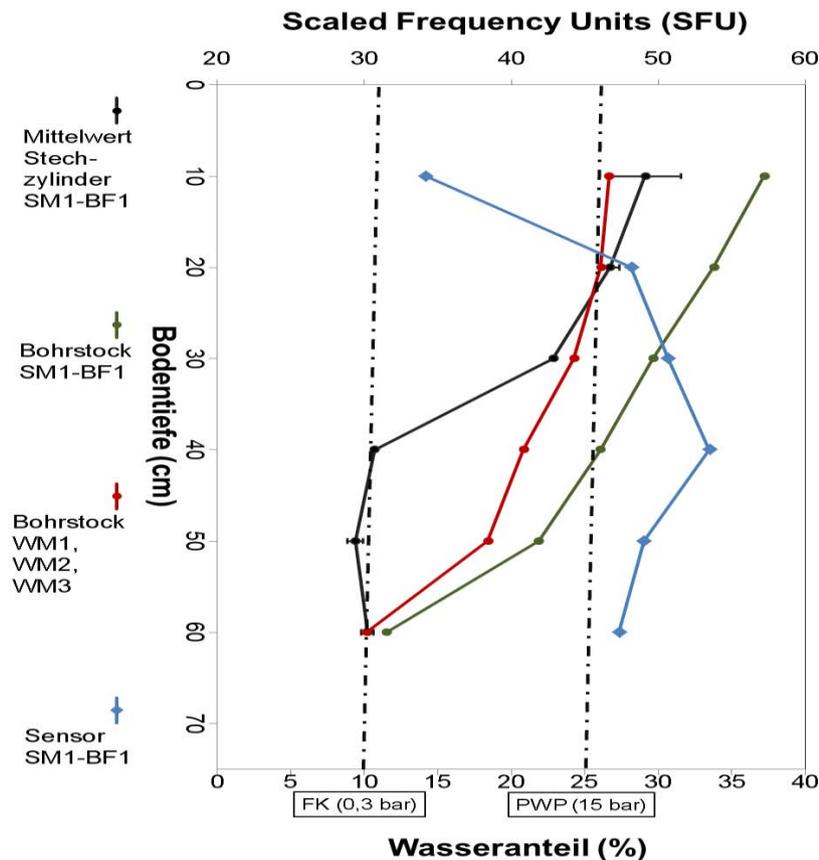
Die bodenphysikalischen Laboranalysen der Stechzylinder- bzw. Bohrstockproben des Versuchsstandorts Sandgrube dienten in erster Linie der Gewinnung von Referenzwerten, um die Messwerte der Bodenwassersensoren – im speziellen die der SM1-Sensoren – besser interpretieren zu können. Die Auswertungen der Bohrstockproben (Feststoffdichte und Korngrößenverteilung) des Versuchsstandorts Loibenberg waren zur Ermittlung ergänzender Informationen von Nutzen, da für den Standort keine Bodenwassersensoren zur Verfügung standen. Daher wurden am Versuchsstandort Loibenberg nur die Bohrstockbodenproben der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner ausgewertet.

## **Wasseranteil**

### **Versuchsstandort Sandgrube Auswertereihe Nr. 4:**

Die ungestörten und gestörten Proben zur Bestimmung des Wasseranteils wurden am 22. Oktober 2015 aus dem Boden in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF1 entnommen. Dadurch konnten die ermittelten Wasseranteile, besser gesagt deren Verläufe über das untersuchte Bodenprofil, zum einen untereinander und zum anderen mit den SFU-Tagesmittelwertverlauf des SM1-BF1 verglichen werden. Der gemittelte Wasseranteil aus den Stechzylindern, welche aus der Bodenprofilgrube entnommen wurden, sank von 10 bis 50 cm Bodentiefe ab (Abbildung 50). In der untersten untersuchten Bodenschicht stieg der gemittelte Wasseranteil jedoch geringfügig an (+ 0,8 Vol.-%). Auffallend war dabei vor allem die deutliche Reduzierung des Wasseranteils von 30 bis 40 cm Bodentiefe, dessen enormer Abfall bei der Auswertung der Bohrstockmischproben nicht beobachtet werden konnte. Auch der nachträglich ermittelte Porenanteil lieferte dafür keine schlüssige Erklärung. Die Unterschiede konnten somit nur auf die räumliche Variabilität der Bodeneigenschaften zurückgeführt werden. Außerdem konnte der höhere Wasseranteil in 60 cm gegenüber 50 cm Bodentiefe bei den Auswertungen der Bohrstockmischproben nicht festgestellt werden, die Wasseranteile waren um circa 8 bis 10 Vol.-% tiefer. Die Datenaufzeichnungen (SFU-Tagesmittelwerte) des BF1-SM1 lieferten dagegen am selben Tag kein kohärentes Ergebnis, da sie keinen vergleichbar sinkenden SFU-Tagesmittelwertverlauf mit zunehmender Bodentiefe (10 bis 40 cm) protokollierten.

Offensichtlich repräsentieren die SFU-Werte nicht den Wassergehaltsverlauf im Bodenprofil. Diesbezüglich sind weitere Untersuchungen erforderlich, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten.

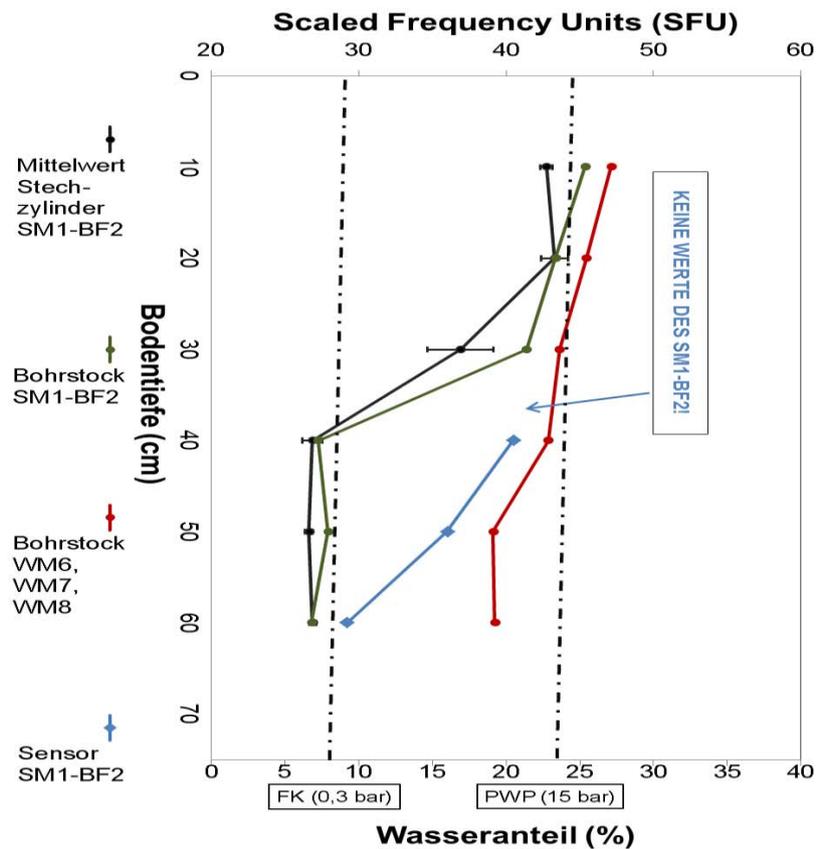


**Abbildung 50:** Wasseranteile und SFU-Werte der Auswertereihe Nr. 4 in 10 bis 60 cm Bodentiefe. Der blaue Verlauf gibt die SFU-Werte des SM1-BF1, der schwarze Verlauf gibt die berechneten Wasseranteile aus zwei Stechzylinderproben (inkl. Standardabweichung) und der grüne Verlauf bzw. rote Verlauf geben die berechneten Wasseranteile aus Bohrstockproben wieder. Der Bereich zwischen den schwarzen, gestrichelten Linien gibt die nutzbare Feldkapazität an, welche aus der Retentionsfunktion abgeleitet wurde.

### Versuchsstandort Sandgrube Auswertereihe Nr. 6:

Wasseranteile, als Referenzwerte für den SM1-BF2, wurden aus ungestörten und gestörten Bodenproben bestimmt. Diese wurden am 27. Oktober 2015 aus dem Boden – in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF2 – entnommen. Der berechnete gemittelte Wasseranteil aus den Stechzylindern, welche der Bodenprofilgrube entstammen, stieg in den oberen Bodenschichten (10 bis 20 cm) geringfügig an (Abbildung 51). In weiterer Folge nahm der Wasseranteil bis in eine Bodentiefe von 40 cm sprunghaft ab, gefolgt von einem weiteren unbedeutenden Abfall, um dann letztendlich in 60 cm Tiefe wieder minimal anzusteigen. Ähnliche Volumenprozentanteile über das gesamte Bodenprofil konnten bei einer Bohrstockmischprobe identifiziert werden. Diese berechneten Wasseranteile aus der Bohrstockprobe SM1-BF2 nahmen jedoch bis 40 cm Bodentiefe (ab 30 cm sehr stark) ab, wodurch der Wasseranteilsanstieg in den oberen ermittelten Bodentiefen (10 bis 20 cm) aus den Stechzylindern nicht bestätigt werden konnte. Auch von 40 bis 50 cm Tiefe nahm der Wasseranteil wieder minimal zu, um in weiterer Folge bis 60 cm Bodentiefe wieder

abzusinken, was nicht mit den Wasseranteilen aus den Stechzylindern zusammenpasste. Der ermittelte Wasseranteil aus der Bohrstockmischprobe WM6, WM7, WM8 fiel kontinuierlich von 10 bis 50 cm Bodentiefe ab und nahm von 50 cm bis 60 cm Bodentiefe um 0,11 Volumenprozent zu. Keine der im Labor ausgewerteten Wasseranteilsverläufe aus den Bodenproben stimmte mit dem Verlauf der SFU-Werte des SM1-BF2 überein. Der SM1-BF2 maß dabei nur ab einer Bodentiefe von 40 cm, da die obere Messplatte defekt war. Daher konnte nur ein begrenzter Messbereich mit den berechneten Wasseranteilen im Labor verglichen werden.



**Abbildung 51:** Wasseranteile und SFU-Werte der Auswertereihe Nr. 6 in 10 bis 60 cm Bodentiefe. Der blaue Verlauf gibt die SFU-Werte des SM1-BF2, der schwarze Verlauf gibt die berechneten Wasseranteile aus zwei Stechzylinderproben (inkl. Standardabweichung) und der grüne Verlauf bzw. rote Verlauf geben die berechneten Wasseranteile aus Bohrstockproben wieder. Der Bereich zwischen den schwarzen, gestrichelten Linien gibt die nutzbare Feldkapazität an, welche aus der Retentionsfunktion abgeleitet wurde.

## Trockendichte

Die Trockendichten für die Auswertereihen Nr. 4 bzw. Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube wurden jeweils aus zwei Stechzylinderproben, welche aus der Bodenprofilgrube in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF1 bzw. SM1-BF2 entnommen wurden, berechnet (Tabelle 5). Die mittlere Trockendichte der sechs untersuchten Tiefen betrug für die Auswertereihe Nr. 4  $1,4 \text{ g/cm}^3$  und für die Auswertereihe Nr. 6  $1,3 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabelle 5:** Mittelwerte der Trockendichten der Auswertereihen Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

Auswertereihe Nr. 4	
Bodentiefe (cm)	Mittelwert $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
10	1,4
20	1,4
30	1,4
40	1,4
50	1,5
60	1,5
<b>Mittelwert</b>	<b>1,4</b>

Auswertereihe Nr. 6	
Bodentiefe (cm)	Mittelwert $\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
10	1,3
20	1,4
30	1,3
40	1,4
50	1,3
60	1,4
<b>Mittelwert</b>	<b>1,3</b>

## Feststoffdichte

Die mittlere Feststoffdichte wurde für jede Bodentiefe aus zwei Pyknometerversuchen aus jeweils der gleichen gestörten Bodenprobe berechnet, um eventuell auftretende Messfehler zu eliminieren. Die Feststoffdichte wurden sowohl für den Versuchsstandort Sandgrube, als auch für den Versuchsstandort Loibenberg bestimmt.

### Versuchsstandort Sandgrube:

Die Feststoffdichten der jeweiligen Auswertereihe Nr. 4 bzw. Nr. 6 wurden aus gestörten Bodenproben, welche mit der Schaufel aus den Bodenprofilgruben in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF1 bzw. SM1-BF2 entnommen wurden, bestimmt. Die mittlere Feststoffdichte der sechs untersuchten Tiefen lag in der Auswertereihe Nr. 4 bei  $2,7 \text{ g/cm}^3$  und in der Auswertereihe Nr. 6 ebenfalls bei  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , wobei ähnliche Ergebnisse über das gesamte untersuchte Bodenprofil erzielt wurden (Tabelle 6). Auffallend war, dass in beiden Auswertereihen die mittlere Feststoffdichte in 60 cm Bodentiefe zunahm, um  $0,1 \text{ g/cm}^3$ .

**Tabelle 6:** Mittelwerte der Feststoffdichten der Auswertereien Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

<b>Auswertereihe Nr. 4</b>	
<b>Bodentiefe (cm)</b>	<b>Mittelwert <math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
10	2,7
20	2,7
30	2,7
40	2,7
50	2,7
60	2,8
<b>Mittelwert</b>	<b>2,7</b>

<b>Auswertereihe Nr. 6</b>	
<b>Bodentiefe (cm)</b>	<b>Mittelwert <math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
10	2,7
20	2,7
30	2,6
40	2,7
50	2,7
60	2,8
<b>Mittelwert</b>	<b>2,7</b>

### **Versuchsstandort Loibenberg:**

Die mittlere Feststoffdichte der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner betrug für die sechs untersuchten Tiefen 2,7 g/cm<sup>3</sup> (Tabelle 7). Für dessen Bestimmung wurden Bohrstockproben (Mischproben) der besagten Weingartenterrasse herangezogen. Auf eine Auswertung der Feststoffdichten in der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling wurde verzichtet.

**Tabelle 7:** Mittelwerte der Feststoffdichten der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

<b>Bodentiefe (cm)</b>	<b>Mittelwert <math>\rho_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>
10	2,7
20	2,7
30	2,6
40	2,7
50	2,6
60	2,7
<b>Mittelwert</b>	<b>2,7</b>

### **Porenanteil**

Die mittleren Porenanteile wurden aus den berechneten mittleren Trockendichten und mittleren Feststoffdichten in den jeweiligen Bodentiefen der beiden Auswertereien Nr. 4 und Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube ermittelt (Tabelle 8). Der mittlere Porenanteil der sechs untersuchten Tiefen ergab für die Auswertereihe Nr. 4 47,6 % und für die Auswertereihe Nr. 6 50,0 %.

**Tabelle 8:** Mittelwerte der Porenanteile der Auswertereien Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

<b>Auswertereihe Nr. 4</b>	
<b>Bodentiefe (cm)</b>	<b>Mittelwert <math>n_p</math> (%)</b>
10	48,0
20	48,1
30	48,0
40	49,9
50	44,7
60	47,0
<b>Mittelwert</b>	<b>47,6</b>

<b>Auswertereihe Nr. 6</b>	
<b>Bodentiefe (cm)</b>	<b>Mittelwert <math>n_p</math> (%)</b>
10	51,0
20	48,7
30	49,7
40	48,2
50	53,2
60	49,6
<b>Mittelwert</b>	<b>50,0</b>

Auffallend war, dass sich der mittlere Porenanteil in 50 cm Bodentiefe in beiden Auswertereien von jenen in den anderen analysierten Tiefen stark unterschied. In der Auswertereihe Nr. 4 war dieser im Verhältnis zu den anderen geringer, in der Auswertereihe Nr. 6 höher.

## Korngrößen

Die Korngrößenverteilung, wurde sowohl für den Versuchsstandort Sandgrube, als auch für den Versuchsstandort Loibenberg einmalig – exemplarisch für den gesamten Versuchsstandort – aus gestörten Bodenproben bestimmt.

### Versuchsstandort Sandgrube:

Für den Versuchsstandort Sandgrube dienten die gestörten Bodenproben, welche mit der Schaufel aus der frischen Bodenprofilgrube in der unmittelbaren Nähe des SM1-BF1 entnommen wurden, als Untersuchungsgegenstand zur Bestimmung der Korngrößenverteilung. Da der mittlere Grobbodenanteil ( $\geq 2$  mm) unter 10 % geschätzt wurde, konnte auf eine Grobbodenanalyse verzichtet werden. Die Korngrößenanalyse des Feinbodens ( $< 2$  mm) ergab einen mittleren Sandanteil von 14 %, einen mittleren Schluffanteil von 78 % und einen mittleren Tonanteil von 8 % über das gesamte untersuchte Bodenprofil (Tabelle 9).

**Tabelle 9:** Mittelwerte der Korngrößen des Feinbodens ( $< 2$  mm) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

<b>Tiefe (cm)</b>	<b>Sand (%)</b>	<b>Schluff (%)</b>	<b>Ton (%)</b>
10	14	77	9
20	14	77	10
30	14	80	6
40	14	79	7
50	15	75	10
60	15	78	7
<b>Mittelwert</b>	<b>14</b>	<b>78</b>	<b>8</b>

### Versuchsstandort Loibenberg:

Für den Versuchsstandort Loibenberg wurden die Bohrstockprobeentnahmen (Mischproben) der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner als Untersuchungsgegenstand für die Ermittlung der Korngrößenverteilung herangezogen. Der ermittelte mittlere Grobbodenanteil in der Terrasse LB-Grüner Veltliner betrug 11 % über das gesamte untersuchte Bodenprofil. Die Analyse des Feinbodens (< 2 mm, 89 %) ergab einen mittleren Sandanteil von 68 %, einen mittleren Schluffanteil von 25 % und einen mittleren Tonanteil von 7 % (Tabelle 10).

