



Bewässerungssteuerung von Weinreben

Diplomarbeit

Betreuer:

Univ. Prof. DI Dr. Willibald Loiskandl

Dipl. Ing. Reinhard Nolz

Universität für Bodenkultur Wien (BOKU)

Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft (IHLW)

Eingereicht von

Bakk. techn. Martin Wolf

Fassung: 20.04.2012

Erst lesen, dann trinken.

Vorwort

Mit dieser Seite bedanke ich mich bei allen die mich in den vergangenen sieben Jahren begleitet und mich beeinflusst haben. Ob in Wien oder sonst wo.

Ganz besonders bedanke ich mich natürlich bei meinen Eltern. Sie ermöglichten mir, dieses Studium unbeschwert zu Ende zu bringen. Dabei nie ein Wort der Ungeduld oder Unzufriedenheit zu verlieren war bestimmt nicht einfach.

Was mein Studium betrifft bedanke ich mich ganz herzlich bei meinem lieben Freund Helmut. Ohne ihn wäre mein Studium so nicht möglich gewesen.

Was diese Arbeit angeht, bedanke ich mich beim gesamten IHLW-Team. Ganz besonders bei meinem Betreuer DI Reinhard Nolz, der mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand. Der sich nie aus der Ruhe bringen ließ und mir stets Verständnis entgegen brachte. Außerdem bedanke ich mich bei Maria Isabel, Herrn Karl, Martina und Christian für deren Hilfe. Daneben bedanke ich mich bei Andi für die zuverlässige Messarbeit.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei Herrn DI Dr. Loiskandl für sein Engagement, für seine Schützenhilfe bei messerscharfen Diskussionen mit Herrn DI Dr. Kammerer, und für seine verständnisvolle Art.

Martin Wolf

Linz, 15.04.12

Kurzfassung

In einem Weingarten im burgenländischen Andau wurde eine Wetterstation und Bodenwassersensoren zur Steuerung einer Unterflurtropfbewässerung (UTB) installiert. Die UTB sollte mit dem Konzept der „Regulierten Defizitbewässerung (RDI)“ betrieben werden. RDI ermöglicht es die Rebe unter Trockenstress zu setzen. Die Rebe fördert das Beerenwachstum dadurch stärker, als das Sprosswachstum.

Im Feld wurden das Matrixpotential mit Watermark-, und der Wassergehalt des Bodens mit FDR-Sensoren gemessen. Nach diesen Werten kann die Bewässerung gesteuert werden. Ob und wie viel bewässert werden soll, hängt von den festgelegten Bewässerungsgrenzen ab. Untersucht wurde die Eignung der Sensoren zur Bewässerungssteuerung und welche Methode zur Festlegung der Grenzwerte geeignet ist. Es wurde untersucht, ob die Ermittlung des Bodenwasserstatus über rechnerische Ansätze möglich, oder die Messung im Feld nötig ist. Diese Erkenntnisse sollen zu einer Optimierung des Systems beitragen.

Die Watermarksensoren (WM) maßen bis in eine Tiefe von 50 cm, die FDR Sensoren bis in eine Tiefe von einem Meter. Die Wetterdaten wurden durch die Wetterdatenstation erfasst und zusätzlich von der ZAMG-Wetterstation in Andau bezogen.

Im Labor wurden die Bodenart, verschiedene Bodenkennwerte und die Referenzwerte für die Bewässerungsgrenzen ermittelt. Für letzteres war die Bestimmung der Retentionsfunktion nötig. Die Kennwerte sind teilweise Eingangswerte für die Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Bewässerungsgrenzen.

Es stellte sich heraus, dass die aktuelle Sensorausstattung für die Umsetzung des Bewässerungskonzeptes und zur Steuerung der UTB prinzipiell geeignet ist. Es besteht jedoch Potential zur Verbesserung. Diese kann durch Änderung und Ausweitung der Sensortiefen erreicht werden. Die Bodenwasserbilanzierung mit FDR Sensoren war den rechnerischen Methoden vorzuziehen. Für die Ermittlung der Bewässerungsgrenzen konnten zwei, für die aktuelle Untersuchung, vorzuziehende Methoden ermittelt werden.

Abstract

A weather station and sensors for soil water measurement were installed in a vineyard on a research site in Andau for controlling a newly applied subsurface drip irrigation (SDI) system. This SDI was operated with a focus on a “Regulated Deficit Irrigation” (RDI) strategy. With RDI the winegrower is capable of exposing the vine to drought stress. This should make the vine focus on growing its berries, instead of its shoots.

In-situ measurements of matric potential (with granular matric sensors) and water content (with FDR-sensors) were conducted. These sensors, respectively their data, were examined and assessed. Methods of irrigation-threshold determination were examined. It was investigated if the instrumentation could be optimized. Another question was if the soilwater status should be calculated using climatic data from the weather stations, or measured in-field with sensors.

The Watermark-sensors (WM) actually measured in depths 10, 30 and 50 cm, the FDR sensors up to depths of one meter. The weather data for soil water status calculation was obtained from a weatherstation in the field and from the ZAMG (Central Institute for Meteorology and Geodynamics).

Soil type, hydraulic conductivity, bulk density and the representative values for irrigation thresholds were determined in the laboratory. For this, the determination of the retention function was necessary.

It can be concluded, that the RDI concept can be implemented, and the SDI can be operated with the actual equipment of sensors. Although there is room for improvement. This could be achieved by alteration and expansion of the sensor depths. The soil water status should be determined by in-field measurements, instead of calculations. Calculations showed to be less accurate. Preferable methods for irrigation threshold-determination (for the actual test site and soil type) could be found.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	6
2. Frage- und Problemstellung	8
3. Theoretische Grundlagen	9
3.1. Unterflurtropfbewässerung (UTB)	9
3.2. Anforderungen der Rebe	10
3.3. Pflanzenstress durch Wassermangel	12
3.4. Beerenphysiologie	13
3.5. Beerenwachstum im jahreszeitlichen Verlauf	13
3.6. Wasser in der Pflanze (Aufnahme, Transport, Abgabe – SPAC)	15
3.7. Wasser im Boden	17
3.8. Bodenwasserbilanz	18
3.9. Matrixpotential	21
3.10. Wasseranteil	23
3.11. Matrixpotential – Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)	23
3.12. Grundlagen Pedotransferfunktion	28
3.13. Regulated Deficit Irrigation (RDI)	29
3.14. Sensoren	31
3.15. Bewässerungssteuerung (RDI) mit Matrixpotential und/oder Wasseranteilssensoren	37
4. Material und Methoden	41
4.1. Projektbeschreibung	41
4.2. Felddaten	43
4.3. Bodenphysikalische Parameter	49
5. Ergebnisse und Diskussion	60
5.1. Labordaten	60
5.2. Grenzwerte und FK, nFK, PWP aus unterschiedlichen Methoden	65
5.3. Felddaten	72
6. Schlussfolgerung/Zusammenfassung	90
7. Quellenverzeichnis	94
7.1. Literatur	94
7.2. Internetquellen	100

8. Abbildungsverzeichnis	101
9. Tabellenverzeichnis	104
10. Anhang	105
10. Anhang	105
10.1. Theorie	105
10.2. Ergebnisse.....	110

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen	
BUS	Binary Unit System
bzw.	beziehungsweise
d	Durchmesser
ET	Evapotranspiration
et al.	und andere
ET0	Referenzevapotranspiration
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FDR	Frequency Domain Reflectometry
FK	Feldkapazität
iVzRTF	"Im Vergleich zur Retentionsfunktion"
k_c	Pflanzenkoeffizient
k_s	Hydraulische Leitfähigkeit im gesättigten Bereich
lat.	latein
log	Logarithmus
min.	Minimum
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NT	Nachteil
o.ä.	oder ähnliches
OG	obere Grenze
PTF	Pedotransferfunktion
PWP	Permanenter Welkepunkt
RDI	Regulated Deficit Irrigation
RTF	Retentionsfunktion
SPAC	Soil Plant Atmosphere Continuum
u.a.	unter anderem
UG	untere Grenze
UTB	Unterflurtropfbewässerung
VT	Vorteil
WM	Watermark Sensor
z.B.	zum Beispiel
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Einheiten	
h	Stunde(n)
m	Minute(n)
s	Sekunde(n)
m	Meter
m/s	Meter/Sekunde
cm	Zentimeter
mm	Millimeter
μm	Mikrometer
m^2	Quadratmeter
m^3	Kubikmeter
km^2	Quadratkilometer
pF	Logarithmus des negativen Matrixpotentials
hPa	Hektopascal
kPa	Kilopascal
cmWS	Zentimeter Wassersäule
%	Prozent
kOhm	Kilo-Ohm

1. Einleitung

Bewässerung findet im Weinbau seit Jahrtausenden Anwendung. Schon in alten ägyptischen Weingärten fanden sich zentral gelegene Wasserreservoirs, von denen aus die Reben mit Wasser versorgt wurden. Auch die antiken Griechen verfolgten ähnliche Strategien zur Ertragssicherung (Patzwahl, 2007). Bewässert wurde vor allem im Stau- oder Rieselfverfahren.

Zu den neueren Bewässerungsmethoden zählen beispielsweise die Beregnungs- und die Tropfverfahren. Hierbei ist die Unterflurtropfbewässerung (UTB) jene mit dem höchsten Wirkungsgrad. Sie versorgt vor allem die Kulturpflanze – und nicht das Beikraut – und hält die Oberfläche trocken, sodass weniger Verdunstungsverluste auftreten.

Die vielfältigen Anforderungen verschiedener Rebsorten machen eine bedarfsgerechte Bewässerung schwierig. Bei Weißweinsorten steht frisches Aroma und angemessene Säure im Vordergrund. Beides verringert sich bei Trockenheit. Bei Rotweinsorten sind Charakteristika wünschenswert, die sich stärker durch moderaten Trockenstress ausprägen (Schumacher et al., 2011).

Um dies zu erreichen ist eine gezielte Bewässerung, die sich am Wasserbedarf der Rebe orientiert, notwendig. Sie kann sowohl zur Qualitätssicherung, als auch zur Ertragsmengensteuerung eingesetzt werden.

Die Rebe transportiert Wasser vom Boden zur Atmosphäre. Die treibende Kraft ist der unterschiedliche Energiegehalt des Wassers in Boden und Atmosphäre. Jeder Stoff bewegt sich vom Ort höheren Potentials, zum Ort niedrigeren. Die Gesamtheit der energetischen Abläufe des Wassers auf seinem Weg von einem Ort zum anderen kann durch das Potentialkonzept beschrieben werden. Ein weiterer Ansatz ist das SPAC (Soil-Plant-Atmosphere-Continuum). Dieses betrachtet den Weg des Wassers als Aneinanderreihung von Widerständen und verknüpft so den Boden mit der Atmosphäre.

Stoffwechselaktive Pflanzen bestehen zu 85 - 95 % aus Wasser (Redl et al., 1996). Der Wasserhaushalt der Pflanze ist durch die Wechselwirkungen der Aufnahme und Abgabe geprägt. Diese sind durch die Witterungsverhältnisse bestimmt.

Aufgrund von Beobachtungen der Witterungsverhältnisse, ist es möglich eine Bewässerungssteuerung basierend auf der atmosphärischen Wasserbilanz umzusetzen. Es werden die zugeführten Mengen Wasser den verbrauchten gegenübergestellt und so ein etwaiger Bewässerungsbedarf ermittelt. Der Vorteil dieser Methode ist der geringe Arbeitsaufwand und die geringe Menge an benötigten Daten. Nachteilig ist, dass die Berechnungen die Bodenwasserspeicherung vernachlässigen und teils auf empirische/geschätzte Parameter zurückgreifen.

Ist der Bodenwassergehalt so niedrig, dass die Pflanze unterversorgt wird, vermindert sich ihre Stoffwechselleistung. Sie leidet unter Stress und zeigt ein von der Norm abweichendes Verhalten.

Die einfachste Methode zur Stresserfassung ist die direkte visuelle Kontrolle des Pflanzenkörpers. Zusammengerollte Blätter und ähnliche Welkeerscheinungen sind Anzeichen für Stress. Fortschrittlicher ist die Bestimmung des Blattwasserpotentials, der stomatären Leitfähigkeit oder des Gesamtwasserpotentials. Messungen direkt an der Pflanze sind aufwändig und damit kostenintensiv. Eine weitere Möglichkeit ist, den Wasserhaushalt der Pflanze indirekt über den Wasserhaushalt des Bodens zu bestimmen.

Im **Feld** kann das **Matrixpotential** oder der **Wasseranteil** gemessen werden. Diese Messgrößen sind Kenngrößen für den Bodenwasserstatus des Bodens. Sie können kontinuierlich und automatisiert erfasst werden. Fällt das Matrixpotential oder der Wasseranteil unter einen bestimmten Wert, so sollte bewässert werden. Ein Vorteil der Messung mittels Sensoren ist die Umsetzbarkeit zeitgemäßer Bewässerungsstrategien, wie beispielsweise einer Regulierten Defizitbewässerung (RDI / Regulated Deficit Irrigation).

Dieses Konzept wird aktuell in der Qualitätsweinherstellung angewandt (McCarthy et al, 2002). Dabei wird die Pflanze absichtlich unter Stress gesetzt indem die gesamte Wurzelzone Wassermangel erleidet. Dadurch investiert die Pflanze verstärkt Energie in das Frucht-, anstelle des Sprosswachstums. Abhängig von der Bewässerungsstrategie können Stressgrenzen festgelegt werden. Werden diese unter-, oder überschritten wird die Bewässerung gestartet oder gestoppt (Dry et al, 1998; Dry et al., 2000; McCarthy et al, 2000).

2. Frage- und Problemstellung

Im Rahmen von zwei Projekten am Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft („Innovativer Ansatz für ein Unterflurbewässerungssystem“, 2009-2012, gefördert durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG; „Monitoring und Steuerung eines Neuartigen Bewässerungssystems für effektive Wassernutzung“, 2010-2011, gefördert durch die Wirtschaftskammer Wien) wurde ein Weingarten mit einer Wetterstation und Bodenwassersensoren zur Steuerung einer neu installierten UTB ausgestattet. Die Wetterstation lieferte die atmosphärische Wasserbilanz, die Wasseranteilssensoren erfassten den Profilwasseranteil bis in eine Tiefe von 80, bzw. 100 cm, das Matrixpotential wurde in 10, 30 und 50 cm gemessen.

Diese Diplomarbeit stützt sich auf die Daten des zweiten Projektjahres (1. August 2010 bis 31. Juli 2011).

Fragen:

1. Ist die derzeitige Sensorausstattung und -anordnung geeignet um eine bedarfsorientierte Steuerung der UTB umzusetzen?
2. Können mit der gewählten Sensorausstattung und -anordnung moderne Bewässerungskonzepte (etwa RDI) umgesetzt werden?
3. Wie könnte die Sensorausstattung und -anordnung aus wissenschaftlicher Sicht optimiert werden?
4. Wie könnte die Sensorausstattung und -anordnung aus praktischer und wirtschaftlicher Sicht (Winzer) optimiert werden?

3. Theoretische Grundlagen

3.1. Unterflurtropfbewässerung (UTB)

Unterflurtropfbewässerungssysteme sind unterirdisch verlegte und vernetzte Tropfschläuche, die an eine Wasserversorgung angeschlossen werden. Weitere Komponenten ergänzen das System.

Das Verfahren der Tropfbewässerung stellt die wichtigste zusätzliche Bewässerungsart im Weinbau dar (Patzwahl, 2007). UTB ist definiert als „Aufbringung von Bewässerungswasser unter der Oberfläche durch Emitter, mit üblichen Abgabemengen wie sie normale Tropfbewässerungen bieten“ (ASAE Standards, 1999). UTB-Systeme können einen Wirkungsgrad von über 90 % erreichen. Herkömmliche Regnersysteme weisen Wirkungsgrade von 40 – 60 % auf (Camp et al, 2000).

Vorteile/Nachteile (Dasberg & Or, (1999), Phene (1995), Camp (1998))

Bauliche Vorteile

Das modular aufgebaute System besteht aus Einzelteile, die einfach getauscht werden können, ohne das Gesamtsystem zu beeinträchtigt. Durch die tiefe Verlegung sind die Leitungen besser vor Umwelteinflüssen geschützt, als oberirdische Leitungen anderer Systeme. Das Bewässerungswasser wird gleichmäßig und nahe den aufnehmenden Wurzeln aufgebracht.

Betriebliche Vorteile

Durch die zentrale Steuerung des Systems am Hauptventil ist nur geringer manueller Aufwand zur Bewässerung nötig. Wird das System mit einer EDV-unterstützten Bewässerungsausrüstung betrieben, ist die Automation des Betriebes möglich.

Die oberen Bodenschichten erfahren keine Bewässerung. So vermindert eine UTB die Evaporation des Bodenkörpers, durch geringeren Beikrautbewuchs die gesamte Transpiration des Anbaugesbietes und den Krankheitsdruck durch pathogene Organismen. Weitere Vorteile sind die oberirdische Befahrbarkeit und verminderter Oberflächenabfluss und Erosion. Des Weiteren verbessert sich die Bodenatmung durch die geringere Verschlammung der oberflächennahen Poren.

Nachteile

Das Mikro- und Makroklima verschiebt sich hin zum trockenen Milieu. Durch die geringere Feuchte der oberen Bodenschichten und des Blattwerkes wird weniger Wärmeenergie als latente Wärme abgeführt. Durch die im Boden verlegten Schläuche ist die Tiefenbearbeitung des Bodenkörpers ausgeschlossen. Zusätzlich sind Reparaturen aufwändig und nur unter großem Aufwand durchführbar. Um auf Fehler rechtzeitig aufmerksam zu werden, müssen Durchflussrate und Druck ständig überwacht werden. Das System muss regelmäßig gespült werden, um Verstopfungen vorzubeugen. Die beste präventive Maßnahme gegen Verstopfung ist Filtration.

Bei Tropfbewässerungen ist generell keine Frostschutzberechnung möglich. Dies kann die Reife von Spätlesen erschweren, wenn der erste Frost früh im Jahr einsetzt.

Einige Komponenten sind teuer in der Anschaffung. Hierunter fallen Filter, Druckreduzierer und Wasserzähler (Nolz, 2007). Die unterirdische Verlegung des Rohr-/Schlauchsystems ist arbeitsaufwändig und daher ebenfalls kostenintensiv.

3.2. Anforderungen der Rebe

Die vielfältigen Anforderungen verschiedener Rebsorten machen eine bedarfsgerechte Bewässerung schwierig. In erster Linie ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Rot- oder Weißweinsorte handelt. In zweiter Linie sind die Sorten (Arten) zu unterscheiden (Schumacher et al., 2011).

Ein erweitertes Augenmerk muss sowohl auf die Ertragsmenge, als auch auf die Qualität der Trauben gelegt werden. Hoher Ertrag bedeutet nicht unbedingt hohe Weinqualität. Gezielte Bewässerung, die sich am Wasserbedarf der Rebe orientiert, kann sowohl zur Qualitätssicherung, als auch zur Ertragsmengensteuerung eingesetzt werden kann.

Bei Weißweinsorten steht frisches Aroma und angemessene Säure im Vordergrund. Beides verringert sich bei Trockenheit. Bei Rotweinsorten sind Farbe, Extrakt, Struktur und ein höherer Tanningehalt wünschenswert. Diese Charakteristika prägen sich stärker durch moderaten Trockenstress aus (Schumacher et al., 2011).

Generell können die Anforderungen der Rebe an die Wasserversorgung zweierlei Kategorien zugeteilt werden:

1. Exogene Einwirkungen
2. Reaktionen der Pflanze (Stress durch Wassermangel)

Exogene Einwirkungen betreffen vor allem die klimatischen Verhältnisse (Temperatur, Niederschlag, Sonnenscheindauer, Windstärke, u.a.) und das Substrat auf dem die Rebe wächst. Der bewachsene Boden zeichnet sich durch charakteristische, typische physikalische Eigenschaften aus. Von Interesse sind vor allem die Bodenart, das Wasserspeichervermögen und die Durchlässigkeit. Einen weiteren exogenen Einfluss kann die Qualität des Bewässerungswassers darstellen.

Das Zuchtziel des Winzers bestimmt letztendlich die Feinabstimmung des Bewässerungsmanagements. Ziele können ein hohes Mostgewicht, ein hoher Alkoholgehalt, eine bestimmte Farbe oder Geschmack sein. Des Weiteren kann für eine bestimmte Sorte ein bestimmtes Merkmal erstrebenswert sein.

Ein bestimmtes Zuchtziel, die Ertragssicherung, sowie die Anpassung an die Auswirkungen der nicht steuerbaren Einflüsse auf die Entwicklung der Rebe (vor allem die Dynamik des Wetters) rücken eine bedarfsgerechte Bewässerung in den zentralen Fokus eines ertrags- und gleichzeitig qualitätsorientierten Winzers.

Junge und ausgewachsene Reben stellen unterschiedliche Ansprüche an das Bewässerungskonzept. So kann angenommen werden, dass junge Reben etwa ein Viertel des Wasserstressses ertragen können, den ausgewachsene Reben vertragen (Buss, 2000). Junge Pflanzen weisen eine geringere Wurzeldichte auf und verbrauchen weniger Wasser (Beckingham et al, 2004)

3.3. Pflanzenstress durch Wassermangel

Stress ist der einwirkende Faktor, welcher eine Belastungssituation auslöst. Hierbei werden Anpassungsvorgänge des Körpers an veränderte Umweltbedingungen aktiviert. Es ist zwischen einer notwendigen Aktivierung des Organismus zur Weiterentwicklung und Stärkung und dem Einwirken von übermäßigen – schädigenden – Anforderungen zu unterscheiden (Larcher, 1994).