**Tabelle 10:** Mittelwerte der Korngrößen des Feinbodens (< 2 mm) der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner in 10 bis 60 cm Bodentiefe.

Tiefe (cm)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)
10	67	26	7
20	68	25	7
30	69	24	7
40	68	25	7
50	67	26	7
60	65	27	8
<b>Mittelwert</b>	<b>68</b>	<b>25</b>	<b>7</b>

### **Retentionsfunktion**

Für den Versuch mit dem Druckplattenapparat wurden ungestörte Stechzylinderbodenproben, aus den beiden Bodenprofilgruben in der unmittelbaren Nähe der SM1-BF1 (Auswertereihe Nr. 4) und SM1-BF2 (Auswertereihe Nr. 6) des Versuchsstandorts Sandgrube, herangezogen. Dabei wurden für jede Entnahmestelle jeweils zwei Stechzylinder pro Tiefe (10, 20, 30, 40, 50 und 60 cm) untersucht und deren Mittelwert berechnet. Die Auswertung des Druckplattenapparats und die daraus ableitbare Retentionsfunktion war deshalb von Bedeutung, da dadurch das theoretisch mögliche pflanzenverfügbare Bodenwasser (=nutzbare Feldkapazität) aus der Retentionsfunktion bestimmt werden konnte.

Die nutzbare Feldkapazität, gemittelt über das untersuchte Bodenprofil (10 bis 60 cm) bei einer angenommenen Feldkapazität von 0,3 bar, betrug in der Auswertereihe Nr. 4 15,5 Vol.-%, in der Auswertereihe Nr. 6 16,1 Vol.-% ( $nFK = FK - PWP$ ). Die jeweiligen Retentionsfunktionswertepaare für beide Auswertereien befinden sich in Tabelle 11 und Tabelle 12.

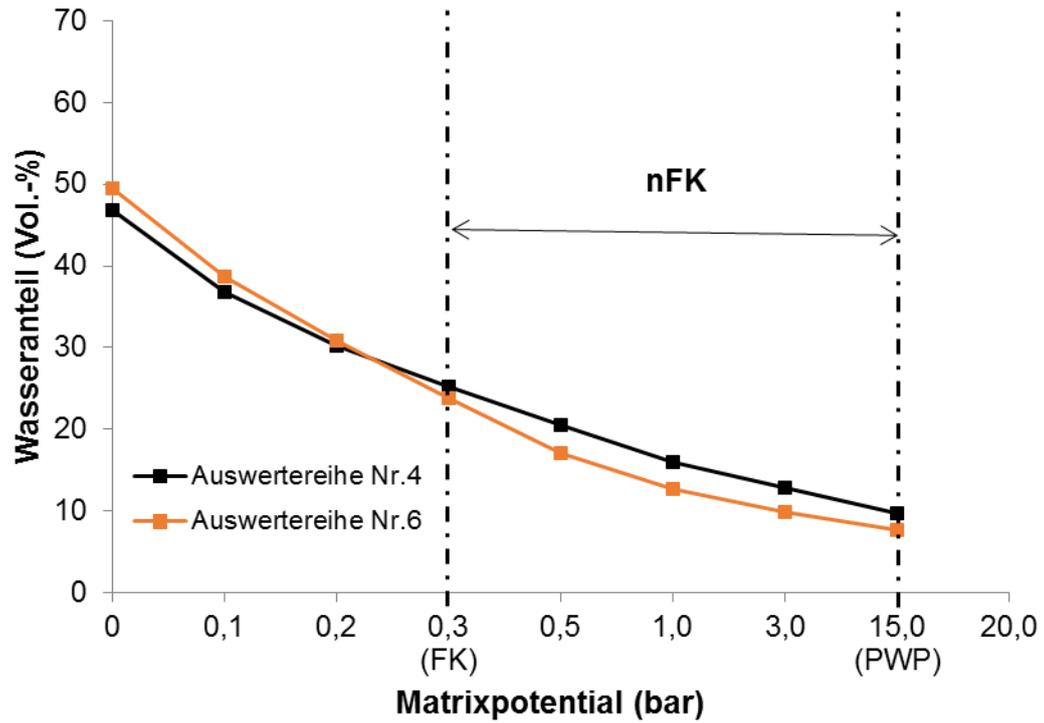
**Tabelle 11:** Retentionsfunktionswertepaare von 10 bis 60 cm Bodentiefe und deren Mittelwert über das gesamte Bodenprofil für die Auswertereihe Nr. 4 des Versuchsstandorts Sandgrube. Pro Tiefe jeweils aus zwei Stechzylinderproben im Labor bestimmt.

Einheit/Tiefe	Bodenmatrixpotential bzw. Wasseranteil (Mittelwerte)							
	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	3,0	15,0
Druck (bar)	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	3,0	15,0
pf [log(bar)]	0	2	2,3	2,5	2,7	3	3,5	4,2
10 cm (Vol.-%)	48,1	36,5	30,7	26,8	22,1	17,4	14,1	8,8
20 cm (Vol.-%)	48,6	36,8	30,7	27,0	22,3	18,4	15,0	11,2
30 cm (Vol.-%)	48,3	38,7	32,2	26,2	21,6	16,8	12,4	8,3
40 cm (Vol.-%)	47,1	38,1	31,1	25,9	21,1	16,8	12,9	10,2
50 cm (Vol.-%)	44,1	35,2	28,2	22,0	17,1	13,7	11,1	9,7
60 cm (Vol.-%)	44,3	35,6	28,8	23,4	18,6	12,7	11,6	10,0
<b>Mittelwert (alle Tiefen)</b>	46,8	36,8	30,3	25,2	20,5	16,0	12,9	9,7

**Tabelle 12:** Retentionsfunktionswertepaare von 10 bis 60 cm Bodentiefe und deren Mittelwert über das gesamte Bodenprofil für die Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube. Pro Tiefe jeweils aus zwei Stechzylinderproben im Labor bestimmt.

Einheit/Tiefe	Bodenmatrixpotential bzw. Wasseranteil (Mittelwerte)							
	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	3,0	15,0
Druck (bar)	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	3,0	15,0
pf [log(bar)]	0	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0	3,5	4,2
10 cm (Vol.-%)	48,6	33,8	26,4	22,4	18,0	14,3	11,8	8,0
20 cm (Vol.-%)	45,3	32,5	26,2	21,9	17,7	14,3	11,4	9,9
30 cm (Vol.-%)	47,0	40,8	36,0	28,1	19,4	13,3	9,7	6,2
40 cm (Vol.-%)	51,5	41,8	34,7	26,1	17,7	12,7	9,3	7,5
50 cm (Vol.-%)	52,0	41,6	31,2	21,7	14,4	10,6	8,1	7,1
60 cm (Vol.-%)	52,6	41,9	30,6	22,3	15,2	11,3	8,4	7,2
<b>Mittelwert (alle Tiefen)</b>	49,5	38,7	30,9	23,7	17,1	12,7	9,8	7,6

Die Retentionsfunktion der Auswertereihe Nr. 4 und der Auswertereihe Nr. 6, berechnet aus allen untersuchten Bodentiefen, befindet sich in der Abbildung 52. Die Feldkapazität wurde dabei bei 0,3 bar festgelegt.



**Abbildung 52:** Retentionsfunktion gemittelt über das gesamte Bodenprofil (0 bis 60 cm) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube.

## **5.4. Zusammenhang zwischen Pflanzenwasserpotentialen der Rebe und dem Wasserstatus des Bodens**

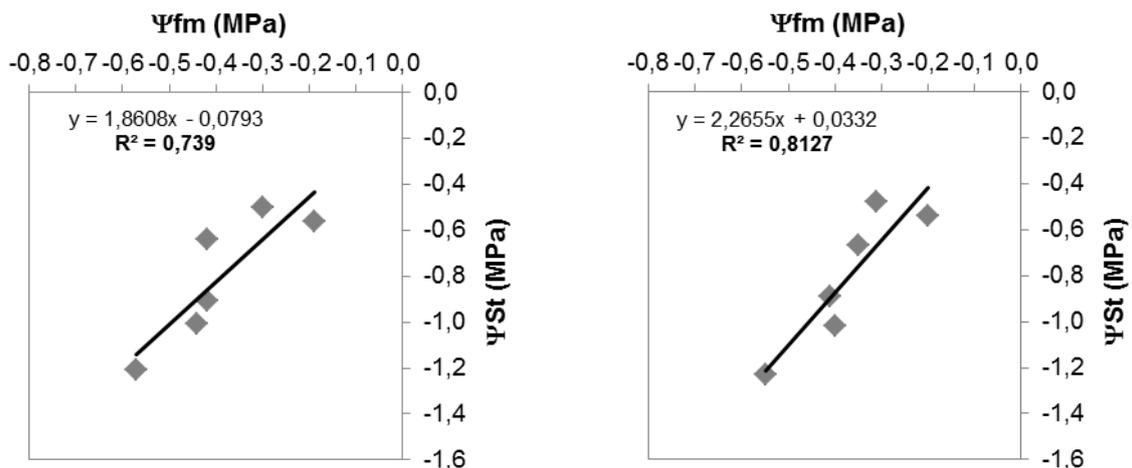
Im folgendem wurden mögliche funktionale Zusammenhänge zwischen den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen (frühmorgendliches Blattwasserpotential und mittägliches Stammwasserpotential) und den durch die Sensoren ermittelten Bodenwasserstatus (Bodenmatrixpotential und SFU-Werte) am Versuchsstandort Sandgrube untersucht, um bei sehr engen Korrelationen, die Möglichkeit in Betracht zu ziehen, die Messungen mit der Scholanderdruckkammer durch jene mit den Bodenwassersensoren zu ersetzen. Einleitend wurden die frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den mittäglichen Stammwasserpotentialen in Zusammenhang gebracht.

### **5.4.1. Korrelation der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den mittäglichen Stammwasserpotentialen**

Da im Zuge der Masterarbeit zwei Methoden zur Bestimmung des Pflanzenwasserpotentials eingesetzt wurden, war es interessant herauszufinden, ob ein sehr starker linearer Zusammenhang zwischen den erhaltenen Messwerten der beiden Bestimmungsmethoden bestand. Deshalb wurden an denselben Messtagen die frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den mittäglichen Stammwasserpotentialen korreliert. Pro Messtermin wurden für die Korrelation jeweils die berechneten Mittelwerte aus den Einzelmessungen in beiden Versuchsstandorten herangezogen. Generell sind die dargelegten Korrelationsergebnisse zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen und den mittäglichen Stammwasserpotentialen jedoch mit Vorsicht zu interpretieren. Da nämlich die mittäglichen Stammwasserpotentiale nur in zweiwöchentlichen Intervallen gemessen wurden und erst Mitte Juli 2015 mit deren Messung begonnen wurde, standen nur wenige korrelierte Wertepaare zur Verfügung, was die Aussagekraft der erschlossenen Ergebnisse schwinden ließ.

#### **Versuchsstandort Sandgrube:**

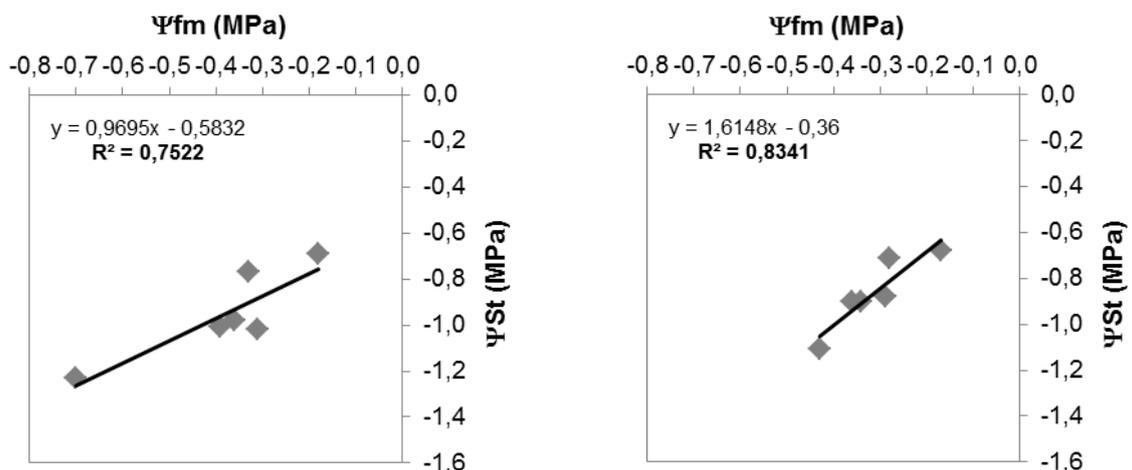
Die Korrelation der Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale ergab für die Auswertereihe Nr. 4 einen positiv linearen Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von 0,739. In der Auswertereihe Nr. 6 wurde ebenso ein positiv linearer Zusammenhang mit einem noch höheren  $R^2$  von 0,8127 festgestellt (Abbildung 53). Es konnte somit ein starke Korrelation festgestellt werden, trotz der möglichen Beeinflussung der Stammwasserpotentiale durch die um die Mittagszeit vorherrschenden Witterungsbedingungen. Im Zuge eines Anstiegs der gemittelten frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale, konnte somit auch eine Erhöhung der gemittelten mittäglichen Stammwasserpotentiale festgestellt werden und vice versa.



**Abbildung 53:** Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{st}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 (links) und der Auswertereihe Nr. 6 (rechts).

### Versuchsstandort Loibenberg:

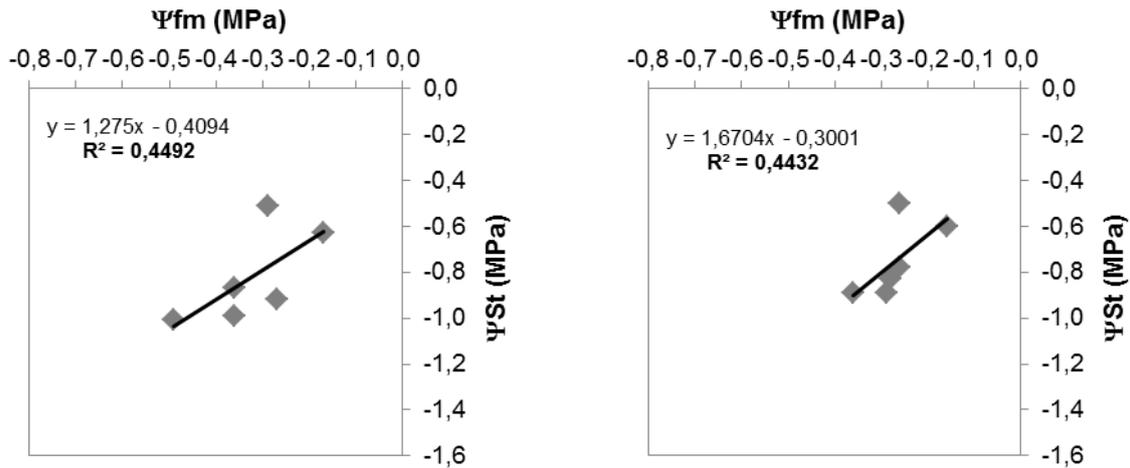
Am Versuchsstandort Loibenberg wurde in der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner in der nicht-berechneten ( $R^2=0,7522$ ), wie auch in der berechneten ( $R^2=0,8341$ ) Auswertereihe ein enger positiver Zusammenhang zwischen den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen und den gemittelten mittäglichen Stammwasserpotentialen festgestellt (Abbildung 54).



**Abbildung 54:** Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{st}$ ) der nicht-berechneten Auswertereihe (links) und der berechneten Auswertereihe (rechts) der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.

In der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling konnte im Zuge der Korrelation zwischen den gemittelten frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen und den gemittelten mittäglichen Stammwasserpotentialen in beiden Auswertereien (nicht-berechnet und

berechnet) kein starker Zusammenhang festgestellt werden (Abbildung 55). Die ermittelten Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) waren mit 0,4492 bzw. 0,4432 gering. Dabei sorgte das Wertepaar, welches am 10. September 2015 ermittelt wurde, für eine Abweichung von einem engeren Zusammenhang. An diesem Messtermin wurden relativ hohe Stammwasserpotentiale in beiden Auswertereien der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling gemessen, welche in keiner Relation zu den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen standen. Was der genaue Grund für diese Abweichung war konnte nicht festgestellt werden.