Schon geringster Wasserstress lässt das Zellwachstum verlangsamen und stoppt dieses alsbald. Atmung, Photosynthese und Zuckerakkumulation werden erst bei größerem Wasserstress beeinträchtigt. Trockenstress schränkt das Wachstum und die Stoffwechselfvorgänge stärker ein als jeder andere Stressor. Des Weiteren kann Wasserstress zu einem erhöhten Pilzinfektionsrisiko führen. Nach Larcher (1994) wird Stress als Belastungssituation aufgefasst, die in einem Organismus außergewöhnliche Abweichungen vom Normalverhalten auslöst.

Um Zeiten knapper Wasserressourcen zu überbrücken, haben Landpflanzen diverse Mechanismen entwickelt, um Wasserstress entgegen zu wirken. Hierzu zählen beispielsweise die Ausbildung einer großen Zentralvakuole, Ausbildung cutin- oder suberinhaltigen Gewebes, Schließen der Stomata (Methode gegen akuten Wassermangel) oder sukkulentes Wachstum.

Eine Besonderheit der Weinpflanze ist, dass sie durch Osmoregulation fähig ist gezielt Stoffe (z.B. Kalium, Aminosäure oder Zucker) in Zellen einzulagern, um das osmotische Potential zu senken. Dadurch wird das gesamte Wasserpotential in der Pflanze gesenkt. Dies erhöht die Potentialdifferenz zwischen Boden und Pflanze. So kann die Rebe trotz niedrigem Matrixpotential weiter Wasser aus dem Boden ziehen (Schultz, 2005). Dies macht, neben weiteren Stressregulationsmechanismen, Weinreben zu äußerst widerstandsfähigen Pflanzen.

3.4. Beerenphysiologie

Die Beere selbst besteht aus 3 verschiedenen Gewebearten: Fruchtfleisch, Haut und Samen. Das Fruchtfleisch enthält die Flüssigkeit und den überwiegenden Teil des Zuckers. Die Haut enthält den Großteil der Farbstoffe und der Aromen. Samen enthalten vor allem Tannine und Fette. Durch die Veränderung des Beerenvolumens (und des Volumen/Oberflächen-Verhältnisses) kann der Geschmack des Weines beeinflusst werden. Aus kleinen Beeren lässt sich ein stärker zuckerhaltiger Most (= Traubensaft) gewinnen. Je mehr Zucker der Most aufweist, desto süßer wird der Wein schmecken oder höher wird der Alkoholgehalt des daraus gewonnenen Weines liegen. Je mehr Samen eine Beere aufweist, desto bitterer und schwerer wird der Wein durch die Tannine.

3.5. Beerenwachstum im jahreszeitlichen Verlauf

Redl et al. (1996) nennt als Mindestanforderungen für Weinreben:

Tabelle 1: Mindestansprüche der Rebe an das Klima (Redl et al., 1996)

Mindestansprüche der Rebe an das Klima			
Vegetationsdauer	180-240	Tage	je nach Rebsorte
Temperatur (JahresØ)	8.5 - 9	°C	min.
Temperatur (JahresØ)	11 - 16	°C	optimum
Temperatur (JuliØ)	18	°C	min.
Temperatur (Blütezeit)	15	°C	min., auch nachts
TemperaturΣ (Veg.Per.)	2900	°C	min.
Sonnenscheindauer/Jahr	1300	h	min.
Sonnenscheindauer/Jahr	1700 - 2000	h	optimum
Niederschlag/Jahr	400	mm	min.

Beerenwachstum

Das Wachstum einer Beere kann auf ihrem Weg von der Knospe zur Ernte grob in 3 Stadien eingeteilt werden (Patzwahl, 2007).

Phase 1: Primäre Zellteilung und -dehnung

Phase 2: Physiologische Umstellung

Phase 3: Reifephase

In der primären Zellteilungs- und Dehnungsphase (Phase 1) wird die Struktur der Beere festgelegt. Die Rahmenbedingungen während dieses Zeitraumes bilden die Basis für die spätere Qualität der Trauben und des Weines. Während dieser Zeit ist auf eine optimale Nährstoffversorgung (Stickstoff, Phosphor, Kalium, Schwefel, Calcium, Magnesium und vor allem Wasser zum Transport dieser Hauptnährstoffe) zu achten (Patzwahl, 2007, Kennedy, 2002).

Phase 2 zeichnet sich durch eine „Wachstumspause“ und physiologische Umstellungen aus. Am Ende der Wachstumspause werden die Beeren weich und verfärben sich. Dieser Vorgang wird *Veraison* genannt. (Coombe & McCarthy, 2000; Winkler, 1974; Patzwahl, 2007).

In Phase 3 finden vornehmlich Zelldehnung und Gewichtszunahme durch Einlagerung von Wasser, Zucker und anderen Stoffen statt. Die Beeren verdoppeln ihre Größe bis zur Ernte. Mit dem Wasser wird Saccharose in die Beere geführt, was deren Wasserbedarf weiter steigert. Für den Gehalt an wertvollen Inhaltsstoffen ist der Zeitraum ± 10 Tage um die *Veraison* ausschlaggebend. Mit zunehmendem Reifeprozess werden nur mehr die Transpirationsverluste der Beere ausgeglichen. Konsequenz aus dieser Entwicklung ist, dass durch verstärkte Transpiration die Einlagerung aller genannten Substanzen gefördert wird (Coombe & McCarthy, 2000; Kennedy, 2002; Patzwahl, 2007, Winkler, 1974).

Eine Übersicht über die Entwicklungsstadien gibt Abbildung 1.

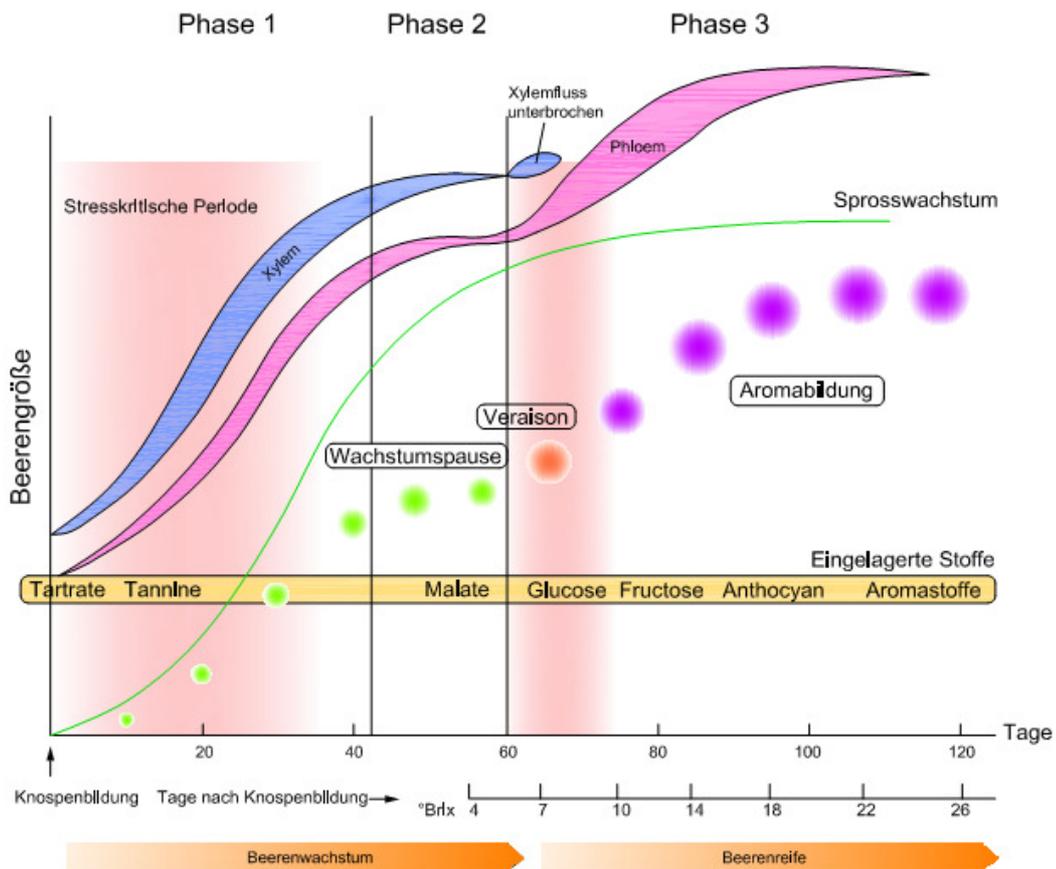


Abbildung 1: Entwicklungsstadien der Beeren im jahreszeitlichen Verlauf (modifiziert nach Coombe & McCarthy, 2000 und Kriedemann, 2003)

Besonders empfindlich auf Wasserstress sind die Pflanzen während der ersten Phase (Knospenbildung und Fruchtansatz) und direkt nach der Veraison (Kapitel 3.13).

3.6. Wasser in der Pflanze (Aufnahme, Transport, Abgabe – SPAC)

Folgende Teilprozesse sind für den Wasserhaushalt einer Pflanze maßgebend:

- Niederschlag und Wasserspeicherung in der Wurzelzone
- Aufnahme von Wasser aus dem Boden (über die Wurzeln)
- Wassertransport (im Stamm)
- Wasserabgabe an die Atmosphäre (über die Blätter)

Aufnahme von Wasser aus dem Boden und Transport im sekundären Xylem

Durch ein weit- und tiefreichendes Wurzelsystem werden Wasservorräte des Bodens erschlossen.

Wasserabgabe an die Atmosphäre

Die Wasserabgabe muss von der Pflanze aktiv geregelt und gesteuert werden. Dazu besitzen Pflanzen wasserundurchlässige Abschlusschichten (Cuticula und Periderm), welche die oberirdischen Teile der Pflanze bedecken. In der Epidermis befinden sich Spaltöffnungen, sogenannte Stomata (griech. *stoma* = *Mund*). Diese können zur Transpirationsregulierung geöffnet und geschlossen werden.

Soil-Plant-Atmosphere-Continuum (SPAC)

Der stetige Weg des Wassers vom Boden durch den Körper der Pflanze hin zur Atmosphäre kann durch das SPAC modelliert werden.

Dieser Begriff drückt den Zusammenhang zwischen Standortverhältnissen (Boden), Wasserhaushalt der Pflanze und dem Klima aus und weist darauf hin, dass es sich beim Wassertransport durch die Pflanze um einen kontinuierlichen Vorgang handelt.

Um vom flüssigen Zustand im Boden zum gasförmigen Zustand in der Atmosphäre zu gelangen, muss ein Wasserteilchen eine Abfolge von Widerständen überwinden. Diese sind die Widerstände im Boden, in der Pflanze und an der Grenzschicht von Pflanzenoberfläche zur Atmosphäre.

Die den Wassertransport bewirkende Kraft beruht auf dem Potentialunterschied des Wassers zwischen Atmosphäre und Boden. „Potential“ beschreibt den Energiezustand eines Teilchens in einem definierten System. Von Interesse ist für diese Arbeit in erster Linie das Matrixpotential Ψ_M , welches einen Teil des gesamten Bodenwasserpotentials Ψ_t darstellt. Jeder Stoff bewegt sich generell vom Ort höheren zum Ort niedrigeren Potentials.

Somit ist:

$$\Psi_{\text{Boden}} > \Psi_{\text{Wurzel}} > \Psi_{\text{Blatt}} > \Psi_{\text{Luft}}$$

Diese Bedingung muss erfüllt sein, damit Wassertransport durch die Pflanze stattfinden kann.

3.7. Wasser im Boden

Im Allgemeinsprachgebrauch wird oft das Grundwasser synonym für das gesamte unterirdisch vorkommende Wasser im Boden verwendet. Grundwasser ist aber definiert als „unterirdisches Wasser, das die zusammenhängenden Hohlräume des Bodens zusammenhängend ausfüllt, unter gleichem oder größerem Druck steht, als er in der Atmosphäre herrscht, und dessen Bewegung von der Schwerkraft und den durch die Bewegung selbst ausgelösten Reibungskräften bestimmt wird.“ (Kainz et al, 2002). Jegliches weitere Wasser im Boden ist definitionsgemäß nicht dem eigentlichen Grundwasser zuzuschreiben.

Für Pflanzen spielt das Wasser der vadosen Zone die Hauptrolle, wenn es um Wasserversorgung geht. Die vadose Zone ist der ungesättigte Bereich zwischen Grundwasser- und Geländeoberkante.

In dieser Zone gibt es Sicker-, Kapillar- und Adhäsionswasser. Sickerwasser ist freibewegliches Wasser, welches in tiefere Bodenhorizonte sickert. Die Bildung von Kapillarwasser beruht auf dem Zusammenwirken von Adhäsionskräften (lat. adhaerere = anhaften) zwischen einer festen und einer flüssigen Phase und den Kohäsionskräften (lat. cohaerere = zusammenhängen) in der flüssigen Phase.

Adsorptionswasser entsteht durch physikalische Adsorption (lat. adsorbere = (an-)saugen) des Wassers an eine feste Phase. Es treten in der Regel nur van-der-Waals-Kräfte auf (Scheffer & Schachtschabel, 2002).

3.8. Bodenwasserbilanz

Unter Bodenwasserbilanz versteht man die Veränderung der Wassermenge in einem Bodenkörper. Die Summe aus der Zufuhr von Wasser (Niederschlag) und Bewässerung, der Verdunstung, der Versickerung in tiefere Schichten oder ins Grundwasser und aus der Veränderung des Bodenspeicherinhalts ist Null. Die Wasserströme gleichen sich gegenseitig aus.

Formel 1

$$N + I - ET_a - D \pm \Delta W = 0$$

mit...

N.....Niederschlag

I.....Bewässerung

ET_a.....aktuelle Verdunstung

D.....Tiefenversickerung

ΔW.....Veränderung des Speicherinhalts (Sickerwasser, kapillarer Aufstieg, Transpiration)...kann mittels Sensoren erfasst werden

Die Bodenwasserbilanz kann mithilfe von Klimadatenaufzeichnungen und der rechnerischen Bestimmung der Evapotranspiration ermittelt werden. Die Veränderung des Speicherinhalts lässt sich ohne Feldmessungen nicht bestimmen.

Die Bodenwasserbilanzierung ist eine einfache und rasch durchführbare Methode, die geringe Datenmengen verlangt. Die benötigten Klimadaten können von einer einzigen Wetterstation erfasst und die Verdunstungsraten mit der FAO-Penman-Monteith-Formel abgeschätzt werden. Diese Verdunstung muss durch den Pflanzenkoeffizienten k_c korrigiert werden, um den tatsächlichen Bedingungen im Feld besser zu entsprechen. Der Pflanzenkoeffizient übt einen großen Einfluss auf die Bodenwasserbilanz aus und ist mit entsprechender Vorsicht zu handhaben.

In der Regel wird Sickerwasser bei der Bilanzierung vernachlässigt. Dies wirkt sich nachteilig auf die Richtigkeit der Bilanz aus.

Evapotranspiration (ET) nach FAO-Penman-Monteith

Die potentielle Evapotranspirationsrate lässt sich nach der FAO-Penman-Monteith-Gleichung berechnen (Allen et al., 1998). Dabei wird eine Referenzverdunstung (ET_0) für eine standardisierte Oberfläche (Gras mit 12 cm Länge) ermittelt. Um näherungsweise auf die potentielle Verdunstung der Kultur zu schließen lässt sich aus der Referenzverdunstung durch den Pflanzenkoeffizienten k_c (Crop-Coefficient) die Evaporation berechnen.

Der Pflanzenkoeffizient ist kulturspezifisch und abhängig von der phänologischen Phase der Kultur und dem Standort (zumeist von der Höhenlage). Als Referenzoberfläche dient eine unbeschattete Grasfläche, einem Stomatawiderstand von 70 s/m, einem aerodynamischer Widerstand von $208/u_2$ s/m und einer Albedo von 0,23. Diese Werte werden in die Penman-Monteith Formel eingesetzt. (Allen et al., 1998)

Die Methode bietet den Vorteil, dass durch die Standardisierung der Referenzoberfläche international vergleichbare Werte ermittelt werden können. Die benötigten Daten werden mittels einer Wetterstation in einer Höhe von 2 Metern über der Geländeoberfläche gewonnen.

Die FAO-Penman-Monteith Formel lautet nach einsetzen der Referenzwerte:

Formel 2

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

[s] = hPa/K Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve

[R_n] = W/m² Strahlungsbilanz

[G] = W/m² Bodenwärmestrom

[$e_s - e$] = hPa Sättigungsdefizit, abhängig von Lufttemp. und Dampfdruck

[s] = hPa/K Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve

[γ] = hPa/K Psychrometerkonstante

[u_2] = m/s Windgeschwindigkeit in 2 Metern Höhe

Durch Multiplikation von ET_0 mit dem Pflanzenkoeffizienten k_c wird die potentielle Evapotranspiration der Pflanze ermittelt.

Pflanzenkoeffizient k_c

Genauere Berechnungen der potentiellen Evapotranspiration verlangen die Berücksichtigung des phänologischen Zustandes der Pflanze. Dieser fließt über die Veränderung des k_c Faktors in die Berechnung mit ein. Der k_c -Faktor ist für jede Pflanzenart individuell. Die FAO gliedert die Entwicklung in 4 Stadien: „initial“, „development“, „mid“ und „end“ (Allen et al., 1998).

Pflanzenkoeffizient für Weintrauben nach FAO 56 - Verlauf über die Vegetationsperiode

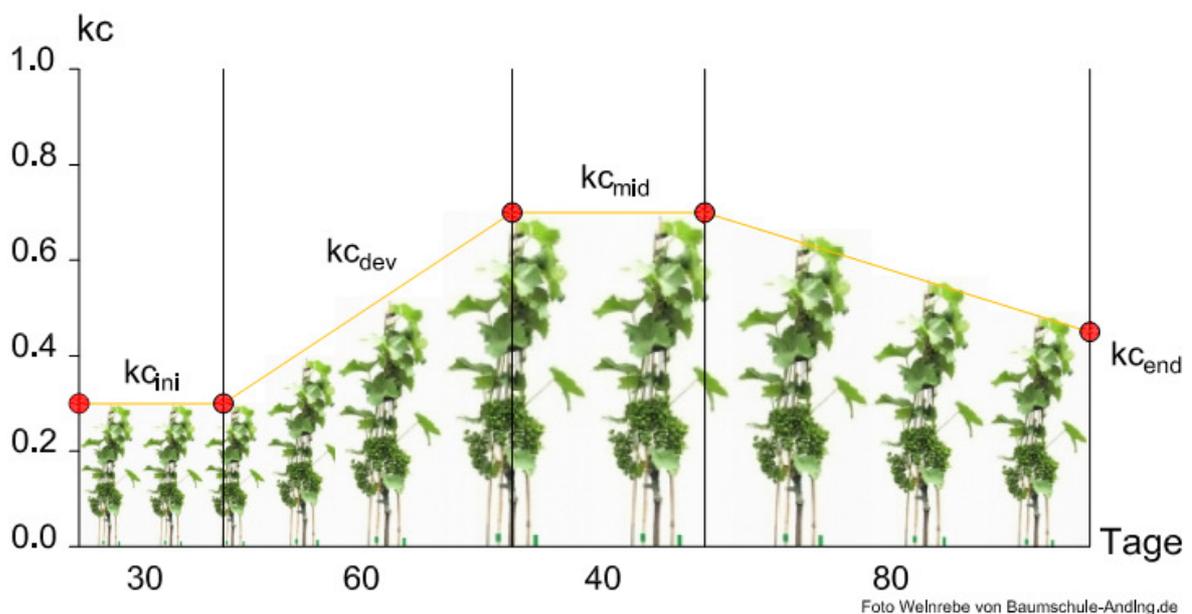


Abbildung 2: Pflanzenkoeffizient über die Vegetationsperiode

Tabelle 2: Pflanzenkoeffizient für Wein nach FAO 56

Pflanzenkoeffizient für Wein nach FAO 56				
Stadium	init	Dev	mid	end
k_c	0.30	0.30-0.70	0.70	0.45
Dauer / Tage	30	60	40	80

3.9. Matrixpotential

Potentialkonzept

Das gesamte Bodenwasserpotential ψ_t entspricht jener Arbeit, die pro Einheit einer gewählten Bezugsgröße an reinem Wasser aufgewendet werden muss, um eine infinitesimale Menge Wasser von einem Bezugssystem reversibel und isothermal in ein Zielsystem zu bewegen (Kammerer & Loiskandl, 2008).

Die auf das Bodenwasser wirkenden Kräfte sind unterschiedlicher Art und können nicht durch einen einzigen Ansatz beschrieben werden (Kammerer & Loiskandl, 2008). Das Gesamtpotential Ψ_t umfasst:

Formel 3

$$\Psi_t = \Psi_G + \Psi_O + \Psi_P$$

mit...

Ψ_t Gesamtpotential

Ψ_G Gravimetrisches Potential

Ψ_O Osmotisches Potential

Ψ_P Druckpotential

Weitere Erläuterungen finden sich im Anhang.

Wenn das osmotische Potential im Boden konstant und das Schwerkraftpotential (gravimetrisches Potential = Höhe über dem Referenzniveau) bekannt sind, verbleibt als, für die Bodenwasserbewegung maßgebend bestimmende Größe, das Druckpotential Ψ_P . (Kammerer & Loiskandl, 2008)

Matrixpotential ψ_M

Das Matrixpotential ist ein Teilpotential des Druckpotentials. Letzteres setzt sich aus dem Matrixpotential Ψ_M und dem Gasdruckpotential (pneumatischen Potential) ψ_a zusammen. In diesem sind die Druckunterschiede zwischen dem Bodenluftdruck und dem atmosphärischen Luftdruck zusammengefasst. (Kammerer & Loiskandl, 2008)

Im ungesättigten Boden ist das Druckpotential negativ, sofern kein Bodenluftüberdruck vorliegt. Im gesättigten Bereich ist es positiv. Der Bezugsdruck für das Matrixpotential ist der atmosphärische Luftdruck.