**Abbildung 55:** Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{St}$ ) der nicht-berechneten Auswertereihe (links) und der berechneten Auswertereihe (rechts) der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

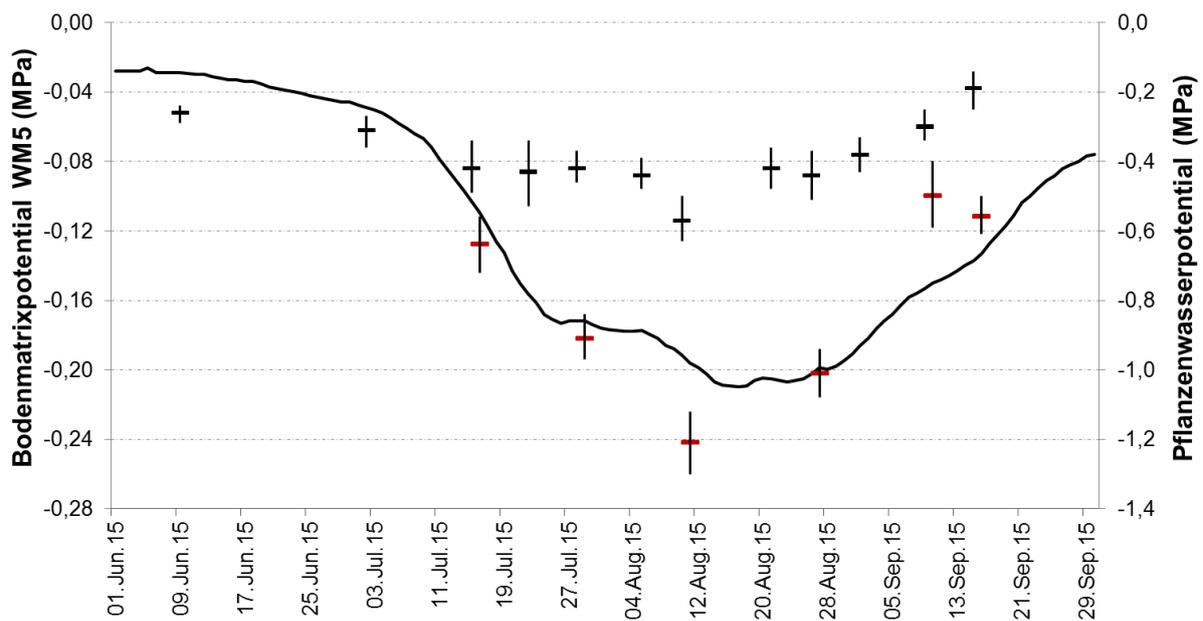
Es wurde somit an allen Versuchsstandorten, mit Ausnahme der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling, ein starker Zusammenhang festgestellt. Zahlreiche Autoren (Van Zyl 1986, Williams und Baeza 2007, Gruber 2013, Heßdörfer 2015) berichten davon, dass die mittäglichen Pflanzenwasserpotentiale vom Wasserdampf-sättigungsdefizit beeinflusst werden, was auch in der vorliegenden Arbeit dargelegt werden konnte. Deshalb ist ein Austausch der beiden Bestimmungsmethoden des Pflanzenwasserpotentials nicht zielführend, auch wenn ein relativ starker Zusammenhang im Zuge der Korrelationen festgestellt werden konnte.

## **5.4.2. Korrelation zwischen dem Pflanzenwasserpotential und dem Bodenmatrixpotential**

Bei Betrachtung des Verlaufs der gemittelten Bodenmatrixpotentiale der Watermark-Sensoren über den Untersuchungszeitraum konnten in den beiden Auswertereien Nr. 4 und Nr. 6 die größten Schwankungen des Bodenmatrixpotentials in 50 cm Bodentiefe festgestellt werden (Abbildung 40 und Abbildung 44). Dabei stimmten, vor allem ab Anfang September 2015, die Bodenmatrixpotentialverläufe in 50 cm Mess-tiefe am besten mit dem Verlauf der mittleren Pflanzenwasserpotentiale überein. In 100 und 150 cm Bodentiefe konnten ab Anfang September 2015 in beiden Auswertereien kaum noch Reaktionen auf sich verändernde Trockenstressbedingungen festgestellt werden. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde im folgendem das Pflanzenwasserpotential mit dem in 50 cm Bodentiefe ermittelten Bodenmatrixpotential korreliert. Dadurch konnten schlussendlich auch die stärksten Korrelationen erzielt werden. Außerdem wurde in jeder Auswertereihe jener Watermark-Sensor für die Darstellung der Zusammenhänge ausgewählt, welcher am ehesten die ermittelten Ergebnisse der Pflanzenwasserpotentiale repräsentiert. Diese Entscheidung war darin begründet, dass die über den Untersuchungszeitraum berechneten Mittelwerte der Pflanzenwasserpotentiale aus 16 Einzelmessungen bestanden, während es sich bei den Watermark-Sensoren um punktuelle Messungen mit einer lückenhaften Datenaufzeichnung handelte. Somit wurden die im Zuge der Pflanzenwasserpotentialmessungen erhaltenen Messwerte als plausibler eingestuft, welche exakt den Wasserversorgungszustand der Weinreben widerspiegeln.

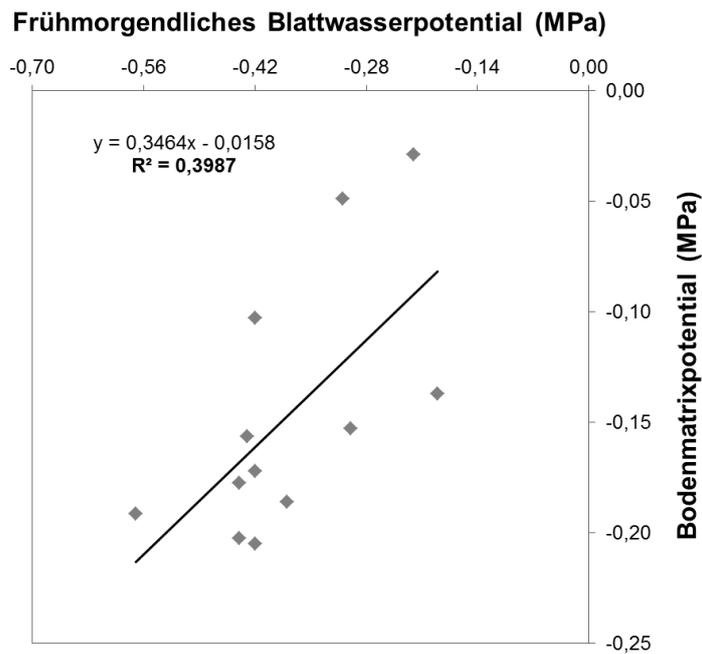
### **Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 4:**

In 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 konnte die größte Übereinstimmung, zu den berechneten Mittelwerten der Pflanzenwasserpotentiale, bei dem Bodenmatrixpotentialverlauf des Watermark-Sensors Nr. 5 (WM5) beobachtet werden (Abbildung 56). Dabei wurde in der ersten Hälfte des Untersuchungszeitraums, bis circa Mitte August 2015, eine Abnahme aller ermittelten Wasserpotentiale diagnostiziert, mit einer anschließenden Steigerung der Werte bis zum Ende des Untersuchungszeitraums.

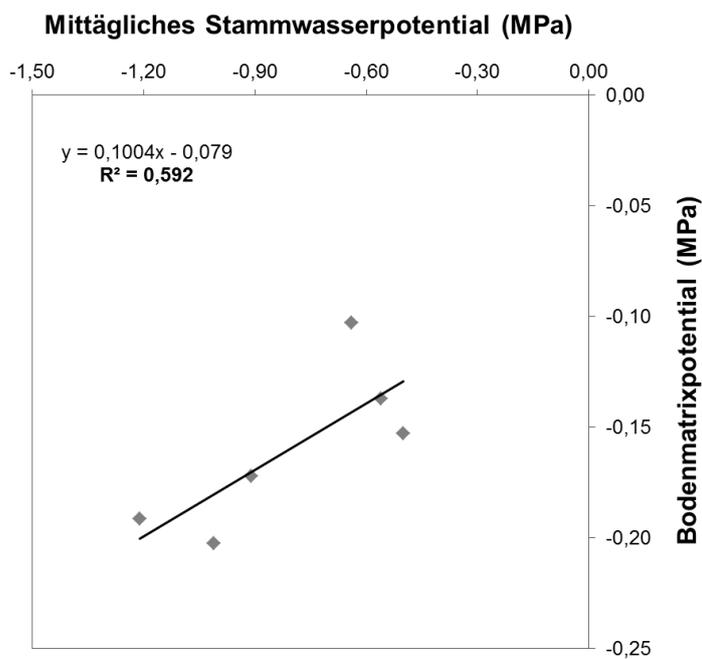


**Abbildung 56:** Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 (WM5) in 50 cm Bodentiefe in Verbindung mit den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale (schwarze Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) und den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale (rote Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt.

Aufgrund der relativ guten Übereinstimmung wurden die Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale und jene der mittäglichen Stammwasserpotentiale mit den Bodenmatrixpotentials (Tagesmittelwerte) des WM5 – an denselben Tagen innerhalb des Untersuchungszeitraums – korreliert. Dies ergab für die Korrelation mit den frühmorgendlichen Blattwasserpotentials und mittäglichen Stammwasserpotentials einen positiven linearen Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,3987 bzw. 0,592 (Abbildung 57 und Abbildung 58). Aufgrund der relativ geringen Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) konnte keine starke Korrelation festgestellt werden. Der Grund für die relativ schwache Korrelation lag vermutlich zum einen in der generell trägen Reaktion der Watermark-Sensoren. Die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale reagierten stärker und sprunghafter auf Niederschlagsperioden, während die Bodenmatrixpotentials der Watermark-Sensoren das volle Ausmaß dieser Niederschläge erst verspätet anzeigten. Daher war eine Korrelation an den gleichen Tagen nicht sinnvoll. Zum anderen wurden bei den Watermark-Sensoren nur Wertveränderungen von  $-2$  kPa (und meistens mehr) registriert. Daher entstanden oft größere Datenlücken, welche linear interpoliert werden mussten, was der Messgenauigkeit der ermittelten Bodenmatrixpotentials schadete.



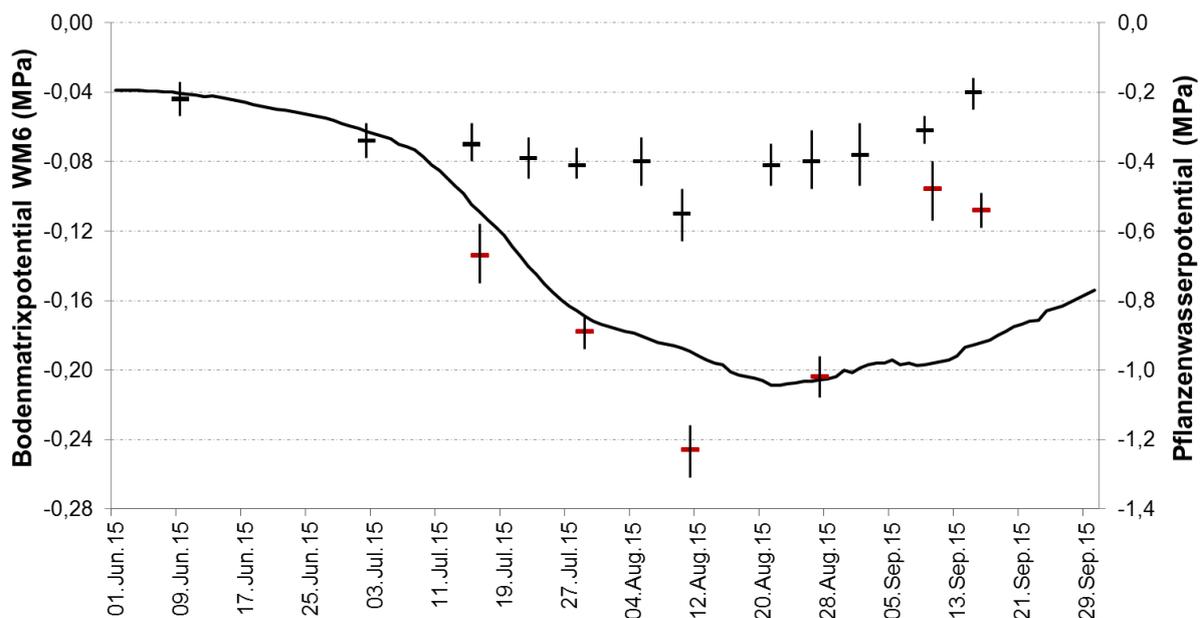
**Abbildung 57:** Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum.



**Abbildung 58:** Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum.

## Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 6:

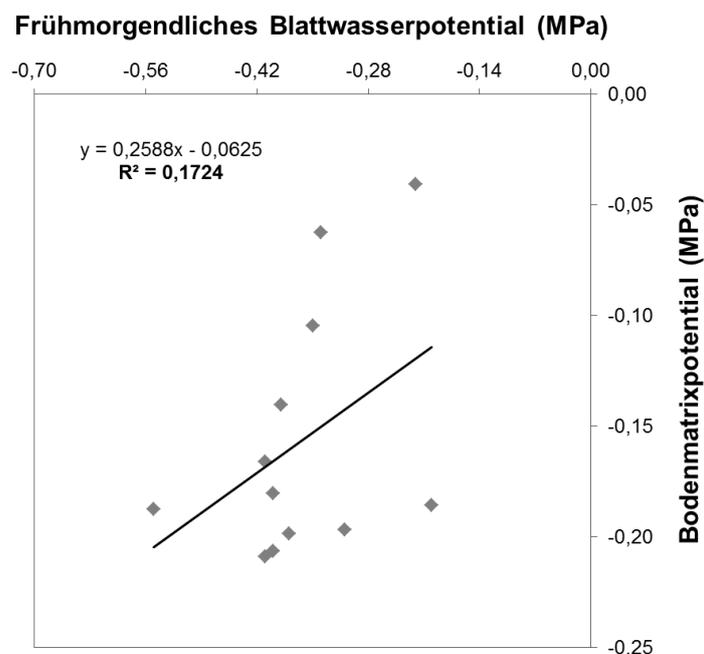
In der Auswertereihe Nr. 6 konnte in 50 cm Bodentiefe zwischen den gemittelten Pflanzenwasserpotentialen und den Messwerten des Watermark-Sensors Nr. 6 (WM6) die größte Übereinstimmung erzielt werden. Dennoch wurde gegen Ende des Untersuchungszeitraums (ab circa Ende August 2015) eine starke Abweichung des Bodenmatrixpotentialverlaufs des WM6 von den Pflanzenwasserpotentialverläufen festgestellt (Abbildung 59). Nachdem die Verläufe des Pflanzenwasserpotentials am Messtermin des 12. Augusts 2015 ihre Tiefpunkte erreichten, stiegen sie sehr stark bis zum Ende des Untersuchungszeitraums an. Die frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale, welche am Abschlusstermin des 15. September 2015 gemessen wurden, erreichten wieder die Werte des Ausgangsniveaus. Dieser kontinuierlich starke Anstieg im September 2015 konnte beim Verlauf des Bodenmatrixpotentials nicht beobachtet werden. In der Auswertereihe Nr. 6 verzeichneten keine der Watermark-Sensoren diese Dynamik, der WM6 schnitt dabei noch am besten ab.



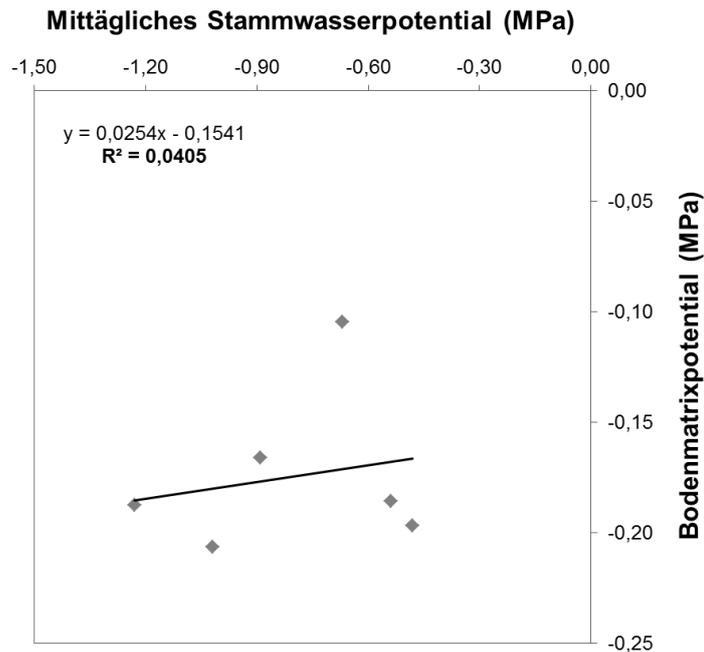
**Abbildung 59:** Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 (WM6) in 50 cm Bodentiefe in Verbindung mit den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale (schwarze Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) und den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale (rote Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt.

Wie somit bereits aufgrund der schlechten Übereinstimmung zu erwarten war, ergaben die Korrelationen der Mittelwerte der Pflanzenwasserpotentiale mit den Tagesmittelwerten des Bodenmatrixpotentials des WM6 in 50 cm Bodentiefe einen sehr schwachen linearen Zusammenhang (Abbildung 60 und Abbildung 61). Bei den frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale wurde eine positive Korrelation mit einem

$R^2$  von 0,1724, bei den mittäglichen Stammwasserpotentialen eine positive Korrelation mit einem  $R^2$  von 0,0405 festgestellt. Somit konnte sozusagen bei beiden Messmethoden des Pflanzenwasserpotentials kein linearer Zusammenhang zum Bodenmatrixpotential festgestellt werden. Die schlechte Korrelation war darauf zurückzuführen, dass an Tagen mit einem fast identisch ermittelten Pflanzenwasserpotential eine sehr große Spanne von gemessenen Bodenmatrixpotentialen auftrat. Allgemein konnte konstatiert werden, dass die Watermark-Sensoren in Punkto Messgenauigkeit, Messzuverlässigkeit (mit sehr großen Datenlücken) und Reaktionszeit sehr eingeschränkt waren. Dadurch könnte zum einen der mangelnde Zusammenhang mit den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen erklärt werden. Zum anderen könnten die Weinreben, aufgrund ihres tiefen und weitverzweigten Wurzelsystems, sich mit Wasser aus Bodenschichten versorgen, welche von den Watermark-Sensoren nicht erfasst wurden. Der Wasserversorgungszustand der Weinrebe stimmte somit schlussendlich nicht mit gemessen Matrixpotential des Bodens überein. Ein Beispiel: Während in 50 cm Bodentiefe die Matrixpotentiale am 21. August 2015, im Vergleich zum Messtermin am 10. August kontinuierlich sanken – obwohl in der Zwischenzeit relativ hohe Niederschlagsmengen registriert wurden (57 mm) – stiegen am 21. August 2015 die gemessenen Pflanzenwasserpotentialen bereits wieder an. Die Weinreben profitierten somit von den großen Niederschlagsmengen, indem sie sich vom zunehmenden Trockenstress ein wenig erholten, während im Boden das Matrixpotential unverändert negativer wurde. Erst ein paar Tage später wurden die Niederschlagsmengen im Boden angezeigt.