Das Druckpotential ist:

Formel 4

$$\Psi_P = \Psi_a + \Psi_M$$

mit...

Ψ_a Gasdruckpotential

Ψ_M Matrixpotential

Zumeist ist das Gasdruckpotential gleich Null. So wird:

Formel 5

$$\Psi_P = \Psi_M$$

Das Matrixpotential umfasst sämtliche Kräfte, die auf der Bodenmatrix und ihrer Wechselwirkung auf das Bodenwasser beruhen. Diese Kräfte sind verschiedenster Art, wie beispielsweise Oberflächen-, Adsorptions-, Quell- und Schrumpf-, Ionenanziehungs-, Dipolkräfte, elektrostatische Kräfte und mehr (Kammerer & Loiskandl, 2008). Im Feld kann das Matrixpotential mittels Tensiometern unmittelbar bestimmt werden, insofern keine Gasdruckkomponente vorhanden ist, im Labor kann ein bestimmtes Matrixpotential an der Überdruckkammer (Drucktopf) eingestellt werden.

Ein im ersten Moment schwierig vorstellbarer Vorgang ist die Bodenwasserbewegung entgegen der Schwerkraft. Dieser findet statt, wenn in höheren Bodenschichten ein ausreichend geringeres (negativeres) Matrixpotential herrscht, als in tieferen. In diesem Fall wird Wasser aus tieferen Schichten entgegen der Schwerkraft nach oben bewegt (vom Ort höheren zum Ort niedrigeren Potentials).

3.10. Wasseranteil

Wasseranteil θ

Der Wasseranteil θ wird als volumetrischer Anteil des Bodenwassers am Gesamtvolumen ausgedrückt und besitzt als Einheit Volumen/Volumen (z.B. m^3/m^3) oder wird dimensionslos als Prozentwert ausgedrückt. Er wird im Labor mit einer ungestörten Bodenprobe mittels Wägung bestimmt, im Feld mittels spezieller Sensoren.

Formel 6

$$\theta = n_1 = \frac{V_L}{V}$$

Jedem Wasseranteil kann ein bestimmtes Matrixpotential zugewiesen werden. Aus diesen Wertepaaren kann die Matrixpotential - Wasseranteilsbeziehung abgeleitet werden. Diese beschreibt den Energiezustand des Wassers als Folge der Einwirkung des Bodens bzw. der mit ihm in ursächlichem Zusammenhang stehenden Kräfte (insbesondere Kapillar- und Adsorptionskräfte) (Kammerer und Loiskandl, 2008). Weitere Bezeichnungen sind *Bodenwassercharakteristik*, *pF-Kurve* oder *Retentionsfunktion (RTF)*.

3.11. Matrixpotential – Wasseranteilsbeziehung (pF-Kurve)

Es handelt sich um die Beziehung zwischen Matrixpotential und Wasseranteil. Sie wird zumeist durch den Drucktopfversuch mit ungestörten Stechzylinderproben im Labor bestimmt, um im Feld von der einen Größe auf die andere schließen zu können.

Auch eine Bestimmung im Feld ist möglich. Man spricht von der in-situ-Retentionsfunktion. Es müssen Matrixpotential und Wasseranteil getrennt und zeitgleich bestimmt werden. Derzeit gibt es keine Apparatur, die beide Messgrößen zugleich erfassen kann (Kammerer und Loiskandl, 2008), deshalb sind Sensorpaare unterschiedlichen Typs erforderlich.

Für die mathematische Berechnung der Retentionsfunktion sind diverse Ansätze und Modelle verfügbar. Das in dieser Diplomarbeit verwendete van-Genuchten-Modell ist ein Ein-Bereichs-Modell, es kennt keinen eigenen Bereich für Vollsättigung und weist drei Formparameter auf (van Genuchten, 1980). Andere Methoden sind die Modelle nach Brooks und Corey, nach Vogel und Cislérova oder nach Rybakowa (Kammerer und Loiskandl, 2008).

Die van-Genuchten-Formel lautet:

Formel 7

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1,0 - (\alpha \cdot h)^n]^m}$$

Mit...

[θ]	= dim.los	Wasseranteil
[θ_r]	= dim.los	Restwasseranteil (trägt nicht zum Fluss der wässrigen Phase bei)
[θ_s]	= dim.los	Sättigungswasseranteil
[h]	= cm	negativ genommene Matrixpotentialhöhe
[α]	= cm ⁻¹	Formparameter; beschreibt wie stark sich die Kurve an die Vollsättigung anschmiegt.
[n]	= dim.los	beschreibt die Krümmung der Kurve
[m]	= dim.los	gibt an, wie stark sich die Kurve an $Se = 0$ bzw. θ_r anschmiegt.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch typische Retentionsfunktionen für verschiedene Bodenarten. Das Matrixpotential kann in den Einheiten hPa (Hektopascal), cmWS (Zentimeter-Wassersäule) oder als pF-Wert angegeben werden.

In sandigen Böden dominieren Grobporen ($d > 50\mu\text{m}$). Diese erleichtern eine rasche Entwässerung des Bodenkörpers, verhindern eine ausgeprägte Wasserspeicherung. Schluffige Böden haben vornehmlich Mittelporen ($0,2\ \mu\text{m} < d \leq 50\ \mu\text{m}$), tonige Böden beinhalten größtenteils Feinporen ($d < 0,2\ \mu\text{m}$). Je feiner der Hauptporenanteil, desto größer das Matrixpotential bei gleichen Wassergehalten.

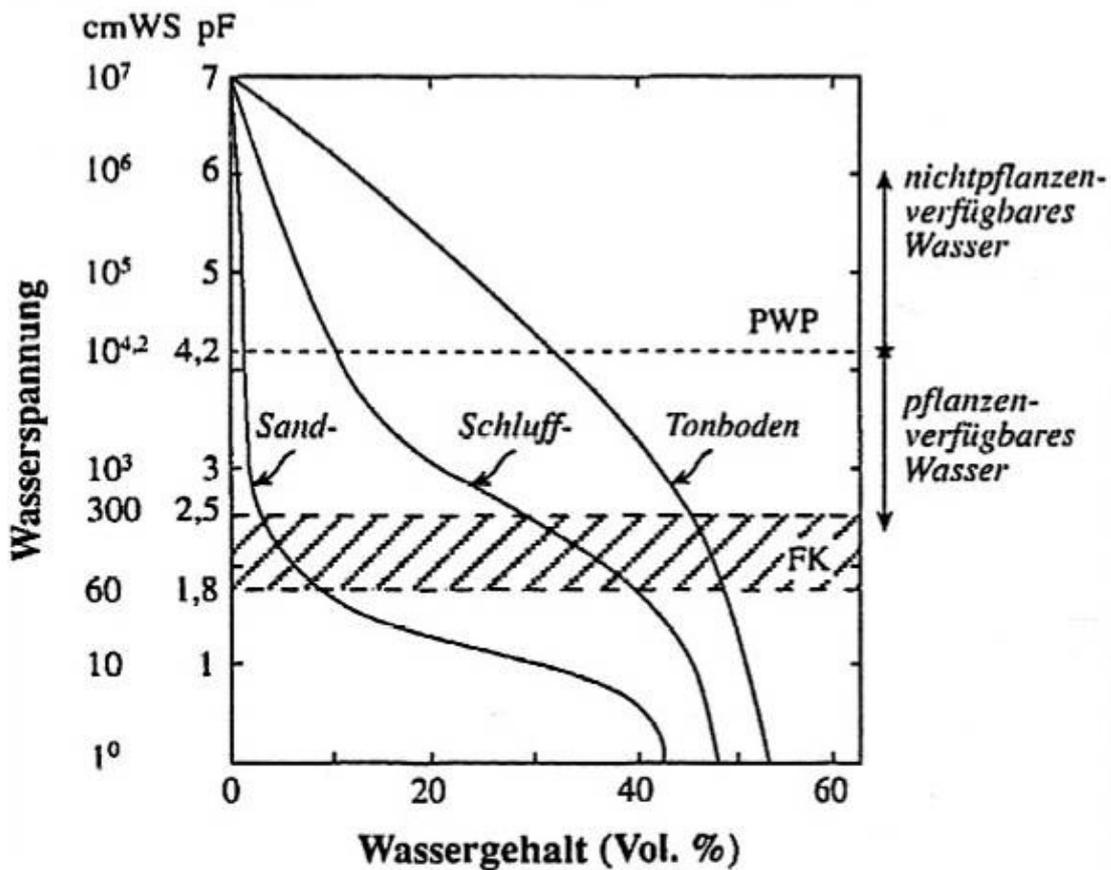


Abbildung 3: pF-Kurve für Ton- Sand- und Schluffboden (Scheffer und Schachtschabel, 2002)

Der Verlauf der Retentionsfunktion bei Bewässerung unterscheidet sich signifikant von dem bei Entwässerung. Grund dafür ist ein Hysteresiseffekt. Dieser entstammt nach Kammerer und Loiskandl (2008) und Bear (1969) folgenden Ursachen:

- Für Wasseraufnahme sind große Poren maßgebend, für Wasserabgabe kleine.
- Quellen und Schrumpfen des Bodenkörpers (v.a. bei bindigen Böden).
- Hysterese des Benetzungswinkels.
- Lufteinschlüsse während Wasseraufnahme.

Hysterese beschreibt das Fortwähren eines Phänomens nachdem die auslösende Einwirkung nicht mehr vorhanden ist.

Feldkapazität (FK) – Permanenter Welkepunkt (PWP) – Nutzbare FK (nFK)

Feldkapazität

Feldkapazität ist nach Veihmeyer und Hendrickson (1949) die Menge Bodenwasser, welche im Boden festgehalten wird, wenn das überschüssige Wasser entwässert wurde und die vertikale Abwärtsbewegung materiell aufgehört hat. Dies ist üblicherweise nach 2 bis 3 Tagen der Fall.

Die FK ist ein Standortfaktor. Sie wird nicht nur vom Bodentyp, sondern auch von anderen Faktoren beeinflusst. Es wird der Wasseranteil bei einem Matrixpotential von 1/10 bzw. 1/3 bar herangezogen (entspricht 10 kPa bzw. 33,3 kPa, oder einem pF-Wert zwischen 2,0 und 2,52) (Kammerer und Loiskandl, 2008).

Der pF-Wert ist der Logarithmus des negativen Matrixpotentials in cm Wassersäule. Laut Scheffer und Schachtschabel (2002) entspricht der PWP einem pF-Wert von 4,2, die FK nimmt typische Werte im Bereich zwischen 1,8 und 2,5 an ($1,8 < FK < 2,5$).

Diese verallgemeinernden Annahmen sollten für jeden Bodentyp und abhängig von den Umweltbedingungen genauer betrachtet und gegebenenfalls angepasst werden.

Methoden zur Ermittlung sind u.a. die Abschätzung über eine Pedotransferfunktion (PTF) oder die empirische Abschätzung über Tabellen- und Tafelwerke.

Der mathematisch-physikalische Zusammenhang zwischen einer hydraulischen Eigenschaft des Bodens und unabhängigen Parametern (wie z.B. der Korngrößenverteilung oder des Humusgehalts) wird als Pedotransferfunktion (PTF) bezeichnet (Hillel, 1998). Diese Pedotransferfunktionen können mithilfe von Softwareprogrammen bestimmt werden.

Permanenter Welkepunkt (PWP)

Ist in einem Bodenkörper weniger Wasser enthalten als es dem Wert des PWP entspricht, so treten – bei sonst optimalen Umweltbedingungen – an der Pflanze irreversible Welkeerscheinungen auf.

Dem PWP wird ein Matrixpotential von 15 bar (= 1500 kPa, $\log \psi_M = 4,2$) zugewiesen (Kastanek et al., 1980).

FK und PWP können auch Tabellenwerken entnommen werden. So finden sich Werte in % des Gesamtporenvolumens (entspricht 10 l/m³ oder 10 mm/m²) für verschiedenste Bodenarten und Trockendichten in den Tabellen der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ der Bodenkundlichen Gesellschaft (Finnern et al., 1996) (Anhang).

Nutzbare Feldkapazität (nFK)

Die Nutzbare Feldkapazität ist jene Wassermenge, welche für die Pflanzen verfügbar ist („pflanzenverfügbares Wasser“). Sie stellt die Differenz aus Feldkapazität und Permanentem Welkepunkt dar und ist ebenso wie diese eine Eigenschaft jedes Bodens.

Formel 8

$$nFK = FK - PWP$$

Der nFK wird der Matrixpotentialbereich zwischen 1/10 (1/3) und 15 bar zugewiesen. Über die Matrixpotential – Wasseranteilsbeziehung kann sie als Wassermenge ausgedrückt werden.

Die pflanzenverfügbare Wassermenge ergibt sich aus der Multiplikation der nFK mit der Wurzeltiefe.

3.12. Grundlagen Pedotransferfunktion

Pedotransferfunktion (PTF)

Sowohl die Feldkapazität (FK), der permanente Welkepunkt (PWP), die hydraulische Leitfähigkeit als auch die Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich können über Pedotransferfunktionen abgeschätzt werden. Dabei macht man sich die physikalisch-mathematische Abhängigkeit der hydraulischen Eigenschaften des Bodens von einfach erfassbaren Bodenkenngößen zu Nutze. PTFs werden numerisch durch multiple Regression mit einfachen Funktionen aufgestellt. Sie sollten nur dann zur Anwendung gelangen, wenn weder Feld- noch Laboruntersuchungen vorliegen oder durchgeführt werden können (Kammerer und Loiskandl, 2008).

PTFs können unter anderem mit dem Softwarepaket Rosetta bestimmt werden. Rosetta arbeitet mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk. Diese schließen durch statistische Ansätze von einer/mehreren Eingangsgröße/n auf eine/mehrere Ausgangsgröße/n. Rosetta beinhaltet die Modelle nach Schaap (et al., 1998), Schaap und Leij (1998) und Schaap und Leij (2000) (Schaap et al., 2001). ROSETTA findet im Zuge dieser Diplomarbeit Anwendung.

Eingangswerte können sein: Horizonttiefe, Korngrößenverteilung, Tonaktivität, Anteil organischer Substanz, Makroporenanteil, Trockendichte und hydraulische Leitfähigkeit. Je weniger Werte zur Verfügung stehen, desto ungenauer ist das Endergebnis.

Baumer (1989) liefert empirische Formeln durch die die Parameter für die van Genuchten Kurve approximiert werden können.

Durchlässigkeitsbeiwert/hydraulische Leitfähigkeit im gesättigten Bereich (k_s)

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_s ist eine Eigenschaft des gesättigten Bodens und beschreibt wie schnell Wasser durch einen Bodenkörper sickert. Der Durchlässigkeitsbeiwert ist immer größer als die kapillare Leitfähigkeit der vadosen Zone (teilgesättigte Zone über Grundwasser und geschlossenem Kapillarsaum), da hierin der Wasserfluss in feineren Poren erfolgt und die größeren Poren entwässert werden. Er wird häufig in der Einheit Länge/Zeit (z.B.: m/s) angegeben.

Theoretische Grundlage ist das Gesetz von Darcy, welches den Durchfluss durch ein Filtermedium beschreibt.

Formel 9

$$q = k \cdot I$$

[q] = m/s Durchflussrate

[k] = m/s Durchlässigkeitsbeiwert

[I] = – Gradient der Gesamtpotentialhöhe

Die Leitfähigkeit im ungesättigten Bereich wird „Kapillares Leitvermögen“ / „Kapillare Leitfähigkeit“ genannt. Hierbei ist die Durchlässigkeit eine Funktion des Wassergehalts, bzw. der Wasserspannung [$k = k(\theta)$ bzw. $k(h)$] (Kammerer & Loiskandl, 2008).

3.13. Regulated Deficit Irrigation (RDI)

Abhängig von der phänologischen Entwicklung der Rebe wird sie einem bestimmten Wasserstress ausgesetzt, um gezielt ihr Wachstum zu steuern, oder bestimmte Merkmale des späteren Weines hervorzuheben. Ziel ist es, in früheren Wachstumsstadien die Pflanze anzuregen dem Fruchtwachstum mehr Energie und Nährstoffe zukommen zu lassen als dem Blatt-, oder Sprosswachstum. In späteren Stadien kann die Charakteristik des gewonnen Weines beeinflusst werden. In kritischen Entwicklungsstadien wird auf Wasserstress verzichtet. RDI wurde ursprünglich für Stein- und Kernobst entwickelt (McCarthy et al., 2002; Goodwin et al., 2002).

Das Wasserangebot während der Blüte und des Fruchtansatzes bestimmt die Erntemenge. Tritt zu dieser Zeit auf, können ganze Blütenbünde austrocknen. Dies führt zum Ernteausfall. Goodwin et al. beobachtete 2002 Einbußen von bis zu 40 %.

Coombe und McCarthy (2000) berichten, dass das Wachstum der Trauben während der primären Zellteilung am sensibelsten auf Wasserstress reagiert, und dass ein vermindertes Wachstum zu einer früheren Reife führt.

Wasserstress während der mittleren Wachstumsphase (Ende der primären Zellteilung bis Veraison) beeinträchtigt die endgültige Fruchtgröße nicht oder nur gering, verringert jedoch das vegetative Wachstum und bietet somit das größte Potential zur schonenden Beeinflussung der Rebe.

Vorteile sind geringere Blattzahl, kleinere Blätter und kürzere Sprosse. So kann Sonnenlicht stärker durch das Blattkleid dringen und die Transpiration der gesamten Pflanze wird vermindert. Ernteeinbußen können, falls vorhanden, kleineren Beeren zugeschrieben werden. Generell reduziert verminderte Wassergabe oder Wasserstress vor der Veraison die Traubengröße (Matthews et al., 1987).

Verminderte Bewässerung direkt nach der Veraison beeinflusst Frisch- und Trockengewicht, sowie die Zuckerkonzentration negativ (Goodwin und Macrea, 1990).

Stress nach vier bis sechs Wochen nach der Veraison beeinträchtigt die Erntemenge kaum. In diesem Entwicklungsstadium sind die Beeren am wenigsten anfällig. Positiv beeinflusst werden Farbe, Aroma und Geschmack (McCarthy, 2002; Goodwin, 2002).

Eine Übersicht über die möglichen Auswirkungen von Wasserstress zu verschiedenen phänologischen Entwicklungsstadien der Traube zeigt Abbildung 4.

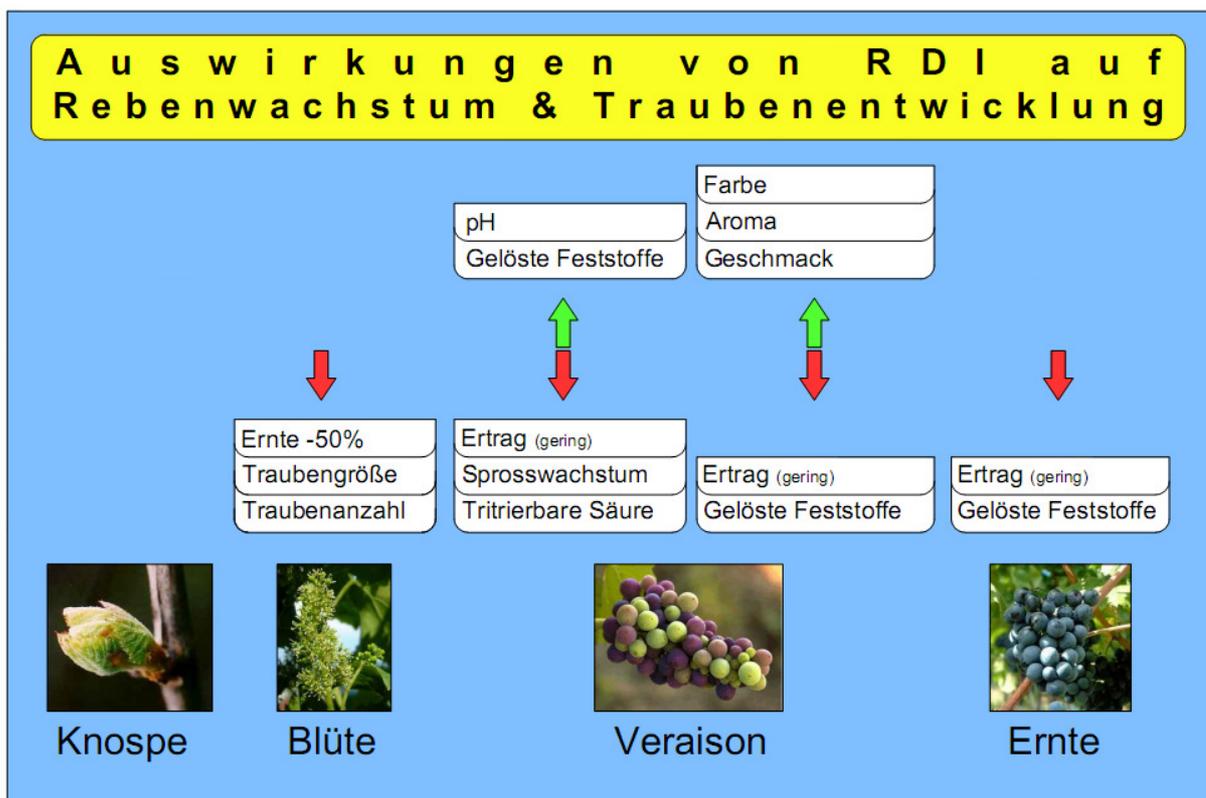


Abbildung 4: Auswirkungen von RDI zu verschiedenen Entwicklungsstadien (modifiziert nach Buss, 2000; Quelle Fotos: „Knospe“, „Blüte“ & „Ernte“ - rgs.applicare.ch; „Veraison“ - www.avalonwine.com. Zugriff beide: 04.10.2011). Grüne Pfeile bedeuten „Zunahme“, Rote „Abnahme“.

Coombe und McCarthy (2000) weisen die RDI-Methode als besonders geeignet für Rotweinsorten aus.

3.14. Sensoren

Granulare Matrix Sensoren (Watermark©)

Watermark-Sensoren bestehen aus

einer porösen, granularen Matrix, welche in die Bodenmatrix eingebettet und durchfeuchtet wird. Diese Matrix ist mit einer Gipshülle abgeschlossen, in der sich die Elektroden befinden,

Polyvinylchlorid- oder Stahlhülle zum Abschluss gegen die Bodenmatrix hin und Stromkabel in gewünschter Länge.

Es sind zwei Elektroden im Messblock eingebettet. An diese wird eine schwache Spannung gelegt. Gemessen wird der elektrische Widerstand im Block, welcher eine Funktion des Wassergehaltes ist. Dieser ist aber keinesfalls gleich dem Wassergehalt des angrenzenden Bodens. Gleichheit besteht zwischen der Energie, mit der das Wasser im Boden und der Energie, mit der das Wasser im Block festgehalten wird. Es herrscht also Gleichheit der Matrixpotentiale. Da in der Regel der Gipsblock eine andere kapillare Zusammensetzung hat als der Boden, werden bei gleicher Wasserspannung verschiedene Mengen Wasser im Boden und im Gipsblock festgehalten (Kastanek, 1996). Über die Retentionsfunktion des Bodens kann, durch das mit dem Messblock gemessene Matrixpotential, auf den Wassergehalt im Boden geschlossen werden.

Produktspezifische Kalibrierungen für den Zusammenhang Wasseranteil / Matrixpotential für die Blöcke werden von Herstellerfirmen bereit gestellt. Die Beziehungen werden herstellerseitig nicht mit demselben Sensor durchgeführt, der eingebaut wird. Außerdem kommen bei den Messblöcken große Exemplarstreuungen vor. Deswegen muss jeder Sensor vor Versuchsbeginn im Labor kalibriert werden.



Abbildung 5: Watermark[®] Sensor (www.irrometer.com)

Abbildung 6 zeigt exemplarisch die Matrixpotentialverläufe in verschiedenen Tiefen des Jahres 2010. Werden die Messwerte unterschiedlich tiefer Schichten einander gegenübergestellt, kann in Verbindung mit dem Lagepotential die (theoretische) Wasserbewegungsrichtung abgeschätzt werden (orange Pfeile in Abbildung 6).

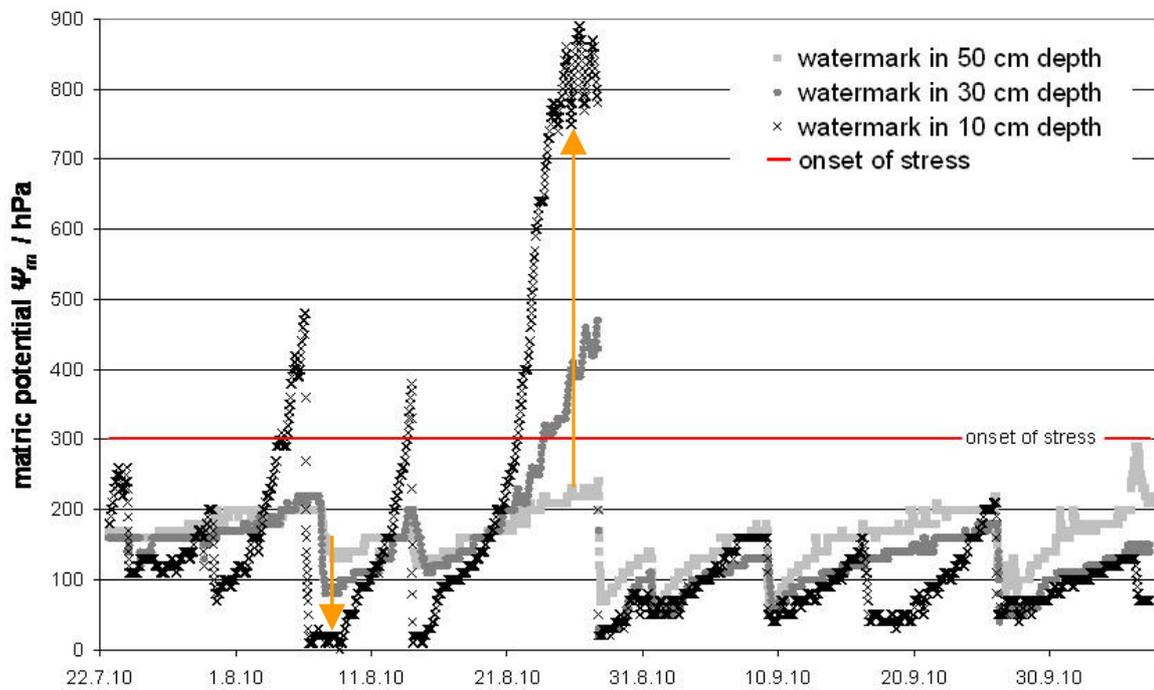


Abbildung 6: Matrixpotentialverlauf des Jahres 2010 in verschiedenen Tiefen (Nolz, 2011)

Kalibrierung im Labor

Die Blöcke werden in ein Kontaktmedium (Boden, Steinmehl o.ä.) eingebaut und in einem Druckplattenapparat Matrixpotentialen unterschiedlicher Höhe ausgesetzt. Nach Erreichen des gewünschten Matrixpotentials wird der jeweilige, zu diesem Potential gehörige, elektrische Widerstand gemessen. Nach erfolgreicher Messung wird das Matrixpotential erhöht und abermals der elektrische Widerstand gemessen.

Bei der Kalibrierung ist auf die herrschende Temperatur zu achten, da sich der elektrische Widerstand mit der Temperatur ändert. Typisch ist eine Korrektur von 3 % pro Grad Celsius Unterschied. Die Sensorenhysterese entspricht so gut wie nie der natürlichen Hysterese des Bodens. Aus diesem Grund müssen Hystereseeffekte schon bei der Kalibrierung berücksichtigt werden (Campbell und Gee, 1986).

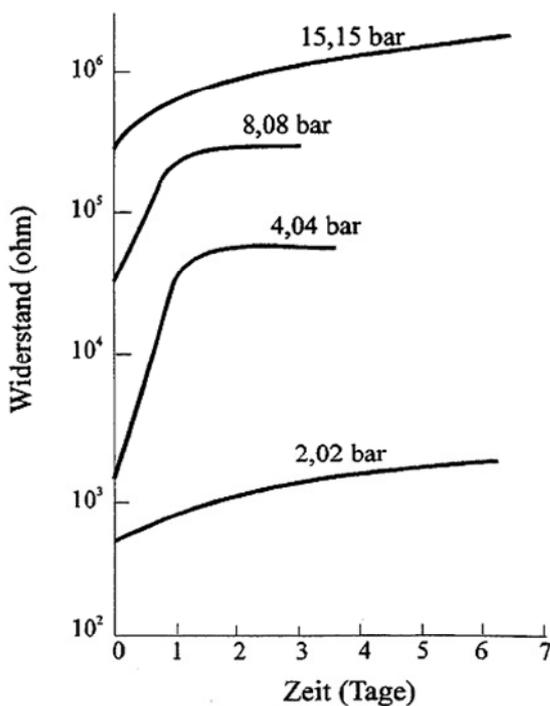


Abbildung 7: Verlauf des Matrixpotentials während des Kalibrationsvorganges (Kastanek, 1996)

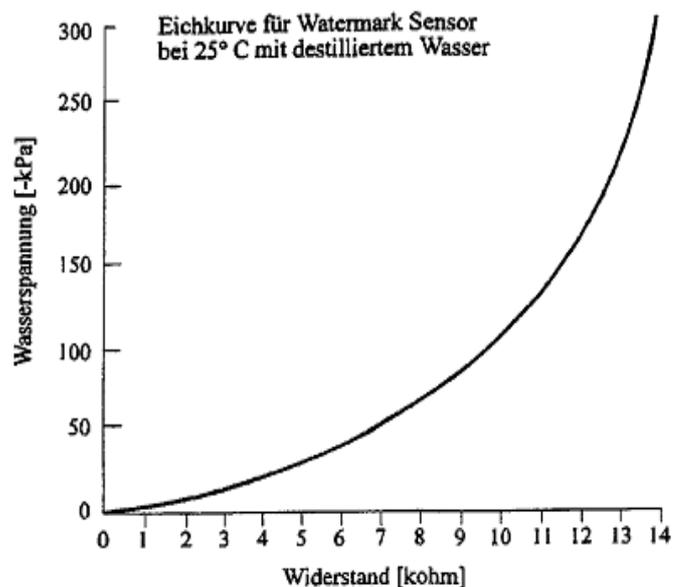


Abbildung 8: Kalibrationskurve Watermark (Kastanek, 1996)

Fehlerquellen bei Verwendung von Messblöcken

Nach Kastanek (1996) sind folgende Punkte/ Fehlerquellen beachtenswert:

inkorrekte Kalibrierung

Schlechter oder fehlender Kontakt mit dem umgebenden Material/Boden

Temperatureinflüsse im Feld

Lange Reaktionszeit/Trägheit der Messanzeige

Salzgehalt des Bodens

Feldverlauf zwischen den Elektroden

Langzeitverhalten des Blocks

Produktspezifischer Messbereich des Blocks

Streuung der Kalibrationskurven einer bestimmten Bauart

Hysteresis zwischen Wasserspannung und gemessener elektr. Leitfähigkeit

Hysteresis der Matrixpotential-Wassergehaltsbeziehung des Bodens

Inhomogenität des Bodens

FDR (EnviroSCAN Sensoren)

FDR (Frequency Domain Reflectometry) bezeichnet ein kapazitives Verfahren mit dem unter anderem der Wassergehalt des Bodens bestimmt werden kann. Ein Sensor besteht aus zwei oder mehr Elektroden und einem Oszillator. Die um die Elektroden befindliche Bodenmatrix weist eine vom Wassergehalt abhängige Dielektrizitätszahl auf. An die Elektroden wird Spannung angelegt und die umgebende Bodenmatrix als Kondensator genutzt. Wird ein Oszillator zugeschaltet ergibt sich ein geschlossener Stromkreis. Der Oszillator sendet eine gleichbleibende Frequenz. Die Bodenmatrix reflektiert diese Frequenz und verschiebt sie in Abhängigkeit der Bodenfeuchte. Diese Resonanzfrequenz ist das Maß für den herrschenden Wassergehalt. Ein Beispiel für den Verlauf der erfassten Verläufe zeigen Abbildung 10 & Abbildung 12.

So kann auf den Wassergehalt in einer bestimmten Tiefe geschlossen werden. Seitliche Ausbreitung des Wassers können nicht mit einem einzelnen Sondenstab erfasst werden. Dazu werden mehrere Sensoren in gleicher Tiefe an unterschiedlichen Standpunkten benötigt. Auf eine etwaige Wasserbewegung kann mit FDR Sensoren nicht geschlossen werden, da die Wasserbewegung Potentialabhängig ist.

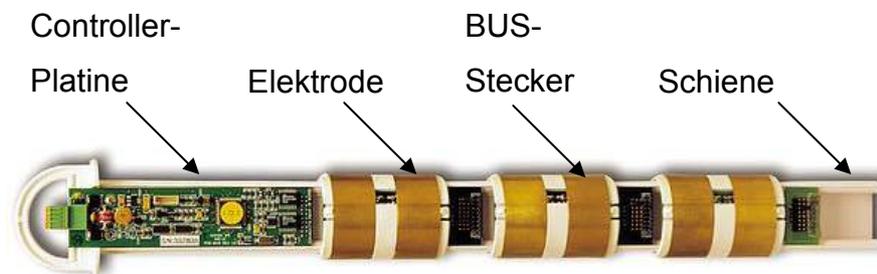


Abbildung 9: EnviroSCAN Messsonde mit 3 Sensoren (www.ums-muc.de)

Als Beispiel für die Gestalt der gewonnenen Wasseranteilsverläufe dient Abbildung 10. Diese zeigt den Verlauf des Jahres 2010.

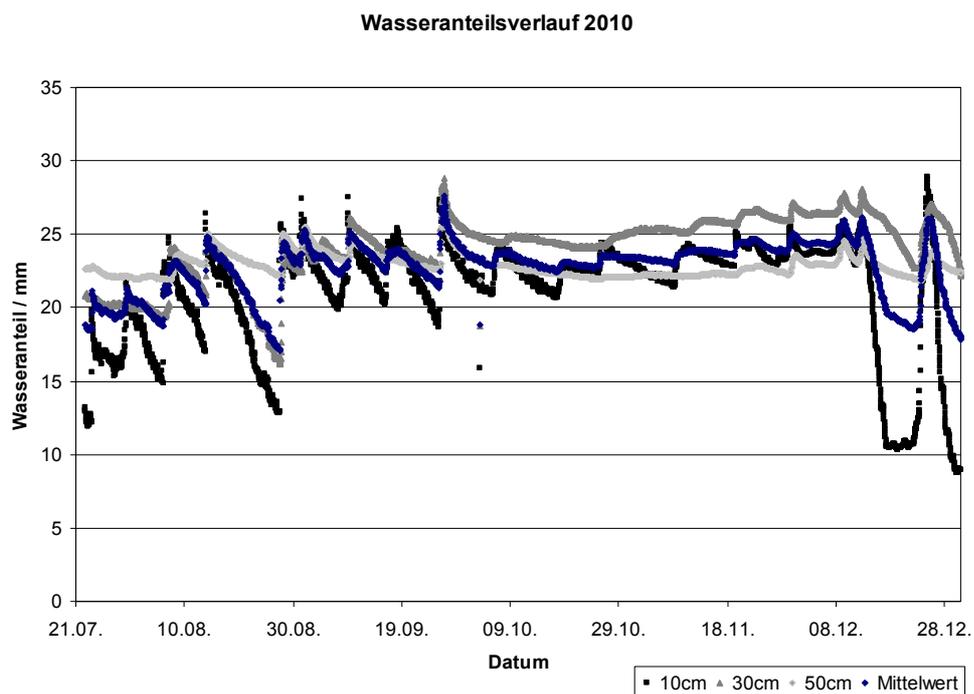


Abbildung 10: Wasseranteilsverlauf 2010

Ausschlaggebend für die Wuchsleistung der Pflanze ist die verfügbare Menge Wasser in der Wurzelzone.

Die Weinrebe zählt zwar zu den Pfahlwurzlern, es werden jedoch oberflächennah feinste Wurzeln jährlich neu ausgebildet. So ergibt sich der klassische Wasseranteilsverlauf über das Profil. Üblicherweise zeigt zuerst der oberste Sensor eine Veränderung des Wasserhaushaltes an, danach folgen Sensoren in der Reihenfolge ihrer Einbautiefe. Höhere Wassergehalte in tieferen Schichten sind ein Zusammenspiel aus Schwerkraft und Wasserentnahme aus höher gelegenen Schichten. Treppenartiger Verlauf im Tagesgang der FDR-Werte in tieferen Schichten weist auf Transpiration hin (Abbildung 10), in seichteren Schichten auf Transpiration oder Evaporation. Außerdem lässt sich der Tagesgang der Transpiration der Pflanze beobachten (Tag/Nacht).

Vorteile Matrixpotential-/Wasseranteilmessung

Matrixpotential-, oder Wasseranteilmessungen bieten den Vorteil der Automation. Daher sind sie weniger zeit-, arbeits- und damit kostenintensiv als Messungen an der Pflanze. Außerdem können Messungen an der Pflanze die Verteilung des Bodenvassers in der Tiefe nicht berücksichtigen.

Nachteile Matrixpotential-/Wasseranteilmessung

Ein gravierender Nachteil bei der Verwendung von Potential- und Wasseranteilmessgeräten liegt darin, dass die Stressgrenzen mit dem Bodentyp, der Wurzelverteilung, der Salinität des Bodens und den klimatischen Bedingungen schwanken. Stresslimits sind mit großen Unsicherheiten behaftet und werden zumeist empirisch geschätzt (Buss, 2000).

3.15. Bewässerungssteuerung (RDI) mit Matrixpotential und/oder Wasseranteilssensoren

Bewässerung ist dann nötig, wenn beispielsweise

der Niederschlag geringer als die Verdunstung ist (Abbildung 11) und...

...gleichzeitig der Wasseranteil bzw. Matrixpotential unter einen bestimmten Wert fällt („Unterer Grenzwert“ in Abbildung 12).

Bewässert wird üblicherweise bis zu einem Wasseranteil der 80 % der nutzbaren Feldkapazität entspricht (= obere Grenze) (Doorenbos et al., (1986)). So soll eine Perkolation von eventuell fallendem Niederschlag, und somit von Nährstoffen verhindert werden (Hanke, 1989; Sadler et al., 2003).

Bei Wassergehalten nahe der Sättigung werden Nitrifikationsvorgänge im Boden gehemmt, es tritt Sauerstoffmangel im Wurzelbereich auf und die ausgeschiedene Kohlensäure kann nicht schnell genug entweichen.

Mehrere aufeinanderfolgende, geringe Bewässerungsmengen sind einer Großvolumigen vorzuziehen. Wird einmalig stark bewässert besteht die Gefahr, dass durch die Sättigung der oberen Bodenschichten Wasser nicht schnell genug in den Bodenkörper sickert, sondern oberflächlich abläuft (abhängig von der Infiltrationskapazität des Bodens und der Oberflächenneigung). Wird mehrfach bewässert, bleibt die Bodenoberfläche permanent feucht. Dies steigert die Evaporationsrate. Dem kann durch eine unterirdisch verlegte Tropfbewässerung entgegengewirkt werden. Sie bietet die Möglichkeit einer Dauerbewässerung, hält jedoch bei optimaler Steuerung die Oberfläche trocken (Sadler et al., 2003). Die Bewässerungsmenge hängt von der gewünschten Eindringtiefe der Feuchtefront ab. Überbewässerung führt zu Tiefenversickerung.

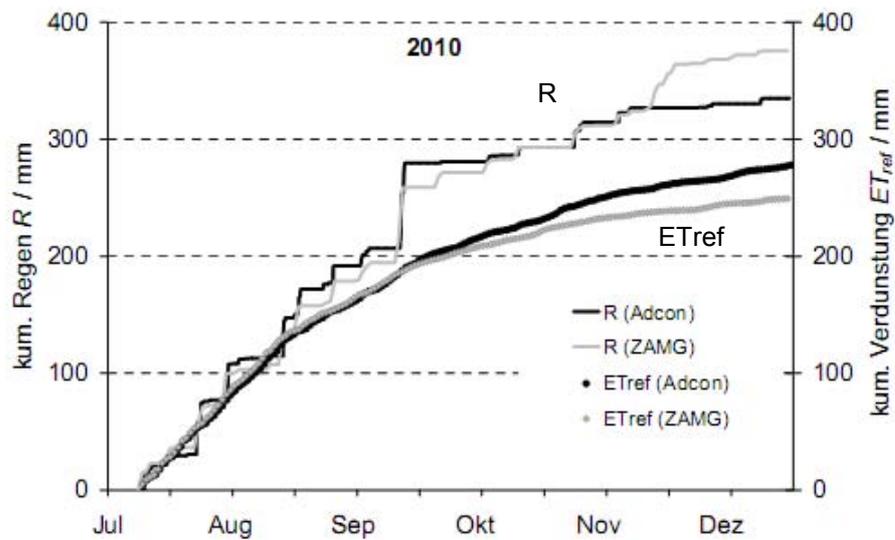


Abbildung 11: Kumulierter Niederschlag und Verdunstung, Projektjahr 2010 (Nolz et al., 2011)

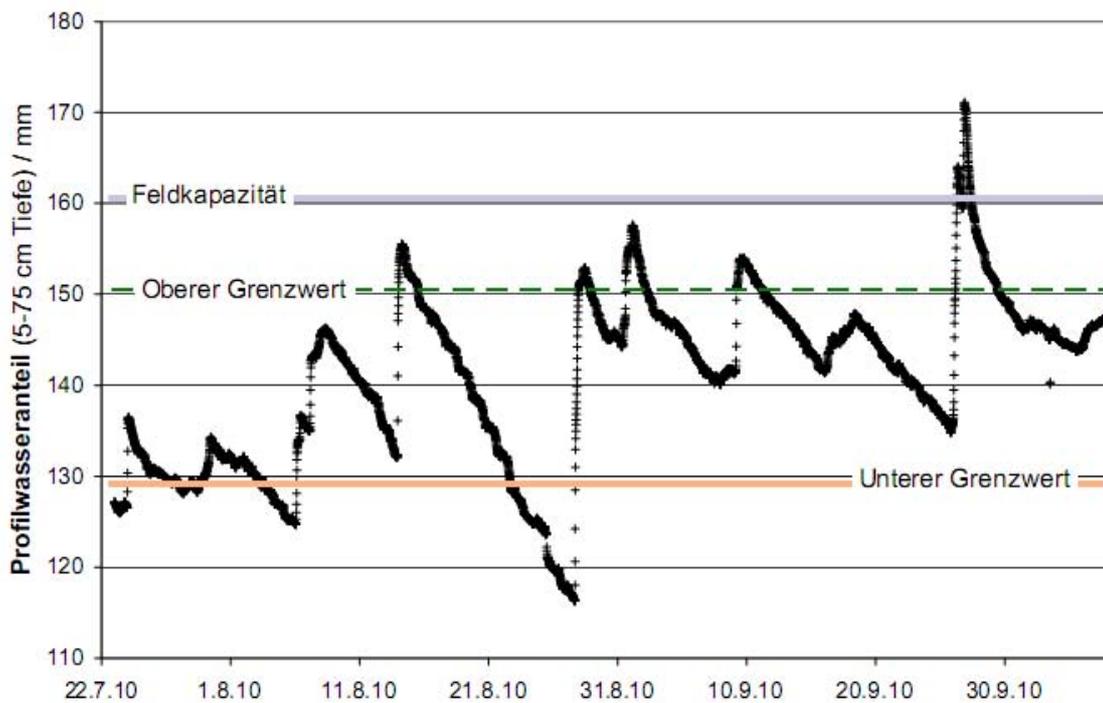


Abbildung 12: Verlauf des Wasseranteils in einem Bodenprofil, Projektjahr 2010 (Nolz et al., 2011)

Die Gegenüberstellung der kumulierten Werte für Niederschlag und Verdunstung geben einen ersten Hinweis darauf, ob Bewässerung aus klimatischer Sicht nötig ist (Abbildung 11).