**Abbildung 60:** Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum.



**Abbildung 61:** Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum.

Eine sehr enge Korrelation an ein und denselben Tagen zwischen den Pflanzenwasserpotentialen und den ermittelten Bodenmatrixpotentialen konnte somit in beiden Auswertereien nicht gefunden werden.

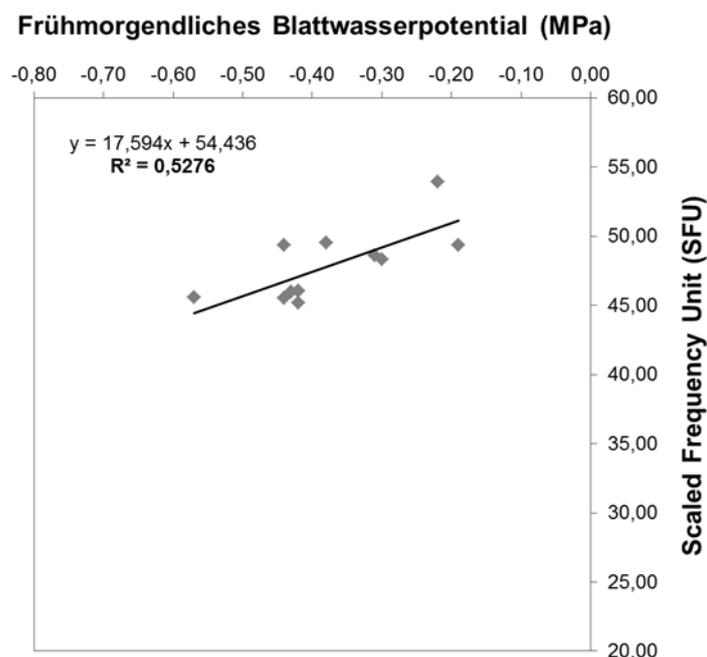
#### **5.4.3. Korrelation zwischen dem Pflanzenwasserpotential und den Scaled Frequency Units**

Für die Korrelation – zwischen den ermittelten Pflanzenwasserpotentialen und den aufgezeichneten Scaled Frequency Units (SFU) der SM1-Sensoren – wurden die SFU-Werte in 40 cm Messtiefe herangezogen. Diese Vorgehensweise wurde zum einen dadurch begründet, dass beim SM1-Sensor der Auswertereihe Nr. 6 (SM1-BF2) die obere Messplatte defekt war, wodurch nur Messtiefen ab 40 cm zur Verfügung standen. Zum anderen, was durchaus relevanter erschien, konnten in 40 cm Bodentiefe die stärksten Zusammenhänge zu den ermittelten Pflanzenwasserpotentialen für beide Auswertereien festgestellt werden. Die verschiedenartigen Korrelationen wurden zwischen den Mittelwerten der Pflanzenwasserpotentiale (frühmorgendliches Blatt- und mittägliches Stammwasserpotential) und den Tagesmittelwerten der SM1-Sensoren an denselben Tagen über den Untersuchungszeitraum durchgeführt.

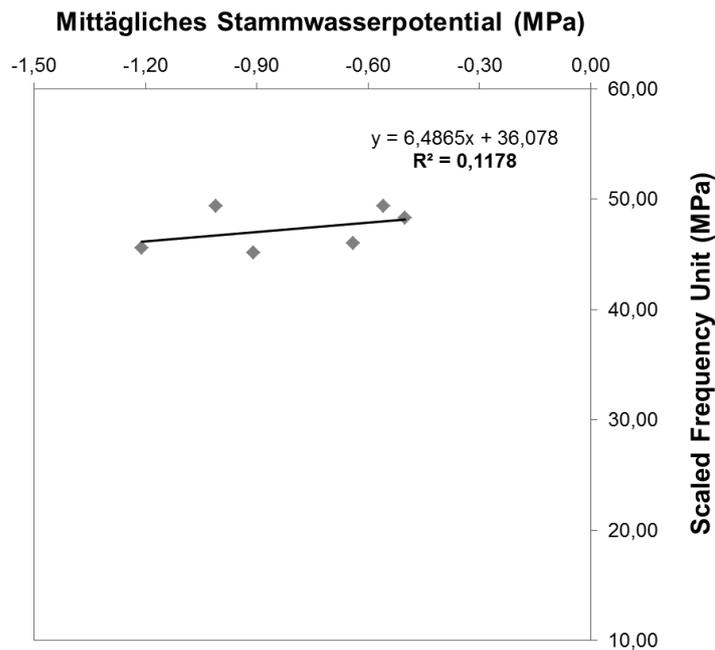
#### **Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 4:**

In der Auswertereihe Nr. 4 des Versuchsstandorts Sandgrube konnte bei der Korrelation der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale mit den SFU-Werten des

SM1-BF1 kein starker linearer Zusammenhang ( $R^2$  von 0,5276) festgestellt werden (Abbildung 62). Der Zusammenhang war positiv. Bei der Korrelation der mittäglichen Stammwasserpotentiale mit den SFU-Werten des SM1-BF1 wurde ein noch schwächerer (positiver) linearer Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,1178 eruiert, wobei hierfür weniger Vergleichswerte über den Untersuchungszeitraum zur Verfügung standen (Abbildung 63). Das geringe  $R^2$  kommt fast der Annahme gleich, dass es keinen Zusammenhang zwischen den beiden korrelierten Messmethoden gäbe. Der Grund für die schwachen Korrelationen lag darin, dass die negativsten Pflanzenwasserpotentialwerte nicht mit den niedrigsten SFU-Werten zusammenpassten und auch die höchsten gemessenen SFU-Werte nicht mit den positivsten Pflanzenwasserpotentialwerten. Der SM1-BF1 konnte keine Aussage über die Wasserkonditionen der Rebe liefern. Ursache war vermutlich wiederum, dass es sich bei den SM1-Sensoren um punktuelle Messungen handelte, welche nicht das gesamte zur Versorgung der Weinreben beitragende Bodenwasser erfassen konnten.



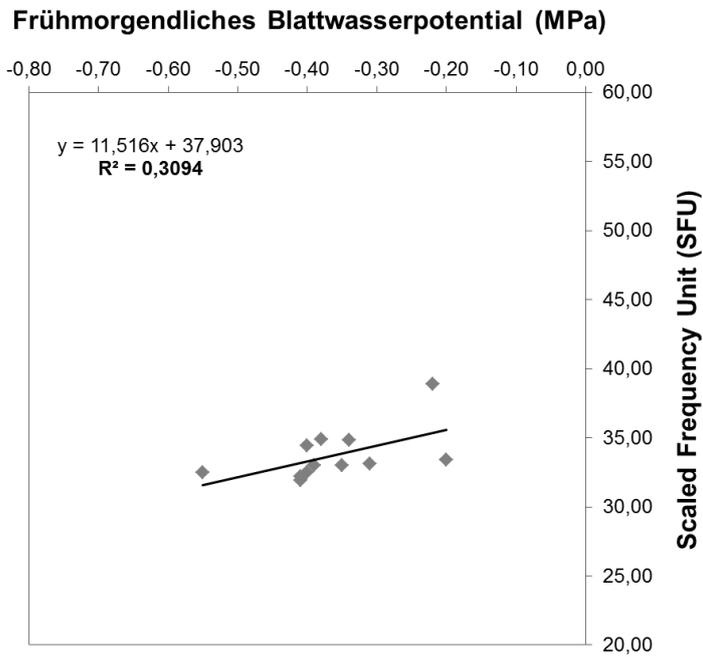
**Abbildung 62:** Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF1) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum.



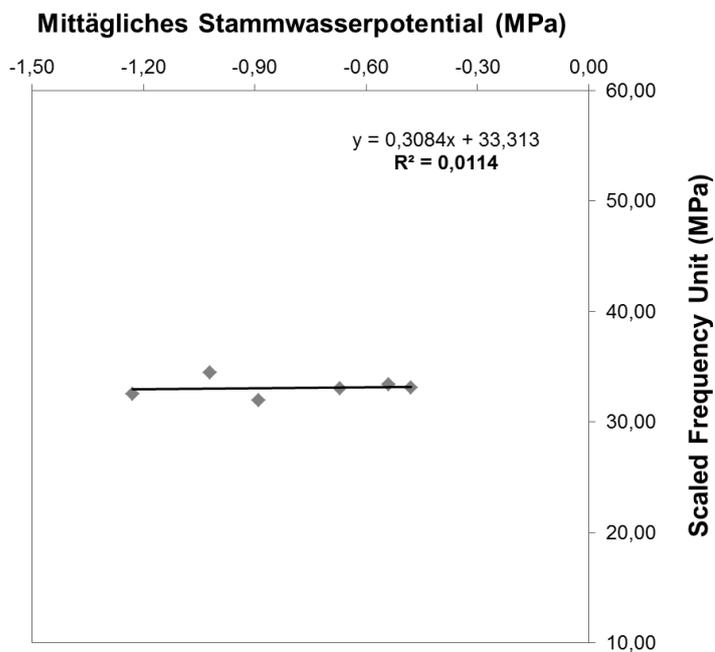
**Abbildung 63:** Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF1) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum.

#### **Versuchsstandort Sandgrube - Auswertereihe Nr. 6:**

Auch in der Auswertereihe Nr. 6 konnten erwartungsgemäß keine starken linearen Korrelationen festgestellt werden. Die Korrelation der frühmorgendlichen Blattwasserpotentialwerte mit den SFU-Werten des SM1-BF2 ergab einen positiven linearen Zusammenhang mit einem  $R^2$  von 0,3094 (Abbildung 64). Fast kein Zusammenhang konnte bei der Korrelation der mittäglichen Stammwasserpotentialwerte mit den SFU-Werten des SM1-BF2 mit einem  $R^2$  von 0,0114 festgestellt werden (Abbildung 65). Ein Grund für die noch schwächeren Korrelationen in der Auswertereihe Nr. 6 – im Vergleich zur Auswertereihe Nr. 4 – lag vermutlich darin, dass in der Auswertereihe Nr. 6 ab 150 cm Bodentiefe wahrscheinlich große Wasservorräte vorlagen. Diese Vermutung beruhte auf der Erkenntnis, dass der SM1-BF2 ab 130 cm Bodentiefe deutlich höhere SFU-Werte detektierte (Abbildung 49). Daher wäre es vorstellbar, dass die Wurzeln der Weinreben in bestimmten Trockenphasen Bodenwasser in tieferen Bodenschichten (ab 150 cm) erreichten, dadurch die Rebe mit ausreichend Wasser versorgten und die Pflanzenwasserpotentiale erhöhten, während z.B. in 40 cm Bodentiefe die SFU-Werte abnahmen.



**Abbildung 64:** Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF2) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum.



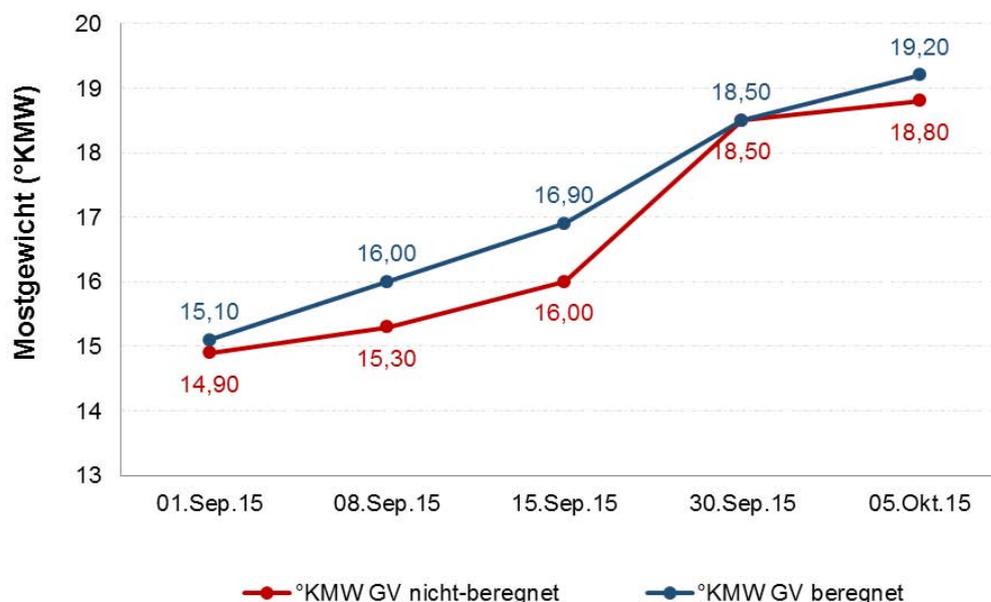
**Abbildung 65:** Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF2) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum.

## 5.5. Auswirkungen der Bewässerung

### 5.5.1. Mostgewicht, Gesamtsäure und hefeverfügbarer Stickstoff

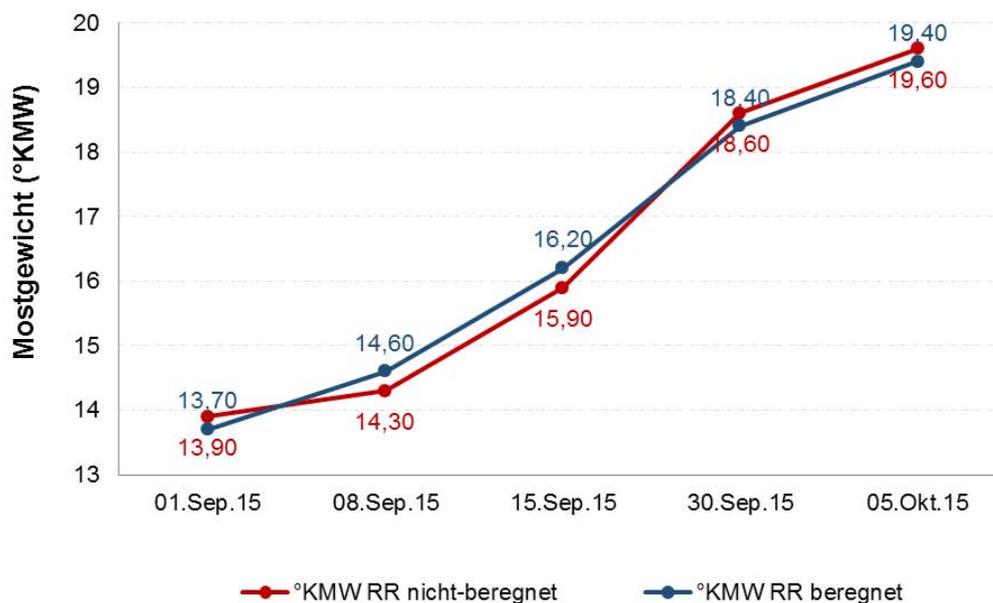
Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der ermittelten Reifeparameter (Klosterneuburger Mostwaage, titrierbare Gesamtsäure und hefeverfügbarer Stickstoff), welche während der Reifeperiode bestimmt wurden, dargestellt. Das Ziel dieser Auswertungen war es, Unterschiede bei den ermittelten Reifeparametern zwischen nicht-beregneten und beregneten Parzellen (Auswertereien) an zwei verschiedenen Rebsorten (Grüner Veltliner bzw. Rheinriesling) aufzuzeigen, wobei schlussendlich die gemessenen Werte am Tag der Ernte (05. Oktober 2015) für den nachfolgenden Gärungsprozess und die spätere Weinqualität von Bedeutung waren. Für die Untersuchungen standen am Versuchsstandort Loibenberg die beiden Weingartenterrassen LB-Grüner Veltliner und LB-Rheinriesling mit jeweils beregneten und nicht-beregneten Auswertereien zur Verfügung.

In der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner wiesen die Mostgewichte der Beeren der nicht-beregneten gegenüber der beregneten Auswertereihe an vier Messtagen (inkl. am Tag der Ernte) einen geringeren KMW-Gehalt bzw. am 30. September 2015 einen kongruenten KMW-Gehalt auf (Abbildung 66). Somit konnte davon ausgegangen werden, dass durch die Bewässerung der gelöste Zuckergehalt im Traubenmost der Beeren geringfügig erhöht wurde. Letztendlich wurde am Tag der Ernte eine Erhöhung um 0,40 °KMW festgestellt.



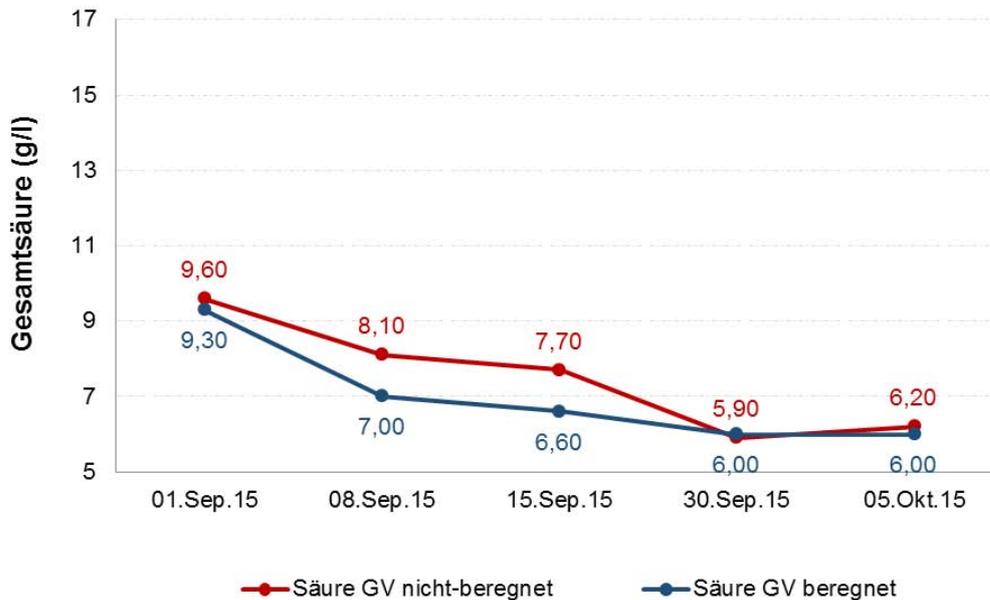
**Abbildung 66:** Mostgewichte der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.