Die Analyse des Wasseranteils in Verbindung mit der des Matrixpotentials gibt Auskunft darüber, ob und wie viel bewässert werden muss (Abbildung 12).

Beim aktuellen Projekt wurden bisher die Grenzwerte für die Bewässerungssteuerung nach Doorenbos (et al., 1986) bei 50 % (unterer Grenzwert) und 80 % (oberer Grenzwert) des pflanzenverfügbaren Wassers festgelegt (Nolz et al., 2011).

Stressbereiche zur Umsetzung von RDI

Aussagen über Matrixpotentiale, ab denen die Pflanze Stresssymptome zeigt (Stressschwellen), sind in der aktuellen (Jahr 2011) Literatur meist vage und selten auf eine klar bestimmte Tiefe, in der sie gemessen werden sollen, bezogen. Eine Übersicht liefern Tabelle 3 & Tabelle 4.

Kriedemann et al. (2003), Buss (2000) und Goodwin (2002) unterscheiden nach der Wurzeltiefe, nach der Bodenlagerung und dem Klima. Andere Autoren definieren Stressgrenzen zumeist als Mittelwert über die Bodensäule. Kriedemann (2003) gibt des Weiteren empfohlene Stressbereiche für unterschiedliche pflanzenphysiologischen Entwicklungsstadien an.

Tabelle 3: Stresslimits für RDI

Stresslimits in [-kPa]				
Boden	leicht flach (~0.5m)	mittelschwer	schwer	N.A
Wurzeln	heiß	mittel	tief (~1.0m)	Mittelwert
Klima	heiß	gemäßigt	khl	Profil
Autor				
Buss (2000)	100	-	400	
Goodwin (2002)	100	200	400	
Kriedemann (2003)	60 - 80	100 - 200		
Toome (2002)				60*
Myburgh (2003)				70*
Hardie & Martin (2000)				70 ^{*1)}
Centeno (2010)				80 ^{*1)} -120*

Tabelle 4: Stressbereiche für RDI

Empfohlene Stressbereiche für RDI in [-kPa]						
Kriedemann (2003) optimum (min/max)	I	II	III	IV	V	VI
	30	10	80 (10)	80 (200)	200	200 (30)
Stresslevel	kein Stress		normal		schwerwiegend	
Centeno (2010)	$\psi^* < 40$		$40 < \psi^* < 140$		$\psi^* > 140$	
Goodwin (1995)	$\psi^* < 40-60$		$60 < \psi^* < 100-400$		$\psi^* > 400$	
*	Mittelwert über die gesamte Bodensäule					
1)	Sprosswachstum stoppt					
I	Knospenbildung – Blütenbildung					
II	Blütenbildung – Fruchtansatz					
III	Fruchtansatz – Veraison					
IV	Veraison – Ernte					
V	Ernte – Laubfall					
VI	Winterlicher Ruhezustand					

4. Material und Methoden

Um ein bedarfsgesteuertes Bewässerungssystem für Wein zu entwickeln wurde im nord-östlichen Burgenland, in der Marktgemeinde Andau, eine Unterflurtropfbewässerung installiert. Bei der untersuchten Rebsorte handelt es sich um Chardonnay. Auf der Versuchsfläche (47°48'16" N; 17°01'57" E; 118 m) wurden in-situ Messungen des Wasseranteils und des Matrixpotentials des Bodens durchgeführt und Klimadaten kontinuierlich aufgezeichnet. Aus diesen Daten sollte ermittelt werden zu welchen Zeitpunkten wie viel – abhängig von der gegebenen klimatischen Situation und den Stressgrenzen, die sich aus den bodenphysikalischen Parametern ergeben – bewässert werden soll.

4.1. Projektbeschreibung

Geographische, Topographische und Klimatologische Lage

Die Versuchsfläche liegt nicht weit der ungarischen Grenze in der Gemeinde Andau. Sie ist ein Teil des politischen Bezirks Neusiedl am See. Er liegt am nordwestlichen Rand der Kleinen Pannonischen Tiefebene. Diese wird vom Dinarischen Gebirge, dem Balkan den nordöstlich gelegenen Karpaten und den im Westen liegenden Alpen begrenzt. (austria.info)

Das Pannonischen Klima zeichnet sich durch heiße Sommer, milde Winter, geringe Niederschläge und austrocknende Winde aus. Die Niederschlagsmessstelle des Hydrographischen Dienstes in Andau mit der Nummer 110585 weist eine mittlere jährliche Niederschlagssumme von 530 mm aus (eHYD, 2011). Die Station „899“ in Halbturn, unweit von Andau, maß im Jahr 2008 eine Jahresdurchschnittstemperatur von 10,6 °C und eine Durchschnittstemperatur von 17,9 °C zwischen April und September (Hydrographisches Jahrbuch 2008, 2008). Diese Zeitspanne entspricht der Vegetationsperiode von Weinreben.

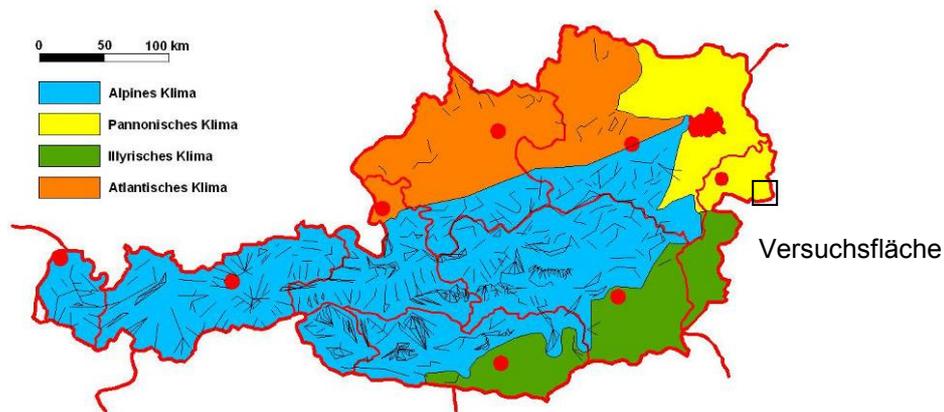


Abbildung 13: Klimazonen Österreichs
(modifiziert nach Geyer F., Univie.ac.at)

Marktgemeinde Andau

Bundesland: Burgenland
 Bezirk: Neusiedl am See
 Seehöhe: 116 m
 Fläche: 47,43 km²
 Einwohner: 2.514 (1.Jänner 2011)

(www.burgenland.at)

Koordinaten der Versuchsfläche:

N 47°48'16"
 E 17° 01' 57"
 H 118 m

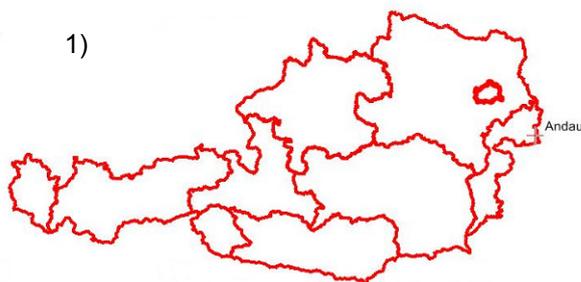
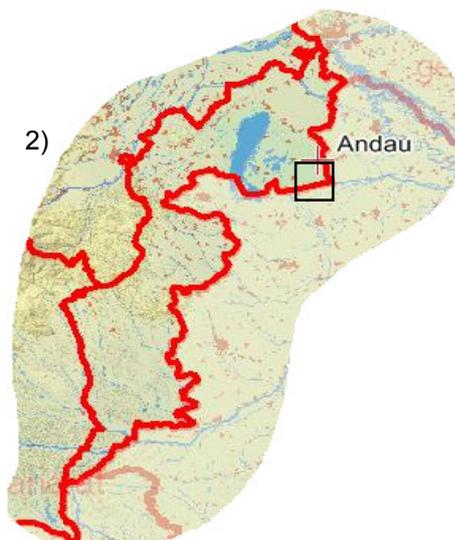


Abbildung 14: Lage der Versuchsfläche
(geoland.at (1 & 2) & Google Earth(3))

4.2. Felddaten

Wetterdaten (Temperatur, Niederschlag, Luftfeuchtigkeit,...)

Wetterdaten wurden direkt vor Ort mittels einer Wetterstation von Adcon Telemetry (Abbildung 15 & Abbildung 16) gemessen, bzw. von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bezogen. Die Feldapparatur maß Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit in 2 Metern Höhe, Solarstrahlung und Niederschlag im 15-Minuten Intervall. Die Distanz zwischen den beiden Stationen war 3,6 Kilometer. Alle Felddaten (auch Sensordaten) wurden durch einen Datenlogger erfasst, über eine GSM Verbindung an einen Server geschickt und waren online abrufbar. Die elektronischen Geräte wurden durch ein Solarpanel, und einen Akkumulator, mit Strom versorgt.

Die Verläufe der Monatsmittel aus der Periode 1996-2010 zeigt Abbildung 17. Abbildung 18 zeigt die Gegenüberstellung der gefallenen Niederschlagssummen der Beobachtungsjahre mit dem Niederschlagsmittel aller Jahre und dem Temperaturmittel jedes einzelnen Jahres.

Es ist zu sehen, dass die Niederschlagssumme (345 mm) im Projektjahr 2010 deutlich unter dem langjährigen Mittel von ca. 600 mm lag. Die Referenzverdunstung (281 mm) war geringer als die Niederschläge. Die Wasserbilanz war somit positiv. Aus klimatischer Sicht war kein Bewässerungsbedarf gegeben (Abbildung 11 und Abbildung 12) (Nolz et al., 2011).



Abbildung 15: Wetterstation



Abbildung 16: Wetterstation

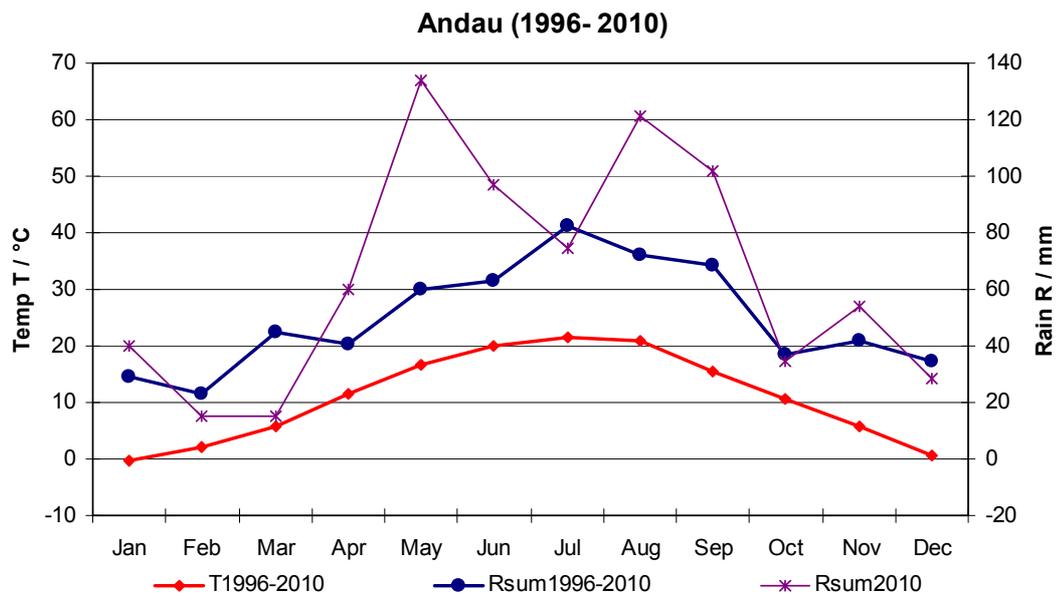


Abbildung 17: Temperatur- und Niederschlagmonatmittelsverlauf Andau 1996-2010 (ZAMG, 2011)

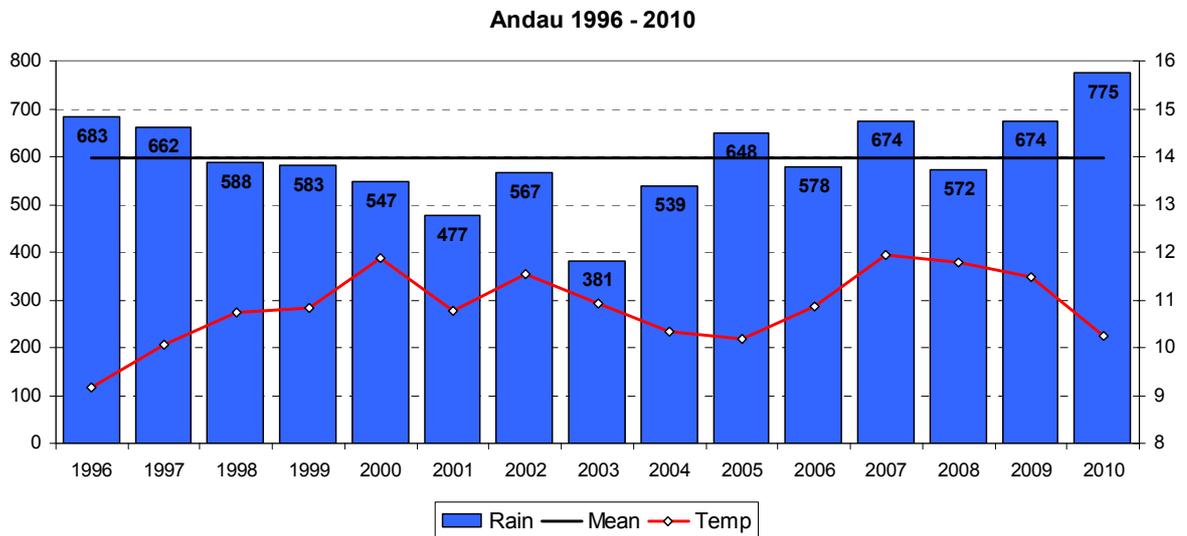


Abbildung 18: Niederschlag und Temperaturjahresmittel, Niederschlagsmittel (1996 – 2010)
Andau 1996-2010 (ZAMG, 2011)

Vergleich der Adcon/ZAMG Daten (2010)

Als Vergleichsindikator dient das Bestimmtheitsmaß R^2 . Es erklärt die Varianz einer Variablen zu einer Funktion, oder einer anderen Variable. Je näher sich R^2 1,0 nähert, desto besser erklärt eine Funktion die unabhängige Variable. Die Daten beider Wetterstationen liefern brauchbare Werte um die Referenzverdunstung zu ermitteln (Nolz & Cepuder, 2011a).

Tabelle 5: Gegenüberstellung Adcon/ZAMG, 2010 (Nolz & Cepuder, 2011a)

		T	RH	P	u_2	RN	R	ET_0
		°C	%	hPa	ms^{-2}	$MJm^{-2}d^{-1}$	mm	mm
23.7 - 31.12	Adcon	10.1	77	999.0	2.3	1489	335	280
	ZAMG	10.1	81	999.2	1.9	1471	375	250
23.7 - 31.7	Adcon	19.3	69	998.1	3.1	119	29	32
	ZAMG	19.5	71	998.2	3.0	137	36	35
R^2	Adcon	0.9769	0.9398	0.9816	0.8819	0.9711	-	-
23.7 - 31.7	ZAMG							

Bodenphysikalische Daten / Sensoren

Die Versuchsfläche war mit 3 Watermark[®] Sensoren und einer EnviroSCAN[®] Sonde ausgestattet (Abbildung 19).

Zur Erfassung der lateralen Feuchteausbreitung wurde nachträglich eine zusätzliche EnviroSCAN Sonde, ca. 1,10 Meter östlich der westlichen Versuchsachse, mit einer Länge von 100 cm, eingebracht. Auf der Versuchsfläche befanden sich weiters das Steuergerät zur Bewässerungssteuerung und der Datalogger. Abbildung 20 zeigt einen Lageplan der Versuchsfläche.

Tabelle 6: Sensorausstattung (modifiziert nach Nolz, 2007)

Sensorausstattung			
Tiefe unter GOK	cm	Enviroscan 10- 80	Watermark 10/30/50
Sensoren/Rohre pro Messstelle	-	8 / 1 und 10 / 1	3

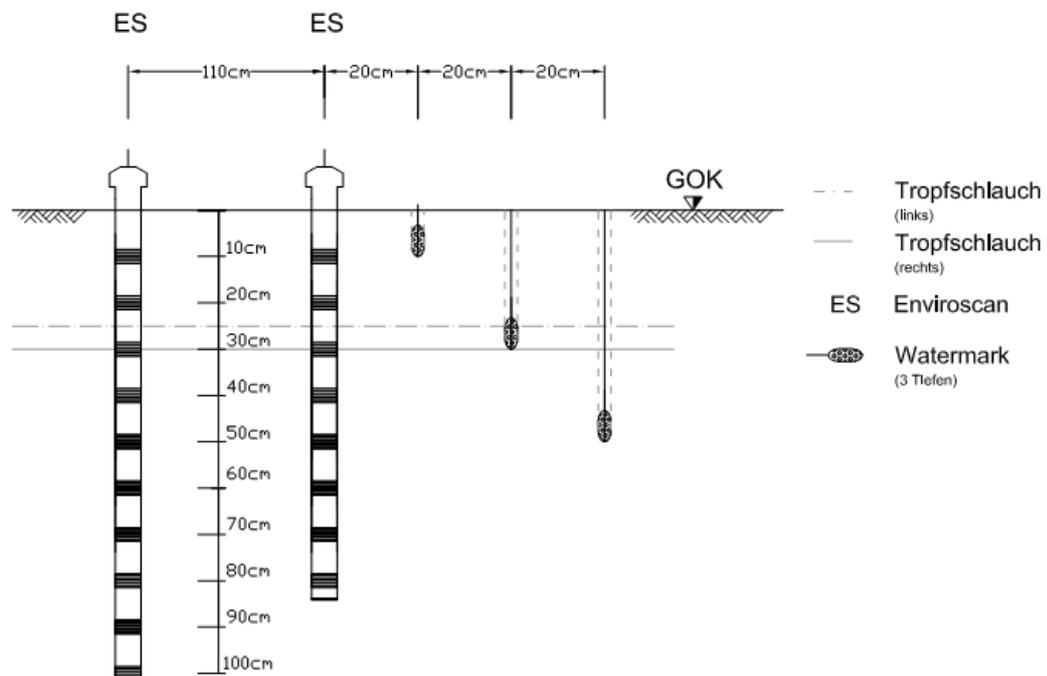


Abbildung 19: Querschnitt durch die Sensorausstattung im Feld (modifiziert nach Nolz et al., 2011)

Granulare Matrix-Sensoren (Watermark©)

Auf der Versuchsfläche waren Watermarks der Firma Irrrometer Company Inc. eingebaut. Es handelte sich um das Modell 200SS. Dieses weist, laut Herstellerangabe, einen Messbereich von 0 kPa – 239 kPa auf. Theoretisch wird die untere Messgrenze durch den Lufteintrittsdruck bestimmt, die obere Grenze ist produktspezifisch. Centeno et al. (2010) bestimmten den zuverlässigen Messbereich zwischen 10 und 200 kPa.

FDR (EnviroSCAN)

Für die Versuchsreihe wurde das Gerät EnviroSCAN des Herstellers Sentek Technologies verwendet. Diese wiesen bauartbedingt einen Vertikalabstand von 10 cm auf. Verbunden wurden die Sensoren mittels eines BUS-Steckers. Die Sonde wurde in ein im Boden befindliches Leerrohr mit Durchmesser 56 mm eingeführt, verkabelt und wasserdicht verschlossen.

Weinbau

Versuchsfeld ca. 104 m (107 Pflanzen zu je 95 cm Abstand) vom Zufahrtsweg entfernt

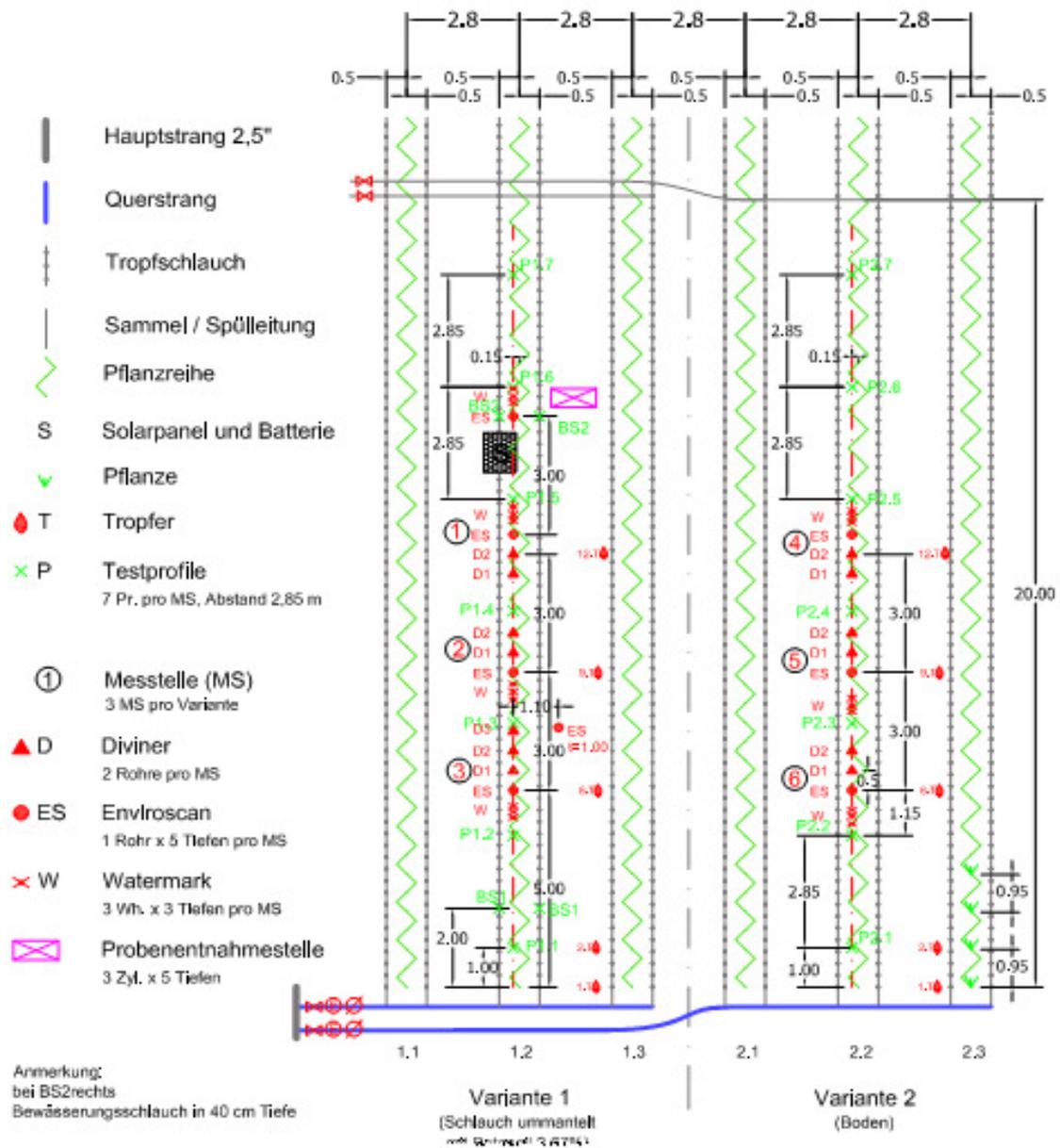


Abbildung 20: Lageplan der Versuchsfläche (modifiziert nach Nolz et al., 2011)

4.3. Bodenphysikalische Parameter

Im Labor wurden folgende, relevante bodenphysikalische Größen gemessen:

Wasseranteil θ (Stechzylinder)

Der Wasseranteil wurde dazu verwendet, um in Verbindung mit dem Matrixpotential, die Retentionsfunktion des beprobten Bodens zu eruieren. Des Weiteren kann der Wasseranteil bei Probennahme als Referenz für die FDR-Daten herangezogen werden.

Porenanteil n & Trockendichte ρ_d

Je höher der Porenanteil ist, desto höher ist die Wasserspeicherfähigkeit. Die Trockendichte fließt als Compaction-Factor (CF) in die PTF nach Baumer (1989) ein. Dieser wurde mit „3“ geschätzt. Dies entspricht einer mitteldichten Lagerung. Außerdem kann die Trockendichte mit der Sieblinie verglichen werden und diese auf Plausibilität geprüft werden. Die Trockendichte von Lehm liegt durchwegs höher als die der einzelnen Fraktionen.

Hydraulische Leitfähigkeit k_s

Die hydraulische Leitfähigkeit aus dem Laborversuch dient der Abschätzung, ob die Pedotransferfunktionsberechnung nach Baumer (1989) einen annehmbaren Wert liefert. Ist die Leitfähigkeit hoch, besteht der Boden vorwiegend aus grobkörnigem Material (Steine, Kies, Sand). Ist sie sehr niedrig, besteht er zu großen Teilen aus Feinkorn (Schluff und Ton).

Retentionsfunktion

Aus der RTF werden die als Referenz anzusehende FK, der PWP und die Bewässerungsgrenzen bestimmt. Außerdem ist sie die Referenz für die Bewässerungsgrenzen, FK und PWP der anderen Methoden (bisher verwendete Werte, Literaturwerte, PTF, Rosetta).

Korngrößenverteilung

Sie liefert die wichtigsten Eingangswerte für die PTF nach Baumer (1989) (Massenanteile Sand, Schluff, Ton). Aufgrund der Kornzusammensetzung lassen sich andere Parameter, z.B. die Wasserleitfähigkeit, der (entwässerbare) Porenanteil, die FK oder der PWP einem wahrscheinlichen Bereich zuordnen.

Feststoffdichte ρ_s

Die Feststoffdichte und die Trockendichte haben einen direkten Bezug zum Porenanteil (Formel 12).

Organischer Kohlenstoffgehalt C_{org}

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff fließt in die PTF nach Baumer (1989) ein. Je mehr Humus ein Boden aufweist, desto höher ist seine Wasserspeicherkapazität.

Die ersten vier Untersuchungen wurden an ungestörten Bodenproben (Stechzylindern) durchgeführt, für die letzten drei Parameter wurden gestörte Bodenproben verwendet.

Bodenproben (Stechzylinder) in 10, 20, 30, 40, 50 cm Tiefe

Ungestörte Bodenproben wurden mittels Stechzylinder im Feld genommen und stellen die Ausgangsbasis für viele Laborversuche dar. Stechzylinder sind ringförmige Zylinder aus Edelstahl, an der Außen- und Innenseite glatt und an der unteren Aufstandsfläche schneidenähnlich geformt, um den Eindringwiderstand zu vermindern. Sie wurden mit Hilfe einer Schlaghaube und eines Hammers in das Erdreich getrieben, bis die Geländeoberfläche und die Zylinderringoberkante eine plane Ebene ergeben. Der Hammer besteht vorzugsweise aus Kunststoff, um Vibrationen beim Schlagen zu mindern. Jeder Zylinder war mit einer eingravierten Nummer versehen.

Die Bodenprobennahme erfolgte in 5 Tiefen (10/20/30/40/50 cm). Es wurden jeweils 3 Zylinder je Tiefe entnommen und noch im Feld gewogen, um Verdunstungsverluste zu vermeiden und das Frischgewicht möglichst genau zu ermitteln.



Abbildung 21: Stechzylinder I



Abbildung 22: Stechzylinder II

Porenanteil

Der Porenanteil n ist das Maß für das auf das Gesamtvolumen bezogene Porenvolumen. Zum Porenvolumen gelangt man durch Subtraktion der getrockneten Bodenmasse von der Gesättigten. Das Bezugsvolumen ist das Zylindervolumen.

Formel 10

$$V_p = V - V_s$$

Bei Vollsättigung entspricht das Wasservolumen dem Porenvolumen:

Formel 11

$$V_p = V_L = \frac{m_L}{\rho_L}$$

...und der Porenanteil errechnet sich zu:

Formel 12

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V - V_s}{V} = \frac{V_L}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$$

Trockendichte

Die Trockendichte ρ_d wird über das Verhältnis von ofentrockenem Gewicht ($m_d \approx m_s$) zu Zylindervolumen bestimmt. Dazu wurde die feuchte Bodenprobe samt Zylinder in den Trockenofen gestellt und bis zur Massenkonstanz getrocknet. Danach wurde die Probe gewogen. Das Zylindervolumen war vorab bekannt.

Formel 13

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

Hydraulische Leitfähigkeit (k_s)

Die hydraulische Leitfähigkeit wurde mithilfe des standardisierten Versuchs mit aufsteigendem Wasserspiegel im Labor ermittelt. Die Versuchsanordnung bestand aus einer Wasserwanne, Elektrodenplatten (rechteckige Platten, die die Elektrodenstäbchen aufnahmen), einem Ultraschallsensor zur Bestimmung der Außenwasserspiegelhöhe, einem Boyle-Marriot'schen Gefäß und einem PC auf dem das Messprogramm installiert war.

Versuchsablauf im Labor

Die Zylinder wurden über Nacht in ein Bad mit entlüftetem Wasser gestellt um die Bodenmatrix von unten nach oben aufzusättigen. Ein Aufsatzzylinder wurde mittels eines Dichtringes mit dem Probenzylinder wasserdicht verschlossen. Entlüftetes Wasser wurde in die Wanne geleert und der Wasserspiegel bis an die Oberkante des Bodenprobenzylinders gehoben. Die Elektrodenplatten wurden auf die Zylinder gesetzt. Diese Elektrodenplatten bestanden aus einer Kunststoffplatte und verschiedenen langen Metallstiften, welche den Wasseranstieg in der Probe durch elektrischen Kontaktschluss bestimmten. Die Zeit bis zum Kontaktschluss wurde durch den Computer aufgezeichnet. Nach kurzer Wartezeit wurde der Wasserspiegel bis knapp unter die Oberkante des Aufsatzzylinders gehoben und der Ablaufschlauch des Boyle-Marriot'schen Gefäßes in die Wanne eingehängt. Die Schlauchöffnung musste sich unter dem Wasserspiegel befinden. Der Außenwasserspiegel war nun höher als jener

in den Zylindern. Dieser spiegelte auf. Die Zeit bis zum Aufspiegeln war der bestimmende Wert für die hydraulische Leitfähigkeit.



Abbildung 23: Versuchswanne mit Zylindern



Abbildung 24: Boyle Marriot'sche Flasche

Die hydraulische Leitfähigkeit ist ein Eingangsparameter für die Pedotransferfunktion (oder kann mithilfe dieser ermittelt werden)

Matrixpotential-Wasseranteilsbeziehung (Retentionsfunktion)

Die Retentionsfunktion wurde im Labor mithilfe des Druckplattenapparates (Drucktopf) ermittelt. Dazu wurden die ungestörten Bodenproben mit entlüftetem, entionisiertem Wasser über Nacht aufgesättigt und, nach dem Bestimmen des Sättigungsgewichtes, auf eine gesättigte Keramikplatte gesetzt. Diese Platten wurden in die Druckkammern eingebracht und die Kammern luftdicht verschlossen. Es wurde Überdruck an die Kammer gelegt und so ein „negatives“ Matrixpotential (weil Über-, statt Unterdruck) erzeugt. Nach Erreichen einer Druckstufe wurden die Proben dem jeweiligen Druck für eine bestimmte Zeit ausgesetzt. Das Porenwasser wurde aus der Probe verdrängt. Der zur jeweiligen Druckstufe gehörige Massenverlust gab, verglichen mit dem Sättigungsgewicht vor Versuchsbeginn, an, welche Masse Wasser aus dem Boden gepresst wurde. Diese Masse entspricht dem negativen Matrixpotential.

Eine Pflanze müsste, um weiter Wasser aus dem Boden zu gewinnen „mehr Energie“ aufbringen können (ein negativeres Matrixpotential).

Die Erhöhung des Druckes und die Bestimmung des dazugehörigen Feuchtgewichtes der Zylinder wurde für 9 Stufen wiederholt. Für die Druckbereiche 0 – 3 und 3,01 – 15 bar waren unterschiedliche Keramikplatten nötig. Üblich sind die Druckstufen:

Tabelle 7: Druckstufen

Druck / bar	Dauer / Wochen
0,1	1
0,2	1
0,3	1
0,5	2
1,0	3
3,0	3
5,0	4
10	4
15	4

Der Versuch wird in der ÖNORM L1063 geregelt.



Abbildung 25: Drucktöpfe



Abbildung 26: Drucktopf und Zylinder

Siebanalyse

Es wurden zwei Feinnasssiebungen von verschiedenen Bodenhorizonten durchgeführt. Die erste Siebung umfasste eine Mischprobe der Tiefen 0 – 50 cm. Diese wurde aus den Stechzylindern gewonnen. Die zweite Siebung erfolgte mit einer Probe aus einer Tiefe von 1 Meter.

Die Feinnasssiebung diente in erster Linie zur Ermittlung des Sandanteils in der Probenmenge. Vor der Siebung wurden in einem Absetzzyylinder 100 Gramm des zu siebenden Materials in 250 ml Dispergierung gelöst. Nach 8-stündiger Ruhe wurden 200 ml entionisiertes Wasser zugegeben. Der Zylinder wurde verschlossen und 6 Stunden lang in einem Rüttelgerät gerüttelt. Diese Mischung wurde gesiebt.

Die Siebmaschenweiten reichten von 0,063 mm bis 2 mm. Bei der Siebung blieben alle Partikel, deren kleinster Durchmesser größer als die Maschenweite war, auf dem Sieb liegen (Rückstand). Alle anderen fielen hindurch (Durchgang) und wurden entweder vom nächsten Sieb aufgefangen, oder fielen auch hier hindurch.

Die erste Siebung wurde nur mit dem 0,063 mm Sieb durchgeführt um das Siebgut vorab von Feinpartikeln zu säubern. Diese könnten die Siebe verlegen und zu einer verzerrten, oder verschobenen Sieblinie führen. Das Siebgut wurde in eine Schale gespült und die Siebe in die Rüttelapparatur gestellt. Das Material wurde auf das 2,0 mm Sieb aufgebracht, die gläserne Spülkuppel aufgesetzt und fest verschlossen. Es wurde so lange gerüttelt, bis aus dem Auslauf der untersten Schale ungetrübtes Wasser austrat. Der Ablauf wurde verworfen. Die Siebrückstände wurden in Schalen gespült und im Trockenofen bei 105° Celsius bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Da die Bodenprobe auch Grobkorn ($d > 2,0$ mm) enthielt wurden die Siebrückstände auf das korrigierte Einwaagengewicht bezogen. Das korrigierte Einwaagengewicht enthält die Fraktion $> 2,0$ mm nicht.

Das Ergebnis der Siebanalyse ist die Sieblinie. Sie wird durch den Bezug der einzelnen Siebrückstände auf das Gesamtgewicht der korrigierten Einwaage gewonnen.

Formel 14

$$R_i = \frac{m_{s,i}}{\sum m_s'} \times 100$$

- [R_i] = % Rückstand des Siebes i
- [m_{s,i}] = g Massenrückstand trocken auf Sieb i
- [m_s'] = g Trockengewicht der gesamten Einwaage (inkl. Ablauf, exkl. Überkorn)



Abbildung 27: Nasssiebapparatur



Abbildung 28: Siebe unterschiedlicher Maschenweite

Feststoffdichte (Pyknometerversuch)

Beim Pyknometerversuch (griech. *pyknos* = dicht gedrängt) wird ein bekanntes Volumen mit einem zu messenden Stoff und mit einer Flüssigkeit (deren Dichte bekannt ist) gefüllt und das Gewicht bestimmt. So kann auf die Feststoffdichte des Stoffes ρ_s geschlossen werden.

Das Pyknometergewicht (inkl. Glasstoppel) wurde auf 1 mg genau bestimmt. Danach wurde das Pyknometer mit luftgetrocknetem Boden gefüllt, abermals gewogen und bis zur Hälfte mit entlüftetem Wasser gefüllt. Diese Suspension wurde zum Sieden gebracht und die verbliebenen Lufteinschlüsse und im Wasser gelöste Gase ausgetrieben. Das Pyknometer wurde bis zum oberen Rand des Halses mit entlüftetem Wasser gefüllt. Im Exsikkator wurde die Probe weiter entlüftet. Das Pyknometer wurde mit dem Glasstoppel so verschlossen, dass die Kapillare im Stoppel vollständig mit Wasser gefüllt war. Das Gewicht, sowie die Temperatur des gefüllten Pyknometers wurden bestimmt.

Über die Massendifferenzen des leeren, des bodengefüllten und des boden- und wassergefüllten Pyknometers, bezogen auf das bekannte Volumen und die Dichte des Wassers kann auf die Feststoffdichte der Bodeneinwaage geschlossen werden.

Formel 15

$$\rho_s = \frac{m_{P+s+w} - m_P}{V_P \times (1 + w) - \frac{m_{P+s+w+W} \times (1 + w) - m_{P+s+w} - w \times m_P}{\rho_w(t)}}$$



Abbildung 29: Pyknometer auf Waage



Abbildung 30: Exsikkator

Kohlenstoffgehalt

Organischer Kohlenstoffgehalt

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff ist ein Indikator für die Wasserspeicherfähigkeit des Bodens. Je höher der org. Kohlenstoffgehalt liegt, desto mehr Wasser kann der Boden speichern. Um ihn zu bestimmen wurde zuerst der Gesamtkohlenstoff mit Hilfe des C/N Gerätes ermittelt. Danach wurde von diesem der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff subtrahiert. Der anorganische Kohlenstoffgehalt wurde mit dem Calcimeter nach Scheibler ermittelt.

Der organische Kohlenstoffgehalt ist zudem ein Eingangswert für die Pedotransferfunktion.

C/N-Gerät – Gesamtkohlenstoff

Mit dem C/N Gerät wurde der Gesamtkohlenstoff bestimmt. Die Bestimmung erfolgt vollautomatisch.

Der Elementaranalysator Vario-MAX CN arbeitet nach dem Prinzip der katalytischen Rohrverbrennung unter Sauerstoffzufuhr und hohen Temperaturen. Zunächst wird die Bodenprobe bei 900°C vollständig verbrannt und anschließend die Verbrennungsgase von störenden Fremdgasen (wie z.B. flüchtigen Halogenen oder Schwefelverbindungen) in einem Reduktionsrohr gereinigt. Um die beiden Messkomponenten (C und N) voneinander zu trennen wird das Verbrennungsgas über eine C-spezifische Adsorptionssäule geleitet, die den Kohlenstoff bindet. Damit ist es möglich C und N nacheinander mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor (WLD) zu bestimmen. Als Spül- und Trägergas dient Helium (He) (E-Mail-Mitteilung Faulhammer, 10.01.2012)

Calcimeter nach Scheibler – Anorganischer Kohlenstoff

In dieser Apparatur reagieren anorganische Carbonate (CaCO_3 , MgCO_3 , FeCO_3 , Na_2CO_3) mit Salzsäure und werden zu CO_2 vergast. Die entstandene Menge an CO_2 wird gasvolumetrisch bestimmt und ist ein Maß für den Gehalt an anorganischem Kohlenstoff.



Das im Glas entstehende Kohlendioxid verdrängt eine äquivalente Menge Luft aus der Scheiblerbase. Diese (Luft) drückt gegen die Wassersäule im Messrohr. Der Wasserspiegel im Messrohr wird durch den Druck sinken, der im Aufspiegelrohr steigen. Nach Ausspiegeln der beiden Flüssigkeitshöhen kann auf dem Messrohr das verdrängte Volumen abgelesen werden. Diese wird mithilfe der Formel 16 in den prozentuellen Massenanteil des Kalks an der Bodeneinwaage umgelegt.

Der genaue Arbeitsablauf umfasst eine Vielzahl einzelner Schritte. Die genaue Anleitung findet sich im Lehrbehelf „Applied Soil Physics“ des Institutes für Landeskulturelle Wasserwirtschaft und Hydraulik der Universität für Bodenkultur (Cepuder et al., 2009).

Abbildung 31: Scheibler-Apparatur

Formel 16

$$w_{CaCO_3} = \frac{0,12120 \times V_{Abl} \times p}{m_s \times (T + 273,15)}$$

[w_{CaCO_3}]	= %	spezifische Massenanteil des Kalks
[V_{Abl}]	= ml	abgelesenes Volumen am Messrohr
[p]	= hPa	Luftdruck, zur Zeit der Ablesung
[m_s]	= g	Gewicht der ofentrockenen, untersuchten Bodenprobe
[T]	= °C	Raumtemperatur zur Zeit der Ablesung

5. Ergebnisse und Diskussion

5.1. Labordaten

Hydraulische Leitfähigkeit (k_s)

Die Ermittlung der hydraulischen Leitfähigkeit ergab einen mittleren k_s -Wert von $2,05 \times 10^{-3}$ m/s über die beprobte Profiltiefe. Die Durchlässigkeiten der Schichten sind wiederum Mittelwerte aus den Proben der jeweiligen Tiefe. Wobei nicht aus allen genommenen Stechzylindern aussagekräftige Mittelwerte gewonnen werden konnte. So lieferte die Probennahme der Tiefe 30 cm nur 2 auswertbare Proben, die der Tiefe 50 cm nur eine. Ausführliche Daten finden sich im Anhang.

In den oberen Bodenschichten (<20 cm) ließ sich eine geringere Durchlässigkeit feststellen. Der Horizont um 20 cm wies eine höhere Durchlässigkeit auf. Bei einer Tiefe von 30 cm herrschte ein Durchlässigkeitsvermögen, welches der obersten Bodenschicht ähnelt. Die Bereiche von 40 und 50 cm unter der Geländeoberkante waren ähnlich dem Bereich um 20 cm.

Tabelle 8: Mittelwerte der Durchlässigkeiten verschiedener Tiefen

Tiefe / cm	k_s / cm/sec
10	4,98E-03
20	3,13E-04
30	3,65E-03
40	6,22E-04
50	6,97E-04
Mittelwert	2,05E-03

Dies ergibt einen Mittelwert von $2,05 \times 10^{-3}$ cm/s. Die PTF nach Baumer (1989) lieferte einen Wert von $2,75 \times 10^{-4}$ cm/s und weicht somit vom gemessenen Wert ab.