Dieses Ergebnis konnte hingegen in der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Sorte Rheinriesling nicht bestätigt werden (Abbildung 67). Die Mostgewichtsverläufe der beiden Auswertereihe überschritten sich im Laufe der Reifeperiode. Es ließ sich daraus keine Erkenntnis ableiten, welche der beiden Auswertereihe – im Verlauf der Reifeperiode – durchgehend einen höheren gelösten Zuckergehalt im Most aufwies. Am Tag der Ernte hatten die Beeren der nicht-berechneten Auswertereihe ein geringfügig höheres Mostgewicht. Dieses Ergebnis erschien, aufgrund der zuvor beobachteten Messwerte während der Reifeperiode, nur begrenzt voraussehbar und vermutlich eher zufällig bedingt. Dennoch konnte kein positiver Effekt der Bewässerung auf das Mostgewicht festgestellt werden.



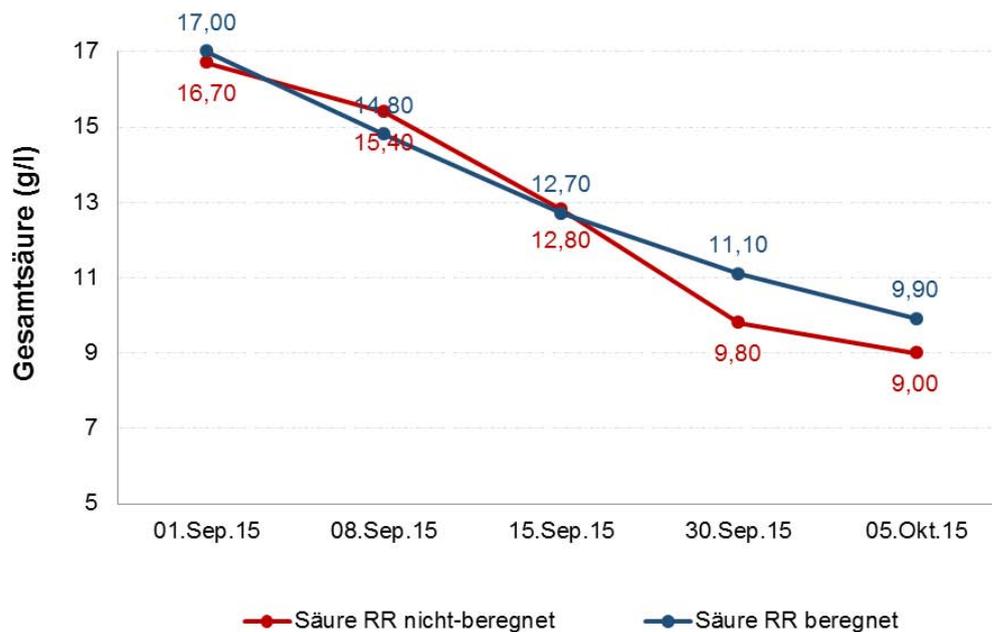
**Abbildung 67:** Mostgewichte der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

Die ermittelten Werte der Gesamtsäure der beprobten, nicht-berechneten Beeren der Sorte Grüner Veltliner lagen an vier Messtagen (inkl. am Tag der Ernte) über jenen der berechneten Beeren (Abbildung 68). Eine Ausnahme bildete der 30. September 2015. Schlussendlich wiesen am Tag der Ernte die nicht-berechneten Weinbeeren einen geringfügig höheren Gesamtsäuregehalt als die berechneten Weinbeeren auf (0,2 g/l), wodurch jedoch aufgrund der unerheblichen Abweichung keine bedeutenden Unterschiede bei der späteren Weinqualität zu erwarten waren. Prinzipiell konnten in beiden Auswertereihe der Sorte Grüner Veltliner mit 6 bzw. 6,2 g/l keine hohen Gesamtsäuren am Tag der Ernte nachgewiesen werden, wobei bei Weißweinsorten aufgrund der erreichbaren Frische und Eleganz ein etwas höherer Gesamtsäuregehalt angestrebt werden sollte.



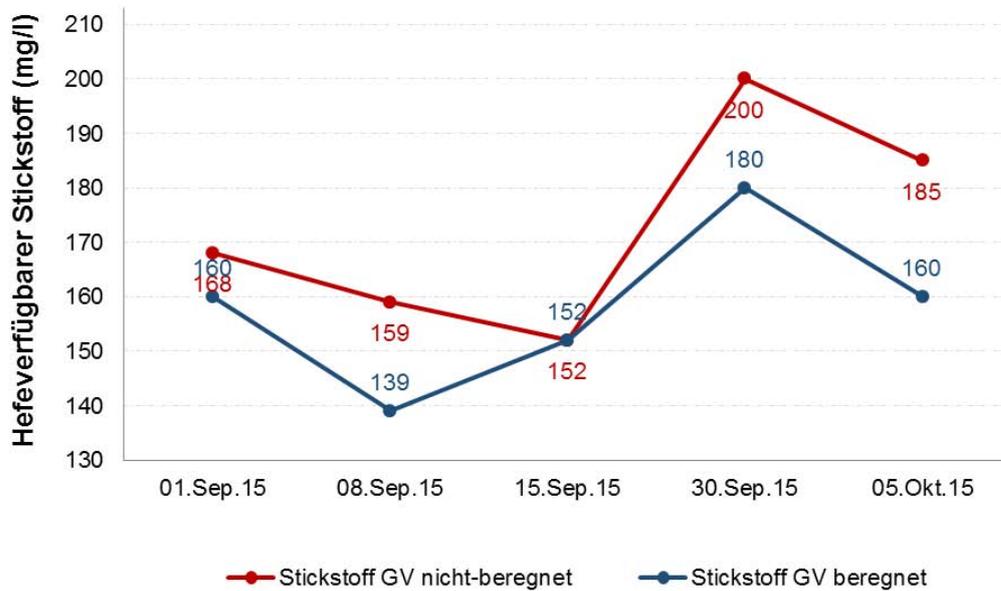
**Abbildung 68:** Gesamtsäure der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.

Bei Betrachtung der Verläufe der Gesamtsäure der nicht-berechneten und berechneten Beeren der Sorte Rheinriesling (Abbildung 69), ließ sich nicht beobachten, welcher Verlauf durchgehend über die gesamte Reifeperiode einen höheren bzw. niedrigeren Säurewert aufwies. Vergleichbar dazu konnte dies auch bei den zuvor dargestellten Mostgewichten nicht beobachtet werden. Am 05. Oktober 2015 (Tag der Ernte) lag jedoch die Gesamtsäure der nicht-berechneten Beeren recht deutlich unter jenen der berechneten Beeren und zwar um circa 1 g/l. Die künstliche Berechnung bewirkte also zum Erntezeitpunkt einen Anstieg des Säuregehalts der berechneten Auswertereihe, während bei den Mostgewichten zwischen den beiden Auswertereihen keine großen Differenzen zu beobachten waren. Generell war die Gesamtsäure des Rheinrieslings gegenüber jenen des Grünen Veltliners über den gesamten Messzeitraum wesentlich höher.

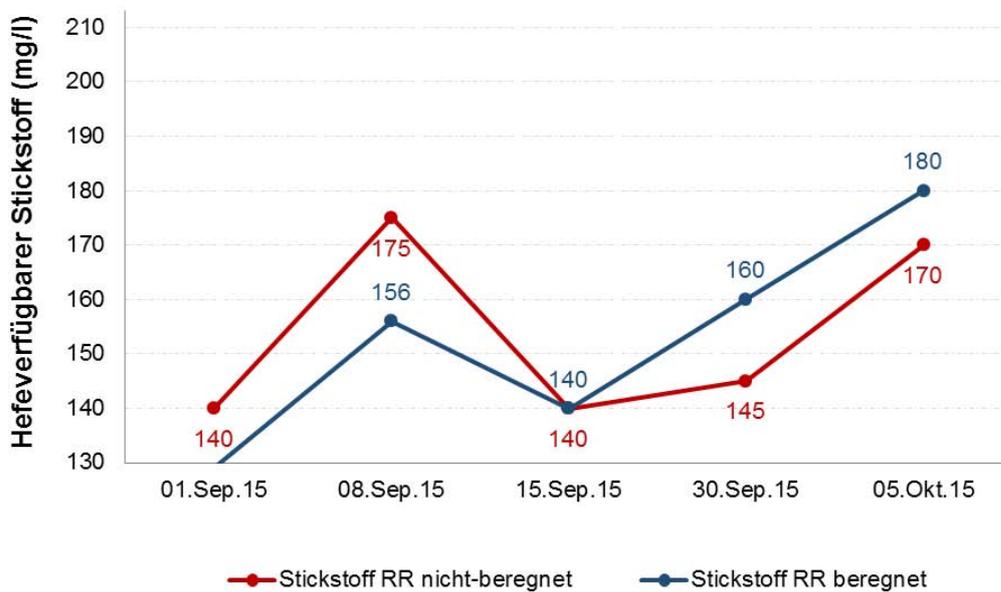


**Abbildung 69:** Gesamtsäure der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

Der hefeverfügbare Stickstoffverlauf der nicht-berechneten Auswertereihe der Sorte Grüner Veltliner lag an vier Messtagen über jenen der berechneten Auswertereihe (Abbildung 70). Eine Ausnahme bildete der 15. September 2015, an dessen Tag identische Werte zwischen den beiden Auswertereihen erzielt wurden. Am Tag der Ernte hatten die nicht-berechneten beprobten Weinbeeren (185 mg/l) einen höheren hefeverfügbaren Stickstoffgehalt als die berechneten Weinbeeren (160 mg/l). Nach Auskunft der WBS-Krems sollte bei der angewandten Messmethode der Grenzwert von 200 mg/l bei der Sorte Grüner Veltliner nicht unterschritten werden, was jedoch in beiden Auswertereihen der Fall war. Somit schnitt die nicht-berechnete Variante in Punkto hefeverfügbarer Stickstoffgehalt wohl ein wenig besser ab, da deren Messwert sich näher am Grenzwert von 200 mg/l befand. Die ermittelten Stickstoffgehalte der Weinbeeren des Rheinrieslings aus der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe ließen hingegen keine klaren Auskünfte darüber zu, welche Auswertereihe über die gesamte Reifeperiode durchgehend einen höheren bzw. niedrigeren Stickstoffgehalt hatte (Abbildung 71). Am 05. Oktober 2015, dem Zeitpunkt der Ernte, wiesen jedoch die berechneten Weinbeeren des Rheinrieslings einen um 10 mg/l höheren Stickstoffgehalt auf. Beim Rheinriesling sollte nach Auskunft der WBS-Krems der untere Grenzwert von 150 mg/l nicht unterschritten werden, was jedoch in beiden Auswertereihen nicht der Fall war.



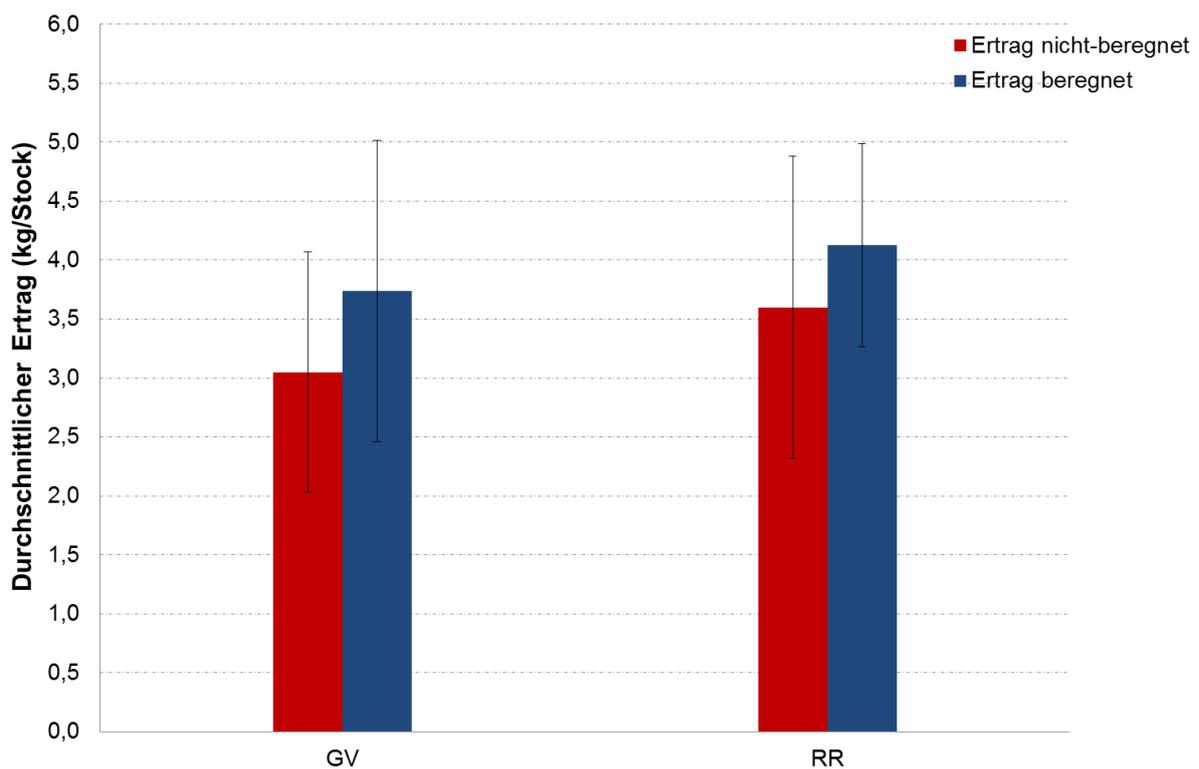
**Abbildung 70:** Hefeverfügbare Stickstoff der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.



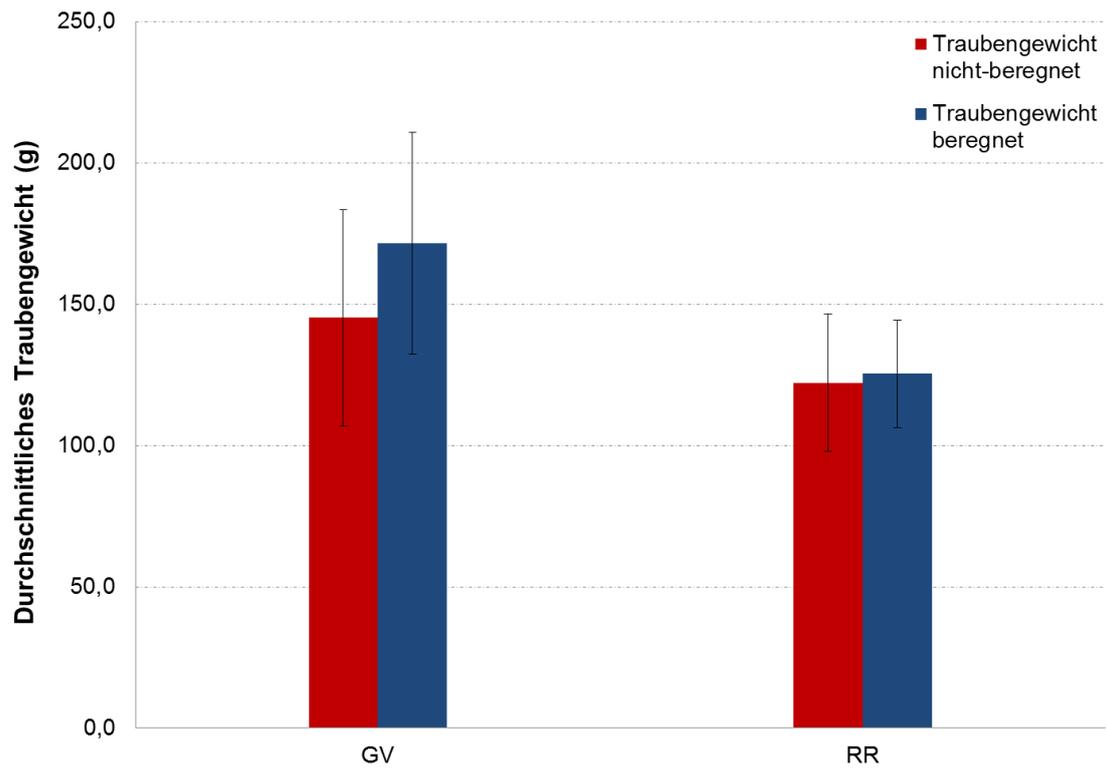
**Abbildung 71:** Hefeverfügbare Stickstoff der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.

## 5.5.2. Weinstockertrag und Traubengewicht

Bei der Sorte Grüner Veltliner hatten die Weinstöcke der nicht-beregneten, im Vergleich zur beregneten Auswertereihe, einen um 0,69 kg geringeren durchschnittlichen Ertrag pro Stock (Abbildung 72). Ebenfalls konnte einer Erhöhung des durchschnittlichen Ertrags pro Weinrebe in der beregneten Auswertereihe der Sorte Rheinriesling festgestellt werden (um 0,53 kg). Mit wenigen Bewässerungsturnussen und relativ kleinen Bewässerungsgaben (jeweils 22 mm) konnte somit ein hoher Effekt auf den Traubenertrag erzielt werden. Da sich jedoch die Fehlerbalken der Standardabweichungen der beiden Auswertereihe (bei beiden Sorten) überlappen und die Stichprobengrößen fast gleich groß waren (20 bzw. 19 Weinstöcke), liegt kein statistisch haltbares Ergebnis vor. Ebenfalls konnte durch die Bewässerung das durchschnittliche Traubengewicht bei der Sorte Grüner Veltliner mit 27 g erheblich, bei der Sorte Rheinriesling mit 3 g sehr unwesentlich erhöht werden (Abbildung 73). Wiederum war das Ergebnis jedoch statistisch nicht bedeutsam. Die mangelnde statistische Haltbarkeit der Ergebnisse war mit Sicherheit auch auf die geringe Stichprobengröße zurückzuführen.