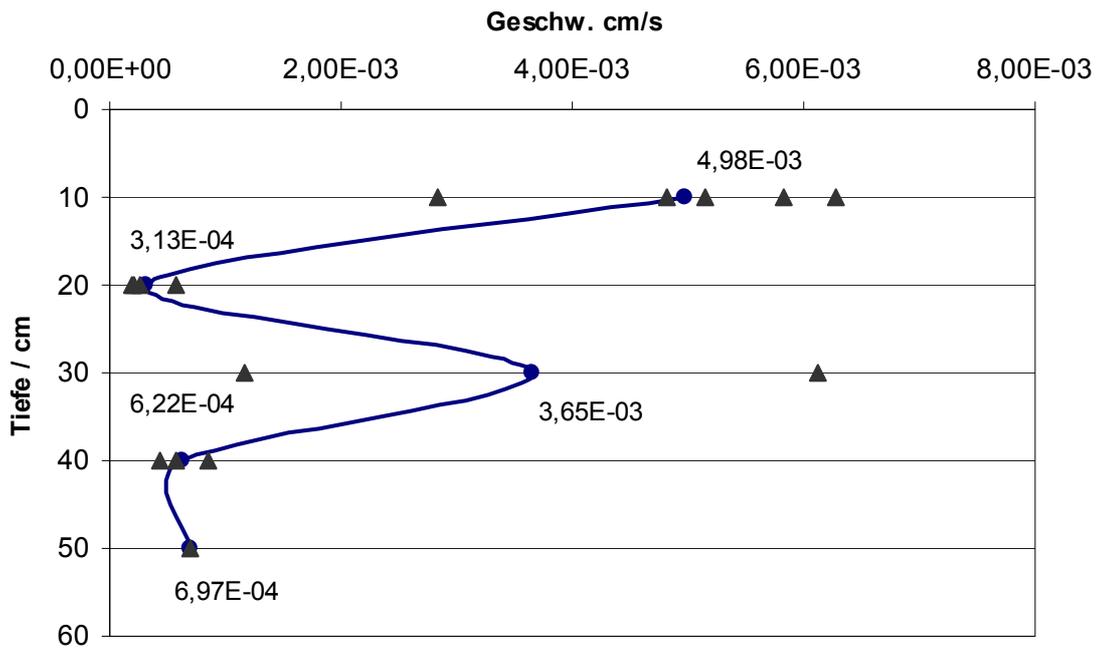


Abbildung 32: Verlauf der hydraulischen Leitfähigkeit über die Tiefe

Siebanalyse

Mischprobe aus 0-80 cm (Müller, 2010)

Im Zuge seiner Diplomarbeit führte Müller (2010) Siebanalysen mit Bodenproben aus der Versuchsfläche Andau durch. Die Proben wurden aus Tiefen zwischen 10 und 80 cm entnommen. Die Siebungen ergaben einen mittleren Sandanteil von 41,9 %, Schluffanteil von 37,6 % und Tonanteil von 20,5 % (Abbildung 33 und Abbildung 34).

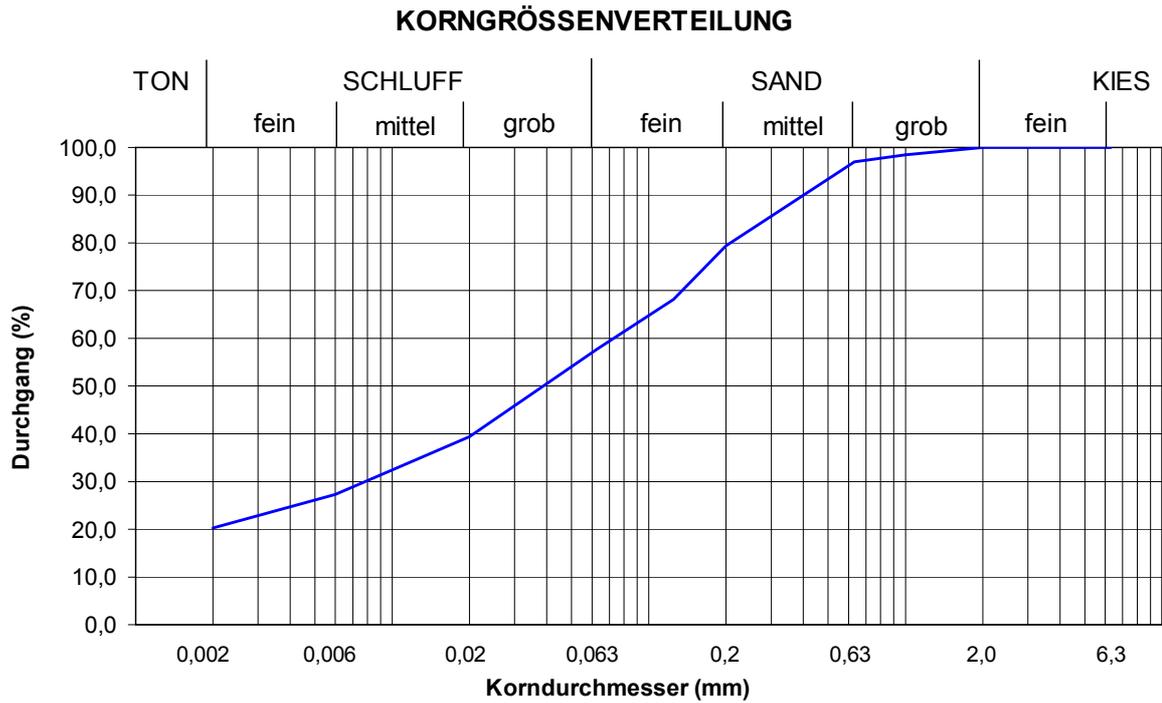


Abbildung 33: Sieblinie Mischprobe 0-60 cm (Müller, 2010)

Texturdreieck des untersuchten Bodens

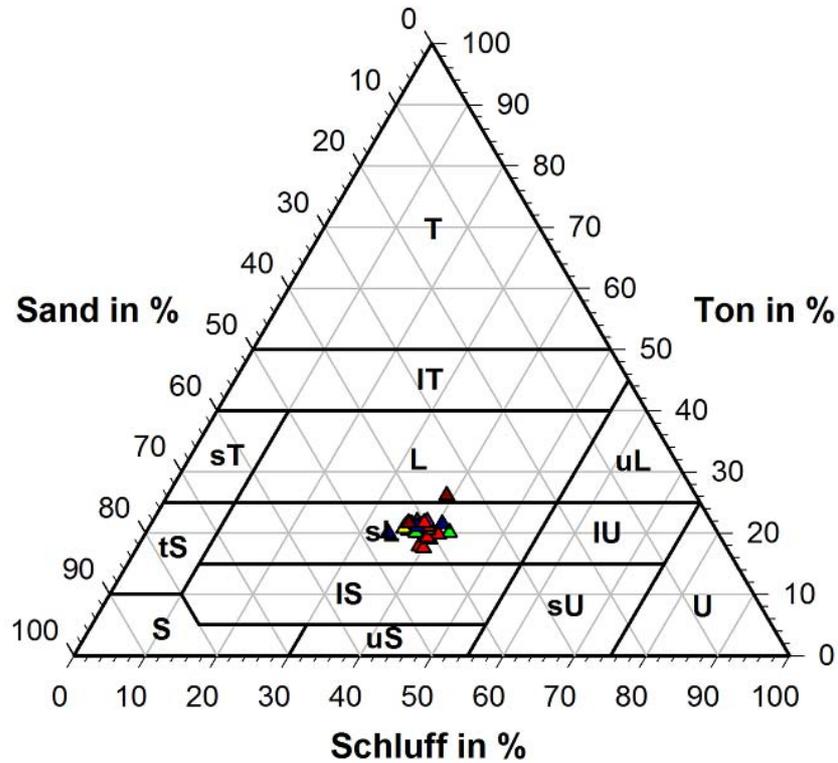


Abbildung 34: Texturdreieck des untersuchten Bodens (Müller, 2010)

Die von Müller (2010) durchgeführten Siebungen liegen zum überwiegenden Teil im Sektor „sL“ (sandiger Lehm).

Die ermittelte Korngrößenverteilung entspricht der ermittelten Trockendichte und dem Porenvolumen mit dem Normbereich von Lehm von 1,20 – 2,0 g/cm³, bzw. 30 – 55 % sehr gut.

Zusätzliche Proben aus 80-100 cm Tiefe

Diese Probe ergab, dass der Boden in dieser Tiefe aus tonigem/schluffigem Sand mit kiesigem Anteil besteht. Es wurde keine Kornverteilungsermittlung mit der Schlämmerkornfraktion (< 0,06 mm) durchgeführt, weil der überwiegende Teil der Bodenprobe (81,9 %) der Sandfraktion entstammte und 8,7 % der Probe der Kiesfraktion zuzuschreiben waren. Lediglich 9,4 % waren kleiner als die Sandfraktion und als Schlämmerkorn ansprechbar. Somit handelte es sich um kiesigen Sand mit Ton- und/oder Schluffanteilen (Abbildung 35).

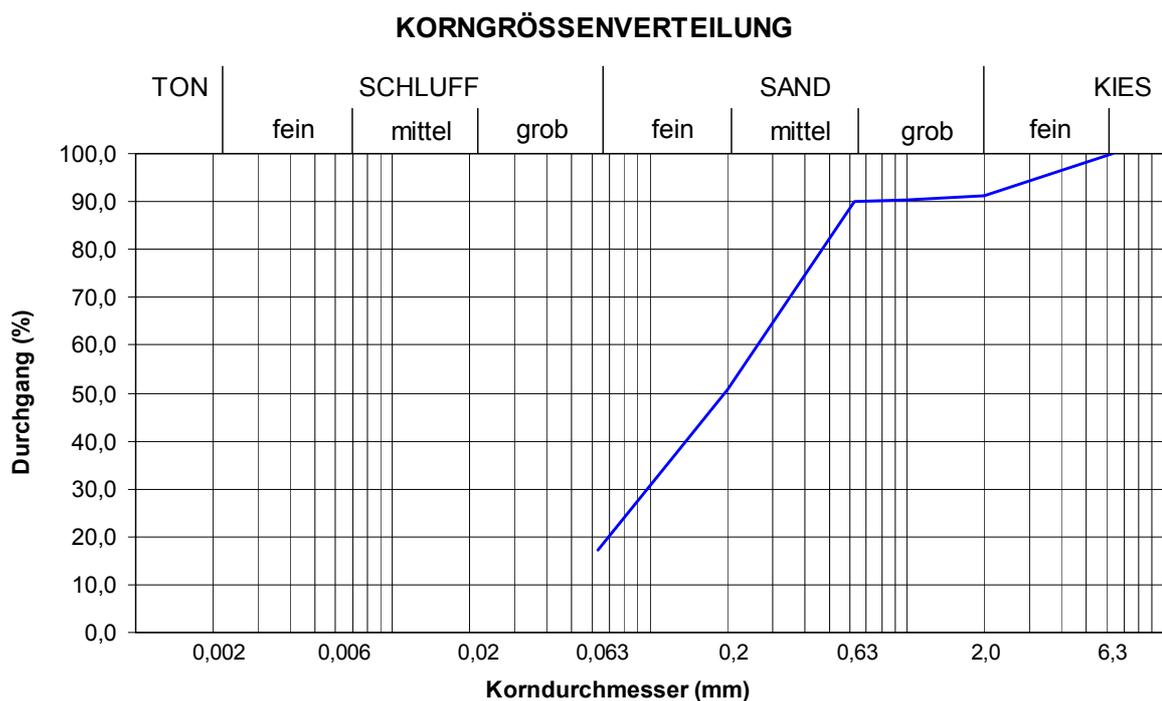


Abbildung 35: Sieblinie Probe aus 1 Meter Tiefe

Der hohe Schluff- und Tonanteil in den oberen Bodenschichten (10-50 cm) erklärt lässt eine gute Wasserspeicherfähigkeit vermuten. Gelangt Wasser in tiefere Bodenschichten (> 90 cm), so wird es eher perkolieren. Der hohe Sandanteil der Probe aus einem Meter Tiefe lässt darauf schließen.

Feststoffdichte

Die Auswertung des Pyknometerversuches lieferte für die 5 untersuchten Tiefen ähnliche Ergebnisse. Die mittlere Feststoffdichte beträgt 2,67 g/cm³.

Tabelle 9: Feststoffdichten verschiedener Tiefen

Tiefe / cm	Mittelwert ρ_s / g/cm ³
10	2,68
20	2,68
30	2,65
40	2,68
50	2,65
Mittelwert	2,67

Trockendichte

Die Trockendichten (Tabelle 10) werden durch den Bezug der Trockengewichte des im Stechzylinder enthaltenen Bodens - nach dem Trocknen im Ofen bei 105°C bis zur Massenkonstanz - auf das Stechzylindervolumen ermittelt.

Die mittlere Trockendichte der 5 untersuchten Tiefen beträgt 1,46 g/cm³.

Tabelle 10: Trockendichten unterschiedlicher Tiefen

Tiefe / cm	ρ_d / g/cm ³
10cm	1,37
20cm	1,52
30cm	1,59
40cm	1,48
50cm	1,34
Mittelwert	1,46

Porenanteil

Der mittlere Porenanteil (Tabelle 11) der untersuchten Proben lag bei 43,5%. Die mittleren Porenanteile der unterschiedlichen Schichten weichen um bis zu rund 5 % voneinander ab.

Tiefe / cm	n
10cm	0,46
20cm	0,42
30cm	0,42
40cm	0,45
50cm	0,42
Mittelwert	0,44

Tabelle 11: Porenanteil

Der geringere Porenanteil in den Schichten um 20 cm und 30 cm lässt sich durch die Verdichtung, der höherer Porenanteil durch die Auflockerung durch die Bodenbearbeitung erklären.

5.2. Grenzwerte und FK, nFK, PWP aus unterschiedlichen Methoden

Die Feldkapazität (FK) und der Permanente Welkepunkt (PWP) wurden mit unterschiedlichen Methoden ermittelt. Nach Doorenbos et al. (1986) ergeben sich die jeweilige obere und die untere Bewässerungsgrenze zu 80 %, bzw. 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK). Die Werte sind auf eine Profilhöhe von 70 cm bezogen.

Folgende Methoden wurden herangezogen:

- Ermittlung der Werte über die **Retentionsfunktion** des Bodens im Labor
- **Bisher verwendete Werte** entstammen der PTF nach Baumer (vereinfachte Annahme einer gleichbleibenden Korngrößenverteilung über die Profilhöhe von 70 cm) (Nolz, 2011)
- **Literaturwerte** aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Finnern et al., 1996)
- **Pedotransferfunktion nach Baumer**(1986) (Korngrößenanalyse in 5 Schichten zu jeweils 10 cm Vertikalabstand und Miteinbeziehung des organischen Anteils)
- **ROSETTA** (EDV-Programm, 3 Methoden mit unterschiedlichem Datenumfang)

Die übersichtliche Zusammenstellung findet sich auf der nächsten Seite.

Gegenüberstellung der Bewässerungsgrenzen unterschiedlicher Methoden

Tabelle 12: Übersicht Bewässerungsgrenzen verschiedener Methoden

Profilhöhe = 70cm	1		2		3		4		5				
	RTF	BV	Abw.	LT	Abw.	PTF	Abw.	Rosetta					
	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	SSC	Abw.	BD	Abw.	331500	Abw.
FK	183	160	-23	290	107	196	13	170	-13	172	-11	174	-9
obere Grenze	166	150	-16	263	97	175	9	147	-19	150	-16	154	-12
untere Grenze	141	130	-11	222	81	145	4	113	-28	117	-24	125	-16
PWP	98	100	2	154	56	93	-5	56	-42	62	-36	75	-23
nFK	85	60	-25	137	52	103	18	114	29	110	25	99	14

RTF	Retentionsfunktion
BV	Bisher verwendete Werte (Nolz, 2007)
LT	Literatur nach AG Boden (Finnern et al., 1989)
PTF	Pedotransferfunktion nach Baumer (1986)
Abw.	Abweichung
SSC	Sand/Silt/Clay
BD	Sand/Silt/Clay/Bulk Density
331500	Sand/Silt/Clay/Bulk Density/Watercontent @ 33&1500 kPa

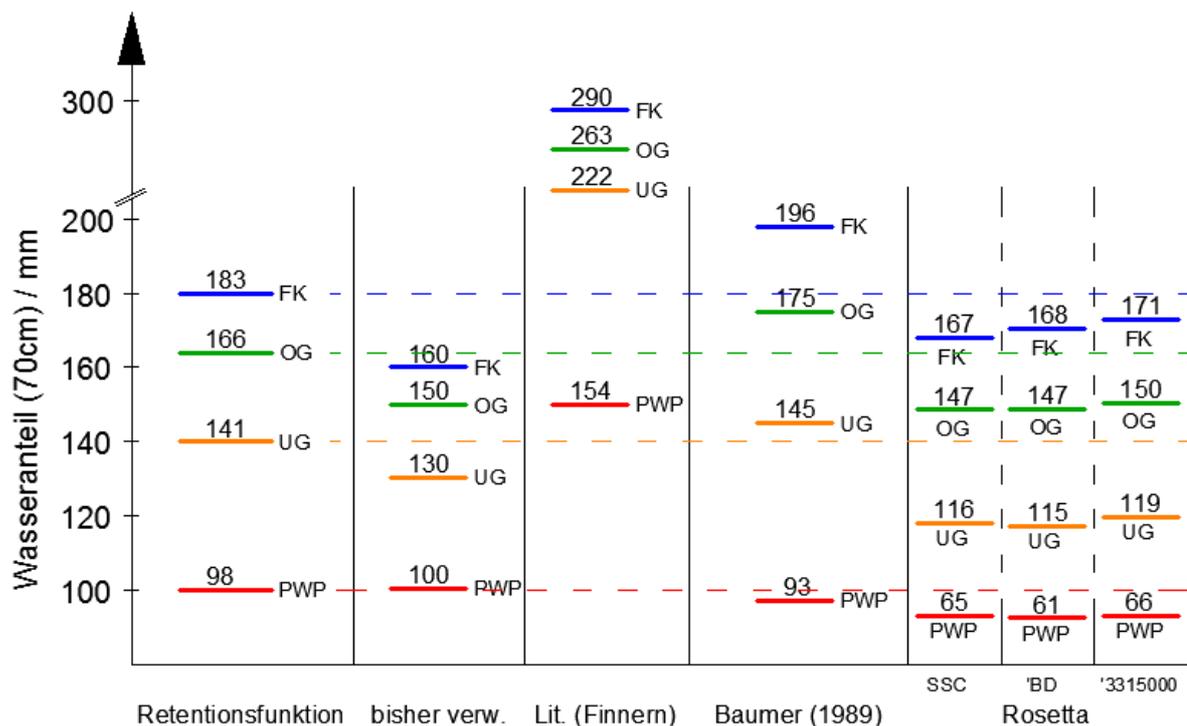


Abbildung 36: Gegenüberstellung Bewässerungsgrenzen

Die **Laborwerte der Retentionsfunktion** werden als Referenzwerte angesehen. Nach diesen Grenzwerten ist die Bewässerung zu steuern. Nachteil der Drucktopf-methode ist die langwierige Versuchsdurchführung und der manuelle Arbeitsauf-

wand. Sollen nur die Wasseranteile der Feldkapazität und des Permanenten Welkepunktes ermittelt werden, dauert der Laborversuch laut Vorschrift zumindest 5 (1+4) Wochen. Die Druckstufendauern gelten jedoch nur bei vorheriger Entwässerung durch die vorangegangenen Druckstufen. Werden die dazwischenliegenden Druckstufen übersprungen, dauert die Entwässerung der Bodenprobe bis zur Massenkonstanz bei der jeweiligen Druckstufe länger. Dies könnte in einem Versuchsdurchgang durch mehrmaliges wägen überprüft werden.

Die Drucktopfmethode ist bedingt empfehlenswert. Sie ist arbeits- und zeitaufwändig und damit in der Praxis mit höheren Kosten verbunden als die relativ schnelle Ermittlung nach Baumer (1989). Daneben entspricht die im Labor ermittelte Feldkapazität nicht der, die im Feld auftritt. Im Feld entspräche die FK dem Wassergehalt, der 2-3 Tage nach einem starken Regenereignis im Boden auftritt. Durch die Zylinderwand und die Keramikmembran werden im Labor Randbedingungen geschaffen, die in der Natur nicht auftreten würden. Daneben ist die Zuweisung der Druckhöhe von 1/10 – 1/3 bar zur FK eine rein konzeptionelle, und keine natürlich bedingte.

Die **bisher verwendeten Werte (Nolz, 2011)** weichen wenig von den Laborwerten des Drucktopfversuches ab und sind für eine grobe Abschätzung der Bewässerungsgrenzen ausreichend genau. Es empfiehlt sich jedoch eine differenzierte Betrachtung nach unterschiedlichen Profilschichtenhöhen und die Miteinbeziehung des Humusgehaltes, wie bei der aktuellen PTF durchgeführt.

Die Ermittlung der Bewässerungsgrenzen mittels **Literaturwerten** aus Finnern et al. (1996) ist wegen deren großen Abweichungen zu den Werten der Retentionsfunktion nicht empfehlenswert.

Die Werte der **Pedotransferfunktion nach Baumer (1989)** liegen sehr nah an denen der Retentionsfunktion. Die PTF bietet den Vorteil einfach anwendbar zu sein. Des Weiteren werden nur geringe Mengen an Daten benötigt (Korngrößenverteilung, Humusanteil und Trockendichte). Die PTF ist schnell durchführbar und somit kostengünstig umzusetzen. Somit ist die Pedotransferfunktion nach Baumer (1989) im untersuchten Fall das vorzuziehende Mittel zur Bestimmung der Bewässerungsgrenzen.

Die 3 untersuchten Berechnungsmethoden aus dem Programm **Rosetta** liefern den Laborwerten ähnliche Bewässerungsgrenzen und entsprechen der Genauigkeit der bisher verwendeten Werte. Je weniger Daten zur Eingabe zur Verfügung stehen, desto stärker ist die Abweichung von den Laborwerten. Rosetta benötigt zumindest, ebenso wie Baumer (1989), die Korngrößenverteilung als Datengrundlage. Die PTF nach Baumer (1989) bedient sich in etwa der gleichen Datenmenge, wie die SSCBD-Methode. Die Grenzwerte der datenumfassenderen SSCBD331500 Methode sind ungenauer, als die aktuelle PTF. Somit ist die PTF nach Baumer (1989) im aktuellen Fall einer Berechnung mit Rosetta vorzuziehen.