**Abbildung 72:** Durchschnittlicher Weinstockertrag (inkl. Standardabweichung) der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe der Sorten Grüner Veltliner (GV, links) und Rheinriesling (RR, rechts) des Versuchsstandorts Loibenberg.



**Abbildung 73:** Durchschnittliches Traubengewicht (inkl. Standardabweichung) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihen der Sorten Grüner Veltliner (GV, links) und Rheinriesling (RR, rechts) des Versuchsstandorts Loibenberg.

## 6. Schlussfolgerungen

**Primäre Forschungshypothese:** Die Bodenwasserstatusmessungen repräsentieren die frühmorgendlichen Blatt- und mittäglichen Stammwasserpotentialmessungen.

### Forschungsfrage Nr. 1:

*Wie korrelieren die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials mit jenen des mittäglichen Stammwasserpotentials?*

Williams und Araujo (2002), sowie Zufferey und Mursier (2007) berichten von hohen Korrelationen zwischen den beiden Messmethoden, sodass die Vermutung nahe liegt, dass sich die beiden gegenseitig substituieren könnten. Dies wäre mit dem Vorteil verbunden, dass die unattraktive Tageszeit der Messdurchführung des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials vermieden werden könnte. Im Zuge der Masterarbeit wurden am Versuchsstandort Sandgrube ebenfalls relativ hohe (positive) lineare Zusammenhänge zwischen den beiden Messmethoden festgestellt ( $R^2$  von 0,74 bzw. 0,81). Anlehnend dazu konnten am Versuchsstandort Loibenberg in der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner ebenfalls starke (positive) lineare Abhängigkeiten beobachtet werden ( $R^2$  von 0,75 bzw. 0,83), in der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling wurden hingegen Zusammenhänge mit geringeren Bestimmtheitsmaßen festgestellt ( $R^2$  von 0,45 und 0,44). Da jedoch lediglich ein Vergleich an sechs Tagen – im Laufe des Untersuchungszeitraums – möglich war und dadurch wenige Daten zur Verfügung standen, sollte nicht zu viel in die erhaltenen Ergebnisse hineininterpretiert werden. Außerdem kritisierte Gruber (2013) Berichte über die hohe Korrelation zwischen dem frühmorgendlichen Blattwasserpotential und dem mittäglichen Stammwasserpotential, wie z.B. jenen von Williams und Araujo (2002), da die Untersuchungen unter anderem an Tagen unter gleichbleibenden stabilen Wetterverhältnissen durchgeführt wurden. So konnte von einigen Autoren (Van Zyl 1986, Williams und Baeza 2007) eine Beeinflussung des mittäglichen Stammwasserpotentials von der Temperatur und noch höher vom Wasserdampfättigungsdefizit der Luft (VPD) festgestellt werden. Bei einem Versuch von Heßdörfer (2015) führten zunehmende VPD-Werte zu einer Abnahme der Stammwasserpotentiale im Tagesverlauf. Bei der Korrelation der Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale mit dem gemittelten VPD über den Untersuchungszeitraum konnte am Versuchsstandort Sandgrube ein negativer Zusammenhang festgestellt werden, mit einem  $R^2$  von 0,65. Am Versuchsstandort Loibenberg wurden sehr hohe Abhängigkeiten mit Bestimmtheitsmaßen ( $R^2$ ) zwischen 0,82 und 0,92 beobachtet. Somit konnte ein Einfluss der Wetterbedingungen auf die Messungen des mittäglichen Stammwasserpotentials durchaus nachgewiesen werden. Auf Grundlage dessen hat sich vor allem im deutschen und österreichischen Weinbau die Messung des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials als Referenzmethode durchgesetzt und wird auch vom Autor dieser Arbeit weiterhin empfohlen.

### Forschungsfrage Nr. 2:

*Wie korrelieren die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale (Blatt- und Stammwasserpotentiale) mit den gemessenen Bodenmatrixpotentialen?*

*und*

### Forschungsfrage Nr. 3:

*Wie korrelieren die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale (Blatt- und Stammwasserpotentiale) mit den gemessenen Bodenwasseranteilen?*

Generell hängt die Nutzung des vorhandenen Bodenwassers, neben dem Rückhaltevermögen (Speicherfähigkeit) des Bodens an pflanzenverfügbarem Wasser (nFK), stark vom Alter der Weinreben und der dadurch bedingten Wurzeldichte bzw. Wurzelverteilung ab (Prior 2006a). Vor allem die im Alter fortgeschrittene Weinrebe ist dadurch in der Lage, Wasser aus Bodenbereichen zu beziehen, welche durch Bodenwassersensoren, aufgrund ihres beschränkten Messbereichs, nicht erfasst werden können. Demgegenüber besitzen Pflanzenwasserpotentialmessungen die Fähigkeit, den Trockenstress der Weinrebe unabhängig vom Bodenwasserstatus zu bestimmen und indirekt das gesamte von den Wurzeln der Weinrebe erreichbare Bodenwasser zu erfassen (Jones 2004, Prior 2005). Die Messungen lassen sich jedoch nicht automatisieren. Deshalb wurde im Zuge der Masterarbeit versucht, einen Zusammenhang zwischen dem Pflanzenwasserpotential und dem Wasserstatus des Bodens zu finden. Jedoch konnten bei den Korrelationen der Pflanzenwasserpotentiale (frühmorgendliches Blattwasserpotential und mittägliches Stammwasserpotential) mit den Bodenmatrixpotentialen am Versuchsstandort Sandgrube keine engen Zusammenhänge festgestellt werden. Dieses Ergebnis konnte bei den Korrelationen mit den Bodenwassermesswerten (SFU-Werte) bestätigt werden. Die besten Korrelationen konnten in 50 cm (Matrixpotential) bzw. 40 cm (SFU-Werte) Bodentiefe erzielt werden. Bei den SM1-Sensoren war eine Kalibrierung zur Erhaltung von Bodenwasseranteilen nicht möglich, da keine Vergleichswerte in der Literatur vorhanden waren und keine Feldfunktion erarbeitet werden konnte.

Ursache der geringen Korrelationen war die Tatsache, dass fast identische Pflanzenwasserpotentiale, welche an verschiedenen Messterminen ermittelt wurden, innerhalb einer großen Spanne an Werten der Bodenmatrixpotentiale und der Bodenwasserdaten (SFU) auftraten. Ein Grund dafür war vermutlich, dass die Wurzeln der Weinreben, bei vorliegenden Trockenstressbedingungen in den gemessenen Bodenschichten (50, 100, 150 cm bzw. 0 bis 150 cm), durch ihr intensives und tiefgreifendes System Wasservorräte in Bodenschichten erreichten, welche von den Sensoren nicht erfasst werden konnten. Da die Wurzelverteilung, sowie die Orte der intensiven Wasseraufnahme der Weinrebe unbekannt sind, sind punktuelle Messungen immer mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Außerdem kann die Messgenauigkeit der Sensoren in Frage gestellt werden. Die Verläufe der Watermark- und SM1-Sensoren waren, vor allem gegen Ende des

Untersuchungszeitraums, nicht immer nachvollziehbar. Teilweise hinkten sie den Verläufen der Pflanzenwasserpotentiale stark hinterher, was auf die träge Reaktion der Sensoren zurückzuführen war. Außerdem traten bei den Watermark-Sensoren gewaltige Datenunterbrechungen auf. Zusätzlich wurden Niederschlagsmengen unzureichend registriert, da die Watermark-Sensoren zu tief eingebaut worden sind.

Schlussendlich konnte kein zufriedenstellender Zusammenhang zwischen den ermittelten Pflanzenwasserpotentialen (Blatt- und Stammwasserpotential) und den gemessenen Bodenmatrixpotentialen bzw. SFU-Werten festgestellt werden.

#### Beantwortung der primären Forschungshypothese:

Die primäre Forschungshypothese dieser Arbeit muss somit abgelehnt werden. Bodenwasserstatusmessungen repräsentieren nicht die an denselben Tagen ermittelten Pflanzenwasserpotentialmessungen. Die möglichen Gründe dafür wurden bereits diskutiert. Es lassen sich somit aus den aufgezeichneten Daten der Bodenwassersensoren keine Aussagen über die Wasserkondition der Reben ziehen. Es sollte noch dazu gesagt werden, dass die Sensoren nicht optimal für die Validierung der Forschungshypothese geeignet waren. Für die SM1-Sensoren wurde vom Hersteller keine entsprechende Kalibrierungsfunktion bereitgestellt, sodass die ermittelten SFU-Werte lediglich „Hausnummern“ angaben. Die mangelhafte Datenaufzeichnung der Watermark-Sensoren wurde bereits mehrmals angesprochen. Prinzipiell sollte die Forschungshypothese jedoch nicht als „unbeantwortbar“ abgestempelt werden. Durch eine optimierte Anordnung der Bodenwassersensoren, welche besser an die Wurzelverteilung der Weinreben angepasst sind (vor allem im Hinblick auf die Bodentiefe), könnten vermutlich bessere Korrelationen erzielt werden. Außerdem wäre bei den SM1-Sensoren die Umwandlung der SFU-Werte in Bodenwasseranteile interessant, um die Bodenwassermesswerte besser einordnen und interpretieren zu können.

**Sekundäre Forschungshypothese:** Ein Pflanzenwasserstatus, welcher durch Trockenstress beeinflusst wird, hat negative Auswirkungen auf die Reifeparameter der Trauben und deren Ertrag.

#### Forschungsfrage Nr. 1:

*Wie korrelieren die Messungen des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials mit jenen des mittäglichen Stammwasserpotentials?*

Siehe Diskussion primäre Forschungshypothese => Forschungsfrage Nr. 1

#### Forschungsfrage Nr. 2:

*Welche Auswirkungen hat eine mögliche Bewässerung auf die Reifeparameter und den Ertrag der Sorten Grüner Veltliner und Rheinriesling?*

Gruber et al. (2006) und Prior (2006b) stellten in ihren Arbeiten fest, dass bei einem optimierten Wasserangebot durch eine Tropfberegnungsanlage höhere Most-

gewichte bei gleichbleibendem Ertrag erzielt werden konnten. Auf einem Versuchsstandort mit geringer Wasserspeicherkapazität konnte Gruber (2013) in fünf von sechs Jahren durch Bewässerungsmaßnahmen eine Erhöhung des Mostgewichts bei einer parallelen Zunahme des Ertrags belegen. Im Zuge dieser Arbeit konnten bei der Untersuchung der Sorte Grüner Veltliner am Versuchsstandort Loibenberg diese Erkenntnisse bestätigt werden. Der Boden der Weingartenterrasse Loibenberg-Grüner Veltliner war ebenfalls durch eine geringe Wasserspeicherkapazität gekennzeichnet (Grobodenanteil rund 11 %, Sandanteil im Feinboden circa 67 %). Dabei wurde durch relativ geringe Bewässerungsmengen (insgesamt 110 mm an fünf Bewässerungsturnüssen) eine Erhöhung des Mostgewichts bei einer gleichzeitigen statistisch nicht haltbaren Erhöhung des Ertrages pro Weinstock und des Traubengewichts festgestellt. Der Grund für die schlechte Signifikanz lag in den hohen natürlichen Schwankungsbreiten (Standardabweichungen vom Mittelwert) der Einzelertragsmessungen. Der Säuregehalt der berechneten Auswertereihe war zum Zeitpunkt der Ernte unwesentlich geringer als jener in der nicht-berechneten Auswertereihe, was vermutlich keine größeren Auswirkungen auf die Frische und Eleganz des Weines mit sich brachte. Salón et al. (2005) und Koundouras et al. (2006) berichten ebenfalls von einer Abnahme der Gesamtsäure durch Bewässerungsmaßnahmen, wobei zahlreiche Autoren von einer gleichzeitigen Steigerung des Mostgewichtes und der Gesamtsäure durch eine moderaten Zusatzbewässerung berichten (z.B. Chapman et al. 2005, Girona et al. 2006, Acevedo-Opazo et al. 2010). Der hefeverfügbare Stickstoffgehalt war in der berechneten Auswertereihe deutlich geringer, wobei in beiden Varianten der Grenzwert von 200 mg/l, welcher von der WBS-Krems als Richtwert vorgegeben wurde, unterschritten wurde. Sich daraus eventuell ergebende negative Auswirkungen auf den Gärungsprozess wurden jedoch nicht festgestellt. Somit konnte schlussendlich ein positiver Effekt der Bewässerung auf die Reifeparameter und den Ertrag der Sorte Grüner Veltliner festgestellt werden.

Bei der Sorte Rheinriesling konnten hingegen, bei vermutlich identischen Bodenverhältnissen, durch die Bewässerung keine Effekte bei der Erhöhung des Mostgewichtes erzielt und keine erhebliche Steigerung des Traubengewichts eruiert werden. Lediglich der Ertrag pro Weinstock wurde erhöht, wobei das Ergebnis statistisch nicht haltbar war. Die Gesamtsäure und der hefeverfügbare Stickstoff wurden jedoch im Zuge der Bewässerung erhöht. Die hefeverfügbaren Stickstoffgehalte fielen aber, sowohl in der nicht-berechneten als auch in der berechneten Auswertereihe, nicht unter den Grenzwert von 150 mg/l, welcher durch die WBS-Krems vorgegeben wurde. Der Grund für den mangelnden Einfluss der Berechnung auf die Reifeparameter und den Ertrag der Sorte Rheinriesling lag vermutlich an dem vergleichsweise relativ hohen Alter der Weinreben. Dadurch konnten die Weinreben des Rheinrieslings der nicht-berechneten Auswertereihe, aufgrund ihres fortgeschrittenen, weitverzweigten Wurzelsystems, Wasservorräte auch in tieferen Bodenschichten erreichen, wodurch der Einfluss der Bewässerung gedämpft wurde. Generell wurden in beiden Auswertereihen (nicht-berechnet und berechnet) beim Rheinriesling etwas höhere Mostgewichte und Säuregehalte im

Vergleich zu den beiden Auswertereihen des Grünen Veltliners festgestellt, was vermutlich auf sorten- und altersspezifische Unterschiede zurückzuführen war.

Da für den Qualitätsweinbau jedoch vor allem die Sensorik von entscheidender Bedeutung ist, sollte neben dem Ertrag und den Reifeparametern auch die Sensorik des Weines einer Analyse unterzogen werden.

### Forschungsfrage Nr. 3:

*Sind bei den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen (Blatt- und Stammwasserpotentiale) der berechneten und nicht-berechneten Auswertereihen sortenspezifische Unterschiede zwischen den Sorten Grüner Veltliner und Rheinriesling erkennbar?*

Sortenspezifische Unterschiede bei den gemessenen Pflanzenwasserpotentialen konnten festgestellt werden. Tendenziell befanden sich dabei die berechneten Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale und der mittäglichen Stammwasserpotentiale der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling (nicht-berechnet und berechnet) im Vergleich zur Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner näher am Idealbereich von  $-0,2$  MPa (Abbildung 26 und Abbildung 34). So konnten zum einen identische Mittelwerte des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials zwischen der nicht-berechneten Auswertereihe der Sorte Rheinriesling und der berechneten Auswertereihe der Sorte Grüner Veltliner gemittelt über den gesamten Untersuchungszeitraum festgestellt werden. Zum anderen konnten im Vergleich dazu, bei Betrachtung der Mittelwerte des mittäglichen Stammwasserpotentials, sogar positivere Mittelwerte in der nicht-berechneten Auswertereihe des Rheinrieslings festgestellt werden. Somit waren die nicht-berechneten Weinreben der Sorte Rheinriesling im Durchschnitt gleichen oder geringeren Trockenstressbedingungen ausgesetzt wie die berechneten Weinreben der Sorte Grüner Veltliner. Dies war vermutlich auf das unterschiedliche Alter der Weinreben zurückzuführen (ca. 45 Jahre Unterschied), wodurch die Weinreben der Sorte Rheinriesling aufgrund ihres fortgeschrittenen Alters weniger trockenstressempfindlich im Vergleich zu den Reben der Sorte Grüner Veltliner waren. Sie erschlossen vermutlich aufgrund ihres tiefen Wurzelsystems Bodenhorizonte, welche von den Wurzeln der Sorte Grüner Veltliner nicht erreicht werden konnten. Auch sortenspezifische Unterschiede könnten eine Rolle gespielt haben, da der Grüne Veltliner generell als trockenstressempfindlicher gilt (ÖWM 2016d). Da beide Sorten mit der Unterlage Kober 5 BB ausgestattet waren, kann eine davon ausgehende Beeinflussung negiert werden. Im Vergleich dazu ist die Unterlage SO4 empfindlicher gegenüber Trockenstress (Mehofer et al. 2014).

### Beantwortung der sekundären Forschungshypothese:

Die sekundäre Forschungshypothese, kann bei Betrachtung der Sorte Grüner Veltliner mit ja beantwortet werden. So konnten die ermittelten Pflanzenwasserpotentiale durch die Berechnung erhöht werden und starke Trockenstressbedingungen, wie z.B. am 13. August 2015, verhindert werden. In der nicht-

berechneten Auswertereihe konnte folglich ein geringeres Mostgewicht und ein geringerer Ertrag pro Stock bzw. ein geringeres Traubengewicht (jedoch statistisch nicht haltbar) festgestellt werden. Somit hatte ein Pflanzenwasserstatus, welcher höheren Trockenstressbedingungen ausgesetzt war, negative Auswirkungen auf die Reifeparameter und den Ertrag der Trauben. Im Vergleich dazu konnten diese Beobachtungen bei der Sorte Rheinriesling nicht festgestellt werden. Eine Ausnahme bildete der Ertrag pro Stock, welcher durch die Berechnung erhöht werden konnte, wobei dieses Ergebnis statistisch nicht haltbar war.

# 7. Quellenverzeichnisse

## 7.1. Literaturverzeichnis

- Acevedo-Opazo, C., Ortega-Farias, S. und Fuentes, S., 2010. Effects of grapevine (*Vitis vinifera* L.) water status on water consumption, vegetative growth and grape quality: An irrigation scheduling application to achieve regulated deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 97 (7), 956-964.
- Adcon Telemetry, 2014. Adcon SM1 Soil Moisture Sensor. Verfügbar in: [http://adcon.com/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=70&Itemid=239&lang=de](http://adcon.com/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=70&Itemid=239&lang=de). [Abfrage am 05. Februar 2016].
- Adcon Telemetry, 2016. Adcon SM1 Bodenfeuchtesensor. Verfügbar in: [http://www.adcon.at/index.php?option=com\\_hikashop&ctrl=product&task=show&cid=254&name=adcon-sm1-bodenfeuchtesensor&Itemid=219&lang=de#beschreibung](http://www.adcon.at/index.php?option=com_hikashop&ctrl=product&task=show&cid=254&name=adcon-sm1-bodenfeuchtesensor&Itemid=219&lang=de#beschreibung) [Abfrage am 05. Februar 2016].
- Améglio, T., Archer, P., Cohen, M., Valancogne, C., Daudet, F.-A., Dayau, S. und Cruiziat, P., 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant and Soil*, 207, 155-167.
- Bear, J., 1979. *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill series in water resources and environmental engineering. London/New York: McGraw-Hill International Book Company.
- Begg, J. E. und Turner, N. C., 1970. Water potential gradients in field tobacco. *Plant Physiology*, 46 (2), 343-346.
- Bolt, G. H., Iwata, S., Peck, A. J., Raats, P. A. C., Rode, A. A., Vachaud, G. und Voronin, A. D., 1976. Soil physics terminology. *Bulletin of the international society of soil science*, 49, 26-36.
- Buckingham, E., 1907. *Studies on the movement of soil moisture*. Bulletin 38. Washington D.C.: USDA Bureau of Soils.
- Centeno, A., Baeza, P. und Lissarrague, J. R., 2010. Relationship between Soil and Plant Water Status in Wine Grapes under Various Water Deficit Regimes. *HortTechnology*, 20 (3), 585-593.
- Cepuder, P., 2011. *Skriptum Bewässerungswirtschaft*. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Cepuder, P., Nolz, R., Kammerer, G. und Strohmeier, S., 2012. *Skriptum Applied Soil Physics. Physical and Selected Chemical Methods of Soil Analysis*. Wien: Universität für Bodenkultur.

- Chapman, D. M., Roby, G., Ebeler, S. E., Guinard, J. X. und Matthews, M. A., 2005. Sensory attributes of Cabernet Sauvignon wines made from vines with different water status. *Australian Journal of Grape and Wine Research*, 11 (3), 339-347.
- Deloire, A., Vaudour, E., Carey, V., Bonnardot, V. und van Leeuwen, C., 2005. Grapevine responses to terroir: a global approach. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 39 (4), 149-162.
- Deloire, A. und Heyns, D., 2011. The Leaf Water Potentials: Principles, Method und Thresholds. *Wineland*, 265, 119-121.
- Dry, P. R. und Loveys, B. R., 1999. Grapevine shoot growth and stomatal conductance are conducted when part of the root system is dried. *Vitis-Journal of Grapevine Research*, 38 (4), 151-156.
- Egle, K., 2007. *Der österreichische Wein. Das große Handbuch.* Wien/Graz/Klagenfurt: Pichler Verlag.
- Ehlers, W., 1996. *Wasser in Boden und Pflanze. Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag.* Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Eijkelkamp Soil & Water, 2016. Stechzylinder. Verfügbar in: <https://de.eijkelkamp.com/produkte/erdbohrer-und-bodenprobennehmer/stechzylinder.html> [Abfrage am 02. Februar 2016].
- Fitz, W., Schrampf, L. und Priewe, J., 2014. *Wachau Souterrain – der Boden zum Wein.* Spitz/Donau: Vinea Wachau Nobilis Districtus.
- FOSS, 2016. Wein – OenoFoss™. Verfügbar in: <http://www.foss.de/industry-solution/products/oenofoss/> [Abfrage am 15. Februar 2016].
- Gabler, C. und Kühner, E., 2013. *Begrünungsmanagement im Weinbau. Auswertung 2013. Versuchslaufzeit 2010 – 2020.* Wein und Obstbauschule Krems. Verfügbar in: [http://www.lako.at/de/versuche/?lang=de&a=179&a\\_urlname=versuche&versuche\\_a=2&versuche\\_b=22](http://www.lako.at/de/versuche/?lang=de&a=179&a_urlname=versuche&versuche_a=2&versuche_b=22) [Abfrage am 03. Jänner 2016].
- Gabler, C. und Kühner, E., 2014. *Mehrfährige Trockenstressmessungen an Reben zur Planung von gezielten Bewässerungs- und Bodenpflegemaßnahmen im Kremstal und der Wachau.* Wein und Obstbauschule Krems. Verfügbar in: <http://www.bn1.tv/document/Mehrjaehrige-Trockenstressmessungen/2bfc16afa4b91464705509d9d0e3df00> [Abfrage am 03. Jänner 2016].
- Gemünd, W., 2013a. *Klima und Boden.* Regionales Weinkomitee Kremstal. Verfügbar in: <http://www.kremstal-wein.at/weinbaugebiet/klima-und-boden/> [Abfrage am 04. Jänner 2016].

- Gemünd, W., 2013b. Lagen: Östlich vom Krems. Regionales Weinkomitee Kremstal. Verfügbar in: <http://www.kremstal-wein.at/weinbaugebiet/lagen/> [Abfrage am 04. Jänner 2016].
- Geyrhofer, A. F., 2011. Messung der Bodenfeuchtigkeit im Weingarten: Bewässerungssteuerung im Weinbau. *Der Winzer*, 4, 10-13.
- Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E. und Marsal, J., 2006. The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. *Irrigation Science*, 24 (2), 115-127.
- Gruber, B. R., 2013. Untersuchungen zur Bodenfeuchtedynamik und zum Pflanzenwasserhaushalt bei verschiedenen Bodenmanagement- und Laubwandsystemen von *Vitis vinifera* L. (cv. Riesling) im Steilhang – ein Ansatz zur bedarfsgerechten Steuerung von Tröpfchenbewässerungsanlagen. Geisenheim: Gesellschaft zur Förderung der Hochschule Geisenheim e.V.
- Gruber, B. R., Schultz, H. R. und Rupp, D., 2006. Unverdünnte Qualität mit Tropfbewässerung? *Der Deutsche Weinbau*, 11, 18-21.
- Hangen, E. und Scherzer, J., 2004. Ermittlung von Pedotransferfunktionen zur rechnerischen Ableitung von Kennwerten des Bodenwasserhaushalts (FK, PWP, nFK, kapillarer Aufstieg). Unveröffentlichter Projektbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL). Bonn: BMVEL.
- Hartge, H. K. und Horn, R., 1999. Einführung in die Bodenphysik: 19 Tabellen. 3. überarbeitete Auflage. Stuttgart: Enke Verlag.
- Heßdörfer, D., 2010. Bewässerung der Reben – ja oder nein? Bayrische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau. Verfügbar in: [http://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/weinbau/dateien/w1\\_bew%C3%A4sserung\\_ja\\_-\\_nein.pdf](http://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/weinbau/dateien/w1_bew%C3%A4sserung_ja_-_nein.pdf) [Abfrage am 15. November 2015].
- Heßdörfer, D., 2015. Untersuchungen zur kontinuierlichen Wasserpotentialmessung sowie des Einflusses verschiedener Tropfbewässerungssysteme auf die generative und vegetative Wuchsleistung von *Vitis vinifera* (cv. Silvaner). Dissertation. Hochschule Geisenheim und Justus-Liebig-Universität Gießen.
- Hillel, D., 1998. *Environmental Soil Physics: Fundamentals, applications and environmental considerations*. London: Academic Press.
- Irrrometer Company, Inc., 2016. WATERMARK Sensors. Verfügbar in: <http://www.irrometer.com/sensors.html#wm> [Abfrage am 05. Februar 2016].
- Jones, H. G., 1992. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. 2<sup>nd</sup> edition. Cambridge: University Press.

- Jones, H. G., 2004. Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55 (407), 2427-2436.
- Jones, H. G., 2007. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58 (2), 119-130.
- Kammerer, G. und Loiskandl, W., 2005. Skriptum Bodenphysik (Vertiefung). SS 2005. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Kastanek, F., Blumel, F., Klaghofer, E., Nestroy, O., Pregl, O. und Schlachter, H., 1980. Nomenclature in soil physics. 1. Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, 22, 55-72.
- Kastanek, F., 1996. Kritische Bemerkungen zur Bestimmung der Wasserspannung im Boden mit der Blockmethode. *Die Bodenkultur*, 47 (4), 223-233.
- Kastanek, F., Zartl, A., Cepuder, P. und Loiskandl, W., 2001. Prinzip und Praxis des virtuellen Lysimeters. In: Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, Hrsg. BAL-Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung. Irdning: BAL-Gumpenstein, 17-22.
- Kopyt, M. und Ton, Y., 2005. Grapevine trunk expansion and microvariations: application for irrigation management. *The Australian and New Zealand Grapegrower and Winemaker*, 497, 27-35.
- Koundouras, S., Marinos, V., Gkoulioti, A., Kotseridis, Y. und van Leeuwen, C., 2006. Influence of Vineyard Location and Vine Water Status on Fruit Maturation of Nonirrigated Cv. Agiorgitiko (*Vitis vinifera* L.). Effects on Wine Phenolic and Aroma Components. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54 (14), 5077-5086.
- Larcher, W., 1994. Ökophysiologie der Pflanzen. Leben, Leistung und Streßbewältigung der Pflanzen in ihrer Umwelt. 6. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Medrano, H., Escalona, J. M., Cifre, J., Bota, J. und Flexas, J., 2003. A ten-year study on the physiology of two Spanish grapevine cultivars under field conditions: effects of water availability from leaf photosynthesis to grape yield and quality. *Functional Plant Biology*, 30, 607-619.
- Mehofer, M., Baumgarten, A., Bauer, K., Fardossi, A., Kneissl, G., Kühner, E., Palz, M., Regner, F., Winkovitsch, C. und Wunderer, W., 2014. Sachgerechte Düngung im Weinbau. 2. Auflage. Wien/Klosterneuburg: BMLFUW.
- MMM Mosler Tech Support, 2016. SK 16 Scholanderbombe. Verfügbar in: <https://www.mmm-tech.de/downloads/category/17-scholanderkammer?lang=de> [Abfrage am 19. Februar 2016].

- Müller, E., Lipps, H.-P. und Walg, O., 2008. Der Winzer Band 1 - Weinbau. 3. Auflage. Stuttgart/Hohenheim: Eugen Ulmer KG.
- Myburgh, P. A., 2003. Responses of *Vitis vinifera* L. cv. 'Sultanina' to water deficits during various pre- and post-harvest phases under semi-arid conditions. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 24 (1), 25-33.
- Nadler, A. und Heuer, B., 1997. Soil moisture levels and their relation to water potentials of cotton leaves. *Australian Journal of Agricultural Research*, 48, 923-932.
- Nestroy, O., Aust, G., Blum, W. E. H., Englisch, M., Hager, H., Herzberger, E., Kilian, W., Nelhiebel, P., Ortner, G., Pecina, E., Pehamberger, A., Schneider, W. und Wagner, J., 2011. Systematische Gliederung der Böden Österreichs. Österreichische Bodensystematik 2000 in der revidierten Fassung von 2011. Wien: Österreichische Bodenkundliche Gesellschaft.
- Niggli, C., 2012. Der Wasserhaushalt der Weinrebe. *Ithaka Journal*, 1, 71-74.
- ÖNORM L 1050, 2004. Boden als Pflanzenstandort – Begriffe und Untersuchungsverfahren. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM L 1062, 2003. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wassergehaltes und des Wasseranteils. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM L 1063, 2006. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens mittels Drucktopf mit keramischer Platte. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM L 1068, 2005. Physikalische Bodenuntersuchungen – Bestimmung der Dichte von Mineralböden. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖWM (Österreich Wein Marketing GmbH), 2016a. Geschichte. Verfügbar in: <http://www.oesterreichwein.at/unser-wein/kostbare-kultur-besonderer-genuss/geschichte/> [Abfrage am 31. Jänner 2016].
- ÖWM (Österreich Wein Marketing GmbH), 2016b. Der Donauraum. Verfügbar in: <http://www.oesterreichwein.at/unser-wein/klima-boden/klimaraeume-oesterreichs/der-donauraum/> [Abfrage am 02. Jänner 2016].
- ÖWM (Österreich Wein Marketing GmbH), 2016c. Niederösterreich. Topografische Karte. Verfügbar in: <http://www.oesterreichwein.at/daten-fakten/kartenmaterial/gebietskarten/niederosterreich/> [Abfrage am 02. Jänner 2016].
- ÖWM (Österreich Wein Marketing GmbH), 2016d. Grüner Veltliner. Verfügbar in: <http://www.oesterreichwein.at/unser-wein/oesterreichs-rebsorten/weisswein/gruener-veltliner/> [Abfrage am 19. April 2016].

- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., Church, J. A., Clarke, L., Dahe, Q., Dasgupta, P., Dubash, N. K., Edenhofer, O., Elgizouli, I., Field, C. B., Forster, P., Friedlingstein, P., Fuglestvedt, J., Gomez-Echeverri, L., Hallegatte, S., Hegerl, G., Howden, M., Jiang, K., Jimenez Cisneroz, B., Kattsov, V., Lee, H., Mach, K. J., Marotzke, J., Mastrandrea, M. D., Meyer, L., Minx, J., Mulugetta, Y., O'Brien, K., Oppenheimer, M., Pereira, J. J., Pichs-Madruga, R., Plattner, G. K., Pörtner, H. O., Power, S. B., Preston, B., Ravindranath, N. H., Reisinger, A., Riahi, K., Rusticucci, M., Scholes, R., Seyboth, K., Sokona, Y., Stavins, R., Stocker, T. F., Tschakert, P., van Vuuren, D. und van Ypserle, J. P., 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf: IPCC.
- Patzwahl, W., 2007. Bewässerung im Weinbau. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- Pertoll, G., 2008. Bodenfeuchtmessung – Grundlage für die Bewässerung im Weinbau. Obstbau und Weinbau, 5, 145-149.
- Pertoll, G. und Raifer, B., 2011. Bewässerungssteuerung im Weinbau. Obstbau und Weinbau, 48 (5), 168-172.
- Prior, B., 2004. Qualitätssicherung im Weinbau durch gezielte Bewässerung. Erste Erfahrungen aus Rheinhessen im Jahr 2003. Das Deutsche Weinmagazin, 5, 8-13.
- Prior, B., 2005. Tropfbewässerung zur Qualitäts- und Ertragssicherung im Weinbau – Grundlagen und erste Versuchsergebnisse aus Rheinhessen. Das Deutsche Weinmagazin, 8, 32-37.
- Prior, B., 2006a. Bewässerung und Qualität – was sagen die Versuche aus Rheinhessen? Verfügbar in: <http://www.dlr.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/75ac3ec8a63d0ac5c125711700355b32?OpenDocument> [Abfrage am 20. April 2016].
- Prior, B., 2006b. Was bringt eine Tropfbewässerung? Der Deutsche Weinbau, 5, 14-17.
- Redl, H., Ruckenbauer, W. und Traxler, H., 1996. Weinbau heute. Handbuch für Beratung, Schulung und Praxis. Graz/Stuttgart: Leopold Stocker Verlag.
- Richards, L. A. und Fireman, M., 1943. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. Soil Science, 56 (6), 395-404.
- Richter, H., 1976. The water status in the plant: experimental evidence. In: Lange, O. L., Kappen, L. und Schulze, E. D., Hrsg. Water and plant life. Problems and Modern Approaches. Ecological Studies 19. Berlin/Heidelberg: Springer Verlag, 42-58.

- Richter, H., 1977. Saugspannung und Wasserbilanz: ein Beitrag zu ihrer Interpretation. *Phyton*, 18, 29-41.
- Rowell, D. L., 1997. *Bodenkunde: Untersuchungsmethoden und ihre Anwendung; mit 103 Tabellen*. Berlin: Springer Verlag.
- Rupp, D., 2009. Richtig bewässern im Obstbau – Möglichkeiten und Grenzen bei der Ermittlung des Bodenwassergehaltes. *Landinfo*, 1, 39-42.
- Salón, J. L., Chirivella, C. und Castel, J. R., 2005. Response of cv. Bobal to Timing of Deficit Irrigation in Requena, Spain: Water Relations, Yield, and Wine Quality. *American Journal of Enology and Viticulture*, 56 (1), 1-8.
- Scanlon, B. R., Andraski, B. J. und Bilskie, J., 2002. Miscellaneous Methods for Measuring Matric or Water Potential. In: Dane, J. H. und Topp, G. C., Hrsg. *Methods of soil analysis: Part 4 – Physical Methods*. Madison: American Society of Agronomy, 643-670.
- Scheffer, F. und Schachtschabel, P., 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*. 16. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Scholander, P. F., Hammel, H. T., Bradstreet, E. D. und Hemmingsen, E. A., 1965. Sap pressure in vascular plants. Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. *Science*, 148 (3668), 339-346.
- Schopfer, P. und Brennicke, A., 2010. *Pflanzenphysiologie*. Begründet von Hans Mohr. 7. Auflage. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.
- Schultz, H. R., 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant, Cell and Environment*, 26, 1393-1405.
- Schultz, H. R. und Steinberg, B., 2002. Wasserhaushalt der Rebe und Möglichkeiten der Tropfbewässerung, Teil 1. *Das Deutsche Weinmagazin*, 21, 30-35.
- Schulze, E.-D., Beck, E. und Müller-Hohenstein, K., 2002. *Pflanzenökologie*. Heidelberg/Berlin: Spektrum Akademischer Verlag.
- Soil Science Society of America, 1997. *Glossary of Soil Science Terms*. Wisconsin: Soil Science Society of America.
- Stadtgemeinde Dürnstein, 2016. *Geschichte*. Verfügbar in: <http://www.duernstein.at/de/ueber-duernstein/geschichte.html> [Abfrage am 04. Jänner 2016].
- Starr, G. C., 2005. Assessing temporal stability and spatial variability of soil water patterns with implications for precision water management. *Agricultural Water Management*, 72 (3), 223-243.
- Statistik Austria, 2010. *Weingartengrunderhebung 2009. Schnellbericht 1.19*. Wien: Eigenverlag Statistik Austria.

- Turner, N. und Long, M., 1980. Errors arising from Rapid Water Loss in the Measurement of Leaf Water Potential by the Pressure Chamber Technique. *Australian Journal of Plant Physiology*, 7 (5), 527-537.
- van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Gaudillère, J.-P. und Pernet, D., 2008. Different environmental conditions, different results: the role of controlled environmental stress on grape quality and the way to monitor it. In: Williams, P. J., Blair, R. J. und Pretorius, I. S., Hrsg. *Proceedings of the thirteenth Australian Wine Industry Technical Conference*. Adelaide: Australian Wine Industry Technical Conference Incorporated, 39-46.
- van Leeuwen, C., Trégoat, O., Choné, X., Bois, B., Pernet, D. und Gaudillère, J.-P., 2009. Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 43 (3), 121-134.
- Van Zyl, J. L., 1986. Canopy temperature as a water stress indicator in vines. *South African Journal of Enology and Viticulture*, 7 (2), 53-60.
- Veihmeyer, F. J. und Hendrickson, A. H., 1949. The application of some basic concepts of soil moisture to orchard irrigation. *Proceedings of Washington State Horticultural Association*, 45, 25-41.
- Vogt, E. und Schruft, G., 2000. *Weinbau*. 8. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer GmbH.
- Waring, R. H., 1970. Die Messung des Wasserpotentials mit der Scholander-Methode und ihre Bedeutung für die Forstwissenschaft. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 89 (1), 195-200.
- Weingesetz (Bundesgesetz über den Verkehr mit Wein und Obstwein), 2009. *Bundesgesetzblatt I Nr.111/2009 in der geltenden Fassung*.
- Werneck, H. L., 1956. Römischer und vorrömischer Wein- und Obstbau im österreichischen Donaauraum. In: *Zoologisch-Botanische Gesellschaft in Wien*, Hrsg. *Verhandlungen der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Wien*. Bd. 96. Wien: Selbstverlag der Zoologisch-Botanischen Gesellschaft in Österreich: 114-131.
- Williams, L. E. und Araujo, F. J., 2002. Correlations among predawn leaf, midday leaf, and midday stem water potential and their correlations with other measures of soil and plant water status in *Vitis vinifera*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 127 (3), 448-454.
- Williams, L. E. und Baeza, P., 2007. Relationships among Ambient Temperature and Vapor Pressure Deficit and Leaf and Stem Water Potentials of Fully Irrigated, Field-Grown Grapevines. *American Journal of Enology and Viticulture*, 58 (2), 173-181.

Zufferey, M. A. und Murisier, F., 2007. Assessment of plant hydraulics in grapevine on various „terroirs“ in the Canton of Vaud (Switzerland). *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 41 (2), 95-102.

## 7.2. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Repräsentative Wasserpotentiale entlang des Boden-Pflanze-Atmosphäre-Kontinuums (25°C) (nach Schopfer und Brennicke 2010). .....	5
Abbildung 2: Zusammenhang zwischen Matrixpotential und Wasseranteil für drei unterschiedliche Böden (nach Scheffer und Schachtschabel 2010). .....	10
Abbildung 3: Überblick der geographischen Lage der Weinbaugebiete Kremstal (schwarzer Pfeil) und Wachau (violetter Pfeil) innerhalb Niederösterreichs (verändert nach ÖWM 2016c). .....	15
Abbildung 4: Übersicht über den Versuchsstandort Sandgrube (verändert nach Gabler und Kühner 2013). .....	17
Abbildung 5: Übersicht über die Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner (LB-GV)..	19
Abbildung 6: Übersicht über die Weingartenterrasse LB-Rheinriesling (LB-RR). .....	20
Abbildung 7: SK 16 Scholanderdruckkammer. ....	21
Abbildung 8: Einspannung des abgeschnittenen Blattstielendes in Bajonettverschluss der Scholanderdruckkammer (nach Gabler und Kühner 2014). .....	23
Abbildung 9: Watermark-Sensor 200 SS (nach Irrrometer Company 2016). .....	26
Abbildung 10: Übersicht über die Anordnung der Sensoren am Versuchsstandort Sandgrube (verändert nach Gabler und Kühner 2013). .....	27
Abbildung 11: SM1-Sensor (nach Adcon Telemetry 2016). .....	28
Abbildung 12: Bodenprofilgrube (linke Seite) und Einbringen der Stechzylinder (rechte Seite). .....	30
Abbildung 13: Aufkochen der Suspension im Pyknometer mithilfe des Bunsenbrenners. ....	34
Abbildung 14: Automatisierte Pipettieranlage des IHLW. ....	37
Abbildung 15: Nasssiebapparatur. ....	38
Abbildung 16: Druckplattenapparat. ....	39
Abbildung 17: OenoFoss Gerät (rechts im Hintergrund) zur Bestimmung des Mostgewichts, des titrierbaren Säuregehalts und des hefeverfügbaren Stickstoffgehalts sowie digitales Handrefraktometers (rechts im Vordergrund) zur zusätzlichen Bestimmung des Mostgewichts. ....	42
Abbildung 18: Monatsniederschlagssummen (Werte oberhalb der blauen Balken) und Monatsmittelwertverlauf der Temperatur des Jahres 2015 für den Versuchsstandort Sandgrube. ....	43

Abbildung 19: Monatsniederschlagssummen der Jahre 2013, 2014 und 2015 für den Versuchsstandort Sandgrube.....	44
Abbildung 20: Monatsniederschlagssummen (Werte oberhalb der blauen Balken) und Monatsmittelwertverlauf der Temperatur vom Juni bis Dezember 2015 für den Versuchsstandort Loibenberg. ....	45
Abbildung 21: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa).....	47
Abbildung 22: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa).....	47
Abbildung 23: Korrelation der Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale ( $\Psi_{fm}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube in Kombination mit der 1:1 Geraden.....	48
Abbildung 24: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-berechneten Auswertereihe und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. Die Mittelwerte der berechneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.....	50
Abbildung 25: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter frühmorgendlicher Blattwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-berechneten Auswertereihe und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. Die Mittelwerte der berechneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,2 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-0,6 MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse.....	51

Abbildung 26: Mittelwerte der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale – berechnet aus allen Messwerten des Untersuchungszeitraums – der Sorten GV (grün) und RR (rot), jeweils getrennt in nicht-beregnete und beregnete Auswertereien und deren Zuordnungen zu den in Tabelle 1 definierten Trockenstressbereichen.....	52
Abbildung 27: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,6 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-1,2 MPa).....	54
Abbildung 28: Tagesniederschlagsmengen (blaue Balken) und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,6 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-1,2 MPa).....	54
Abbildung 29: Korrelation der Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{st}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube in Kombination mit der 1:1 Geraden. ....	55
Abbildung 30: Beziehung zwischen dem Wasserdampfsättigungsdefizit (VPD) und dem Stammwasserpotential $\Psi_{st}$ (nach Heßdörfer 2015).....	56
Abbildung 31: Korrelation des mittleren Wasserdampfsättigungsdefizits der Luft mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale der Auswertereihe Nr. 4 (rote Markierungspunkte) und der Auswertereihe Nr. 6 (schwarze Markierungspunkte) des Versuchsstandorts Sandgrube. Der blaue Kreis umfasst die vermuteten Ausreißer. ....	57
Abbildung 32: Tagesniederschlagsmengen und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-beregneten Auswertereihe und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. Die Mittelwerte der beregneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an (-0,6 MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich (-1,2 MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse. .	58

- Abbildung 33: Tagesniederschlagsmengen und gemittelter mittäglicher Stammwasserpotentialverlauf (Mittelwerte mit Standardabweichung) der nicht-berechneten Auswertereihe und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. Die Mittelwerte der berechneten Auswertereihe wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. Grüne Grenzlinie zeigt moderaten Trockenstressbereich an ( $-0,6$  MPa), rote Grenzlinie den starken Trockenstressbereich ( $-1,2$  MPa) und die blauen, transparenten Rechtecke in der Datumsachse die Bewässerungsturnusse. . 59
- Abbildung 34: Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale – berechnet aus allen Messwerten des Untersuchungszeitraums – der Sorten GV (grün) und RR (rot), jeweils getrennt in nicht-berechnete und berechnete Auswertereien und deren Zuordnungen zu den in Tabelle 1 definierten Trockenstressbereichen..... 60
- Abbildung 35: Korrelation des mittleren Wasserdampfsättigungsdefizits der Luft (VPD) mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{St}$ ) der nicht-berechneten (links) und der berechneten (rechts) Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. .... 61
- Abbildung 36: Korrelation des mittleren Wasserdampfsättigungsdefizits der Luft (VPD) mit den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{St}$ ) der nicht-berechneten (links) und der berechneten (rechts) Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling..... 61
- Abbildung 37: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. .... 63
- Abbildung 38: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. .... 64
- Abbildung 39: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 1 (WM1), Nr. 2 (WM2), Nr. 3 (WM3) und Nr. 5 (WM5) der Auswertereihe Nr. 4 in 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. .... 64
- Abbildung 40: Gemittelte Bodenmatrixpotentialverläufe (aus den Tagesmittelwerten der Watermark-Sensoren Nr. 1, Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 5 berechnet) der Auswertereihe Nr. 4 in 50, 100, und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. .... 65

Abbildung 41: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	67
Abbildung 42: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	68
Abbildung 43: Bodenmatrixpotentialverläufe (Tagesmittelwerte) der Watermark-Sensoren Nr. 6 (WM6), Nr. 8 (WM8), Nr. 9 (WM9) und Nr. 10 (WM10) der Auswertereihe Nr. 6 in 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	68
Abbildung 44: Gemittelte Bodenmatrixpotentialverläufe (aus den Tagesmittelwerten der Watermark-Sensoren Nr. 6, Nr. 9 und Nr. 10 berechnet) der Auswertereihe Nr. 6 in 50, 100, und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	69
Abbildung 45: SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 10, 20, 30, 40 und 50 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	71
Abbildung 46: SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 60, 70, 80, 90 und 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	72
Abbildung 47: SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF1 der Auswertereihe Nr. 4 in 110, 120, 130, 140 und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	72
Abbildung 48: SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF2 der Auswertereihe Nr. 6 in 40, 50, 60, 70, 80, 90 und 100 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	73
Abbildung 49: SFU-Verlauf (Tagesmittelwerte) des SM1-BF2 der Auswertereihe Nr. 6 in 110, 120, 130, 140 und 150 cm Bodentiefe in Abhängigkeit von den Tagesniederschlagsmengen. ....	74
Abbildung 50: Wasseranteile und SFU-Werte der Auswertereihe Nr. 4 in 10 bis 60 cm Bodentiefe. Der blaue Verlauf gibt die SFU-Werte des SM1-BF1, der schwarze Verlauf gibt die berechneten Wasseranteile aus zwei Stechzylinderproben (inkl. Standardabweichung) und der grüne Verlauf bzw. rote Verlauf geben die berechneten Wasseranteile aus Bohrstockproben wieder. Der Bereich zwischen den schwarzen, gestrichelten Linien gibt die nutzbare Feldkapazität an, welche aus der Retentionsfunktion abgeleitet wurde. ....	76

- Abbildung 51: Wasseranteile und SFU-Werte der Auswertereihe Nr. 6 in 10 bis 60 cm Bodentiefe. Der blaue Verlauf gibt die SFU-Werte des SM1-BF2, der schwarze Verlauf gibt die berechneten Wasseranteile aus zwei Stechzylinderproben (inkl. Standardabweichung) und der grüne Verlauf bzw. rote Verlauf geben die berechneten Wasseranteile aus Bohrstockproben wieder. Der Bereich zwischen den schwarzen, gestrichelten Linien gibt die nutzbare Feldkapazität an, welche aus der Retentionsfunktion abgeleitet wurde. .... 77
- Abbildung 52: Retentionsfunktion gemittelt über das gesamte Bodenprofil (0 bis 60 cm) der Auswertereihe Nr. 4 und Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube. .... 83
- Abbildung 53: Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{st}$ ) der Auswertereihe Nr. 4 (links) und der Auswertereihe Nr. 6 (rechts). .... 85
- Abbildung 54: Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{st}$ ) der nicht-berechneten Auswertereihe (links) und der berechneten Auswertereihe (rechts) der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. .... 85
- Abbildung 55: Korrelation zwischen den frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen ( $\Psi_{fm}$ ) und den mittäglichen Stammwasserpotentialen ( $\Psi_{st}$ ) der nicht-berechneten Auswertereihe (links) und der berechneten Auswertereihe (rechts) der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. .... 86
- Abbildung 56: Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 (WM5) in 50 cm Bodentiefe in Verbindung mit den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale (schwarze Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) und den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale (rote Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 4. Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt. .... 88
- Abbildung 57: Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum. .... 89
- Abbildung 58: Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 5 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum. .... 89

Abbildung 59: Verlauf des Bodenmatrixpotentials (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 (WM6) in 50 cm Bodentiefe in Verbindung mit den Mittelwerten der frühmorgendlichen Blattwasserpotentiale (schwarze Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) und den Mittelwerten der mittäglichen Stammwasserpotentiale (rote Mittelwertmarkierung, inkl. Standardabweichung) der Auswertereihe Nr. 6. Die Mittelwerte der mittäglichen Stammwasserpotentiale wurden zur besseren Darstellung um einen Tag versetzt.....	90
Abbildung 60: Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum. ....	91
Abbildung 61: Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Bodenmatrixpotentialen (Tagesmittelwerte) des Watermark-Sensors Nr. 6 in 50 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum. ....	92
Abbildung 62: Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF1) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum. ....	93
Abbildung 63: Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF1) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 4 über den Untersuchungszeitraum. ....	94
Abbildung 64: Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF2) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum. ....	95
Abbildung 65: Zusammenhang zwischen mittäglichen Stammwasserpotentialen (Mittelwerte) und Scaled Frequency Units (Tagesmittelwerte) des SM1-Sensors (SM1-BF2) in 40 cm Bodentiefe der Auswertereihe Nr. 6 über den Untersuchungszeitraum. ....	95
Abbildung 66: Mostgewichte der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.....	96
Abbildung 67: Mostgewichte der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-beregneten und beregneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. ....	97

Abbildung 68: Gesamtsäure der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner.....	98
Abbildung 69: Gesamtsäure der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. ....	99
Abbildung 70: Hefeverfügbare Stickstoff der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner. ....	100
Abbildung 71: Hefeverfügbare Stickstoff der beprobten Beerenmischprobe (n=100 Beeren) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling.....	100
Abbildung 72: Durchschnittlicher Weinstockertrag (inkl. Standardabweichung) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Sorten Grüner Veltliner (GV, links) und Rheinriesling (RR, rechts) des Versuchsstandorts Loibenberg. ....	101
Abbildung 73: Durchschnittliches Traubengewicht (inkl. Standardabweichung) der nicht-berechneten und berechneten Auswertereihe der Sorten Grüner Veltliner (GV, links) und Rheinriesling (RR, rechts) des Versuchsstandorts Loibenberg. ....	102

## 7.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Auswirkungen unterschiedlicher frühmorgendlicher Blatt ( $\Psi_{fm}$ )- und mittäglicher Stammwasserpotentiale ( $\Psi_{St}$ ) auf bedeutende Stoffwechselfvorgänge von Reben (verändert nach Schultz und Steinberg 2002, Kopyt und Ton 2005, van Leeuwen et al. 2009, Deloire und Heyns 2011).....	14
Tabelle 2: Korngrößenklassen des Feinbodens (verändert nach ÖNORM L 1050 2004).....	35
Tabelle 3: Druckstufen und deren abgeschätzte Dauer.....	40
Tabelle 4: Bewässerungsturnusse (Datum und Zeit) der berechneten Auswertereien der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner und der Weingartenterrasse LB-Rheinriesling. ....	49
Tabelle 5: Mittelwerte der Trockendichten der Auswertereien Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.....	78
Tabelle 6: Mittelwerte der Feststoffdichten der Auswertereien Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.....	79
Tabelle 7: Mittelwerte der Feststoffdichten der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner in 10 bis 60 cm Bodentiefe.....	79
Tabelle 8: Mittelwerte der Porenanteile der Auswertereien Nr. 4 (links) und Nr. 6 (rechts) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.....	80
Tabelle 9: Mittelwerte der Korngrößen des Feinbodens (< 2 mm) in 10 bis 60 cm Bodentiefe.....	80
Tabelle 10: Mittelwerte der Korngrößen des Feinbodens (< 2 mm) der Weingartenterrasse LB-Grüner Veltliner in 10 bis 60 cm Bodentiefe. ....	81
Tabelle 11: Retentionsfunktionswertepaare von 10 bis 60 cm Bodentiefe und deren Mittelwert über das gesamte Bodenprofil für die Auswertereihe Nr. 4 des Versuchsstandorts Sandgrube. Pro Tiefe jeweils aus zwei Stechzylinderproben im Labor bestimmt.....	82
Tabelle 12: Retentionsfunktionswertepaare von 10 bis 60 cm Bodentiefe und deren Mittelwert über das gesamte Bodenprofil für die Auswertereihe Nr. 6 des Versuchsstandorts Sandgrube. Pro Tiefe jeweils aus zwei Stechzylinderproben im Labor bestimmt.....	82