Genauer werden die einzelnen Methoden sich auf den nächsten Seiten betrachtet.

Retentionsfunktion Labor

Aus der Retentionsfunktion der Labormessung gingen für die Grenzen PWP und FK die Werte 98,7 mm (prozentueller Wasseranteil für den PWP multipliziert mit der Profilhöhe von 70) und 183,2 mm (prozentueller Wasseranteil für die FK multipliziert mit der Profilhöhe von 70 cm) hervor. Somit ergibt sich eine nFK von 84,5 mm.

Tabelle 13: Retentionsfunktionswertepaare Labor

	Wasseranteil / % _{vol.} (Mittelwerte)								
Druck [bar]	0	0,1	0,2	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	15,0
Tiefe [cm] / pf [log(bar)]	0	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0	3,5	3,7	4,2
10cm	46,4	28,4	24,6	22,7	20,8	19,2	17,1	15,7	12,3
20cm	41,8	30,3	27,2	26,0	24,0	22,7	20,0	18,2	15,2
30cm	42,3	33,0	30,1	28,3	26,1	24,5	21,7	20,3	16,7
40cm	44,6	33,4	30,4	28,8	26,2	24,4	21,4	19,3	15,2
50cm	42,2	32,6	29,4	27,5	24,6	21,5	17,3	15,3	11,4
Mittelwert aller Tiefen	43,6	31,1	27,8	26,2	23,9	22,1	19,3	17,6	14,1

Nach Doorenbos (et al., 1986) ergeben sich für:

$$\text{Full Point (obere Bewässerungsgrenze)} = (183-99)*0,8 + 98 = \mathbf{166 \text{ mm}}$$

$$\text{Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze)} = (183-99)*0,5 + 98 = \mathbf{141 \text{ mm}}$$

Bisher verwendete Werte

Beim aktuellen Projekt wurden bisher die Grenzwerte für die Bewässerungssteuerung nach Doorenbos et al. (1986) bei 50 % (unterer Grenzwert) und 80 % (oberer Grenzwert) des pflanzenverfügbaren Wassers verwendet (Nolz et al., 2011). Die Werte für die FK (bei $pF = 2,5$) und den PWP entstammen der Pedotransferfunktion nach Baumer (1989), bezogen auf eine Tiefe von 70 cm (Nolz et al., 2010).

Sand	42 %	Field Capacity	Approx. 160 mm
Silt	38 %	Full Point	Approx. 150 mm
Clay	20 %	Onset of Stress	Approx. 130 mm
		Wilting Point	Approx. 100 mm

Abbildung 37: Aktuelle Grenzwerte (Nolz et al., 2010)

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **148 mm** (≈ 150 mm) (-16 mm im Vergleich zur Retentionsfunktion [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze) = **130 mm** (-11 m [iVzRTF])

Literaturwerte aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (Finnern et al., 1996)

Nach AG Boden (Finnern et al., 1996) wird der untersuchte Boden als „mittel sandiger Lehm“ klassifiziert (Ls 3) (Sand = 41,9 %, Schluff = 37,5 %, Ton = 20,4 %). In Verbindung mit einer Trockendichte von $1,453 \text{ g/cm}^3$ ergibt dies eine FK von $41,5 \%_{(\text{Vol})}$ und eine nFK von $19,5 \%_{(\text{Vol})}$. Mit einer Bodensäulenhöhe von 70 cm errechnet sich eine **nFK** von **136,5 mm** (=13,9 % des Porenvolumens) und eine **FK** von **290 mm** (17,5 % des Porenvol.). Dies ergibt einen PWP von 153,5 mm.

Nach Doorenbos (et al., 1986) ergeben sich für:

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **263 mm** (+97 mm [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bew.grenze) = **222 mm** (+81 mm [iVzRTF])

Der Wert für die Feldkapazität ist, verglichen mit dem bisher verwendeten Wert, sehr hoch. Die Literaturwerte aus Finnern et al. (1996) für FK sind jedoch für einen pF -Wert von 1,8 angegeben. Die aktuellen FK ist mit einem pF -Wert von 2,5 bestimmt. Deswegen sind sie nicht vergleichbar.

Der Laborwert aus der Retentionskurve bei $pF = 1,8$ ist 31,06 % und würde eine FK von 217,4 mm ergeben (Bodensäulenhöhe = 70 cm). Die Feldkapazität würde um 10 % (oder in diesem Fall 70 mm) überschätzt werden. Somit scheint eine Bestimmung aufgrund von Literaturwerten aus Finern et al. (1996) wenig geeignet zu sein, um die Bewässerungsgrenzen abzuschätzen.

Pedotransferfunktion nach Baumer (1989)

Tabelle 14: Ergebnisse der PTF nach Baumer (1989)

Schicht	FK	PWP	nFK	FK	PWP	nFK	kf
cm	vol-%	vol-%	vol-%	mm	mm	mm	m/d
0-10	27,0	12,6	14,5	27,0	12,6	14,5	0,25
10-20	25,3	10,7	14,6	25,3	10,7	14,6	0,34
20-30	28,6	13,8	14,8	28,6	13,8	14,8	0,23
30-40	29,2	14,3	14,9	29,2	14,3	14,9	0,21
40-50	28,7	13,8	14,9	28,7	13,8	14,9	0,21
50-60	29,1	14,7	14,3	29,1	14,7	14,3	0,18
			Mittelwert	28,0	13,3	14,7	
			Gesamt auf 60cm	167,8	79,8	88,0	
			Gesamt auf 70cm	195,8	93,2	102,6	

Die bisher verwendeten Werte entsprechen den neu ermittelten Ergebnissen (nach Baumer, 1989) bedingt. Die Berechnungen unterscheiden sich durch zwei Punkte von der Aktuellen, bisher verwendeten. Der Humusanteil wurde miteinbezogen, und die Bodensäule wurde in mehrere Schichten aufgeteilt. So wird die Korngrößenverteilung genauer erfasst. Humus weist eine hohe Wasserspeicherfähigkeit auf. Der Grobkornanteil wurde mit 0 % geschätzt. Der aktuelle Wert für die FK (bei $pF = 2,5$) nach Baumer (1989) weicht von dem bisher verwendeten um +36 mm ab. Die PWP unterscheiden sich um 7 mm.

Nach Doorenbos (et al., 1986) ergeben sich für:

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **175 mm** (+9mm [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze) = **145 mm** (+4 mm [iVzRTF])

Die Werte, bezogen auf 70 cm Profilhöhe, entsprechen in etwa den von Nolz & Cepuder (2011b) ermittelten. Weiters liefert die Berechnung nach Baumer (1989) einen k_s -Wert von $2,75 \cdot 10^{-4}$ cm/s. Dies entspricht in etwa dem gemessenen Wert.

Rosetta

Tabelle 15: Ergebnisse Rosetta

Höhe / cm		FK (1,8)	FK (2,5)	PWP	nFK	FK (1,8)	FK (2,5)	PWP	nFK
70		%	%	%	%	mm	mm	mm	mm
	SSC	36,3	24,3	8,0	22,3	253,8	170,1	55,8	156,1
	BD	36,3	24,5	8,8	21,6	254,2	171,7	61,7	151,2
	331500	34,6	24,9	10,7	19,0	242,5	174,1	75,2	133,1

FK	Feldkapazität
nFK	nutzbare Feldkapazität ($FK_{(2,5)} - PWP$)
PWP	Permanenter Welkepunkt
FP	Full Point
OoS	Onset of Stress
SSC	Sand/Silt/Clay
BD	Sand/Silt/Clay/Bulk Density
331500	Sand/Silt/Clay/Bulk Density/Watercontent @ 33&1500 kPa

Zwischen den FK für 1,8 und 2,5 ergeben sich Unterschiede im Wasseranteil der oberen 70 cm von bis zu 80 mm. Die obere und untere Grenze sowie die nFK werden beeinflusst. Für die bisher verwendeten Bewässerungsgrenzen wurde die FK mit dem pF-Wert von 2,5 bestimmt. Bei der aktuellen Erstellung der Bewässerungsgrenzen wurde gleich verfahren.

Das EDV Programm ROSETTA liefert für die Grenzen PWP und FK verknüpft mit den verschiedenen Berechnungsmethoden die Werte:

SSC – Sand/Silt/Clay

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **147 mm** (-19 mm [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze) = **116 mm** (-25 mm [iVzRTF])

SSCBD – Sand/Silt/Clay & Bulk Density

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **147 mm** (-19 mm [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze) = **115 mm** (-26 mm [iVzRTF])

SSCBD331500 – Sand/Silt/Clay & Bulk Density & Watercontent @ 33 & 1500 kPa

Full Point (obere Bewässerungsgrenze) = **150 mm** (-16 mm [iVzRTF])

Onset of Stress (untere Bewässerungsgrenze) = **119 mm** (-22 mm [iVzRTF])

5.3. Felddaten

Wetterdatenanalyse

Im Versuchsjahr 2011 (Messzeitraum 01.01.2011 – 12.12.2011) lag die Niederschlagssumme bei 471 mm und die Referenzverdunstung ET₀ bei 919 mm. Dies bedeutet, dass aufgrund der atmosphärischen Wasserbilanz Bewässerungsbedarf gegeben war.

Die von Redl et al. (1996) aufgeführten Ansprüche der Rebe an das Klima wurden größtenteils erfüllt (Tabelle 16). Die Sonnenscheindauer pro Jahr war jedoch um 700 Stunden länger als das Optimum. Somit war das Jahr 2011 aus klimatologischer Sicht fast optimal für den Weinanbau. Das Niederschlagsdiagramm (Abbildung 38) lässt erkennen, dass Juni, Juli und August die regenreichsten Monate waren. Die Beeren werden üblicherweise im September geerntet. Die Veraison startet Anfang August. Im August wäre geringerer Niederschlag für die geschmackliche und aromatische Entwicklung der Beere von Vorteil gewesen.

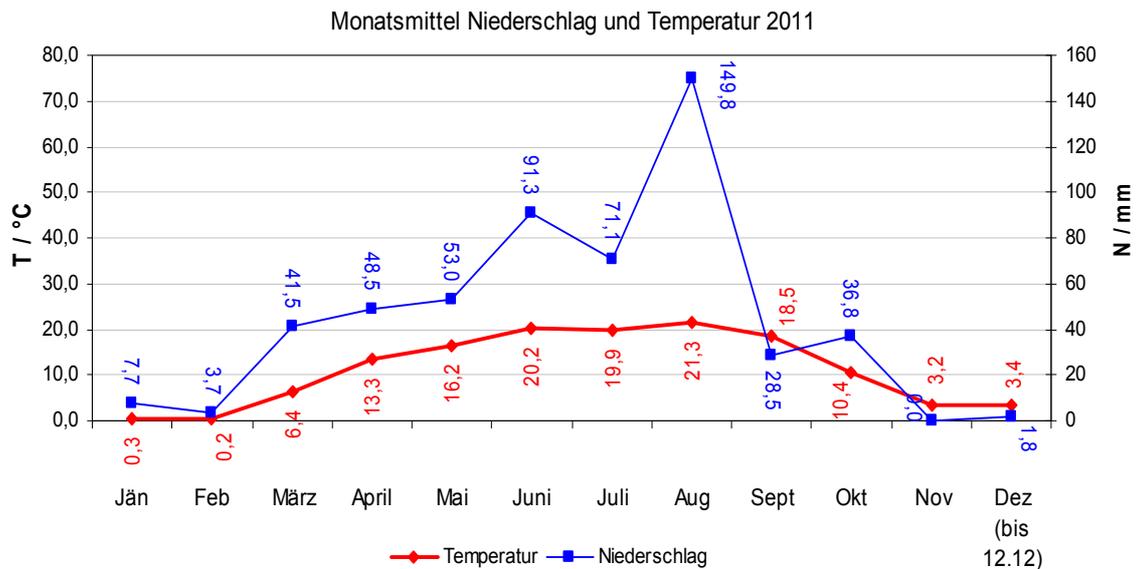


Abbildung 38: Monatsmittel Niederschlag und Temperatur Adcon-Station

Tabelle 16: Wetterdaten des Jahres 2011 (Adcon-Station)

Wetterdaten des Jahres 2011 (Adcon)			Anforderungen nach Redl et al. (1996)
Temperatur			
Σ Jahr	4018	°C	
Σ April-Sept.	3343	°C	min 2900°C
Minimum	-9,5	°C	
Maximum	35,5	°C	
Durchschnitt Juli	19,9	°C	min 18°C
Durchschnitt Jahr	11,6	°C	Optimum 11-16°C
Sonnenscheindauer	2706	h.	Optimum 1700-2000 h
Niederschlag	471	mm	Optimum ca. 400 mm

Die WMO (2003) definiert Globalstrahlungen $> 120 \text{ W/m}^2$ als „Sonnenschein“. „Sonnenscheindauer“ sind somit die summierten Zeiträume, zu denen eine Globalstrahlung von mindestens 120 W/m^2 gemessen wurde.

Niederschlag und Verdunstung

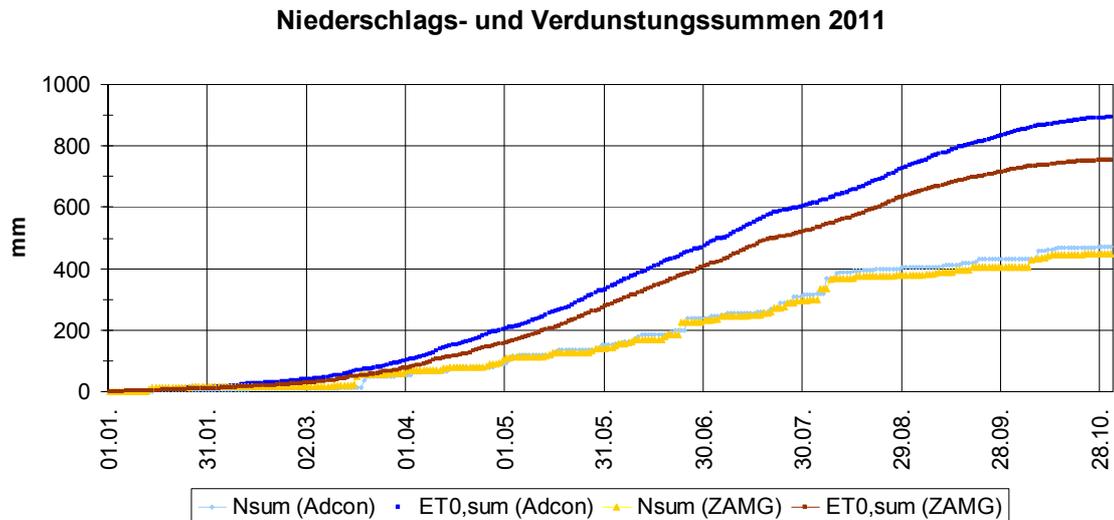


Abbildung 39: Niederschlags- und Verdunstungssumme 2011

Die Verdunstungssumme im Jahr 2011 lag zu jeder Zeit über der des Niederschlages. Somit war aufgrund der atmosphärischen Wasserbilanz Bewässerungsbedarf gegeben. Die gemessenen Niederschlagswerte der beiden Stationen sind nahezu gleich. Die Verdunstungsmengen unterscheiden sich signifikant (Adcon = 919,2 mm/ ZAMG = 773,5 mm). Es liegen keine Daten für nach dem 28.10 vor.

Nach Nolz und Cepuder (2011a) erklärt sich der Unterschied der Verdunstungssummen aus den unterschiedlichen Windgeschwindigkeiten. Die ZAMG-Station liegt im Ortsgebiet von Andau, die Adcon-Station im freien Feld. Zudem liegt letztere ca. 10 Meter höher.

Die Windgeschwindigkeitsmittelwerte der Tagesmittel des gesamten Jahres betrug für die Station der ZAMG 1,94 m/s, die für die Adcon-Station 2,59 m/s.

Bodenwasserstatus

Profilwassergehalt 01.04-31.10

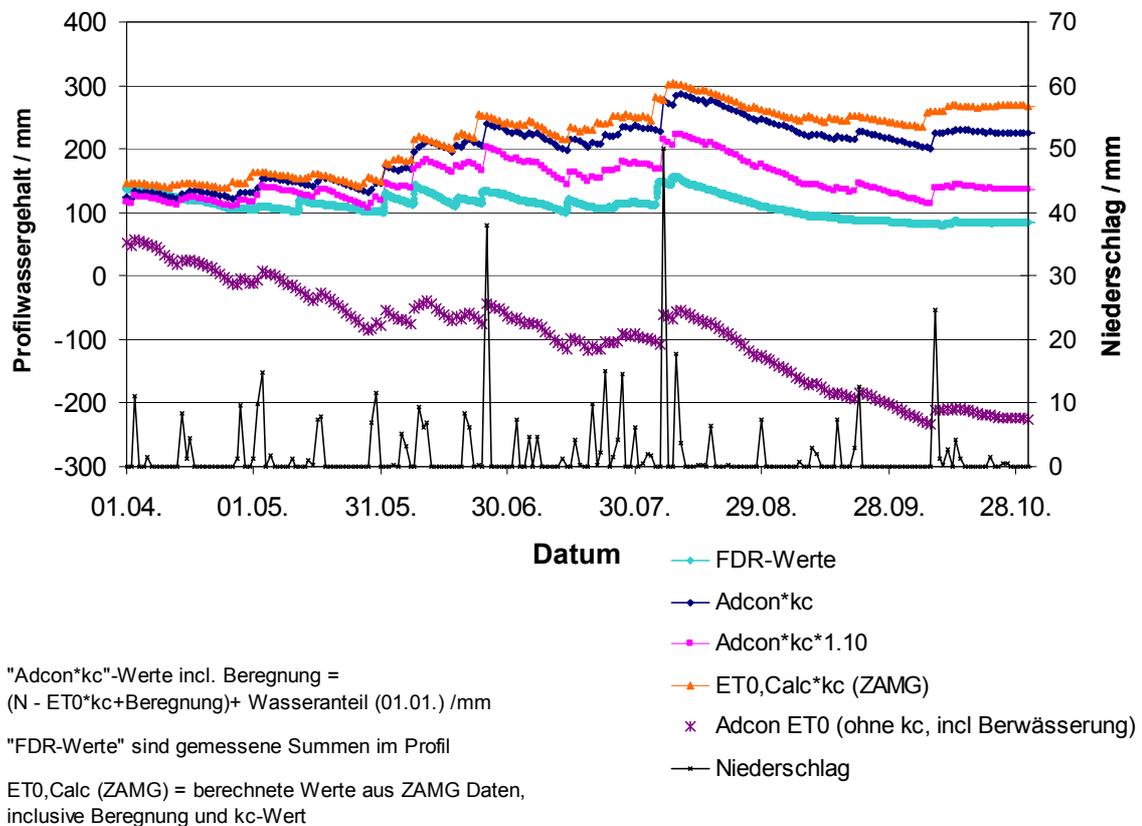


Abbildung 40: Bodenwasserstatus – gemessen und gerechnet

Im Allgemeinen stimmen die Relativänderungen des Wassergehaltes aus den unterschiedlichen Methoden (FDR (gemessen in den oberen 80 cm), Adcon-Berechnung, ET0 Calc) gut mit den Niederschlagsereignissen überein (Abbildung 40).

Abbildung 40 zeigt als violetten Verlauf den Bodenwasserstatus mit den Werten der Adcon-Station – ohne Korrektur durch den kc-Wert, potentielle Verdunstung berechnet – inklusive der Bewässerungsmengen. Die Relativänderung dieses Verlaufes während der Vegetationsperiode betrug gesamt 370 mm. Das absolute Defizit beträgt 250 mm. Die Differenz aus Niederschlag und potentieller Verdunstung lässt sich aus Abbildung 41 entnehmen. Diese entspricht der gesamten relativen Bodenwassermengenänderung, bei potentiellen Bedingungen, im gleichen Zeitraum.

Die am Feld, von der Adcon-Station, gemessenen Werte werden direkt am Adcon-Server bearbeitet und daraus vollautomatisch die Referenzverdunstung berechnet. Diese Verdunstungsdaten müssen nur mehr abgefragt werden. Aus den ZAMG Daten muss mittels eines Programms die Verdunstung berechnet werden. Dies geschieht mit dem EDV-Programm „ET0-Calculator“. Dieses Programm wurde in seiner aktuellen Version 2009 von der FAO veröffentlicht und ist als Freeware unter <http://www.fao.org/nr/water/eto.html> beziehbar.

Die Berechnung mit dem EDV-Programm ET0 Calculator (FAO, 2009) und den ZAMG-Werten liefert das ganze Jahr über einen zu hohen (potentiellen) Bodenwasserstatus. Die miteinbezogenen k_c Werte sind der Tabelle 17 entnehmbar. Sie wurden linear interpoliert (analog Abbildung 2). Die Bodenwasserstatusberechnung mit den ZAMG-Werten liefert für das Ende der Vegetationsperiode eine Bodenwassermenge von 268,0 mm, die Berechnung der Adcon-Station (mit dem Standard-Pflanzenkoeffizienten) einen Wert von 224,9 mm (Abbildung 40). Die FDR-Sensoren liefern am Ende der Vegetationsperiode eine Bodenwassermenge von 84,5 mm. Diese liegt damit um 183,5 mm niedriger als die der ZAMG-Werte und 140,4 mm unter der Bodenwassermenge der Adcon-Werte.

Nach Nolz und Cepuder (2011) kann der Unterschied der Verläufe aus „ET0 Calculator“ (mit den Wetterdaten der ZAMG Station in Andau) und den Adcon-Werten (aus dem Feld) aus den unterschiedlichen gemessenen Windgeschwindigkeiten (Feld/Ortschaft) erklärt werden, die in die Berechnung mit dem ET0-Calculator miteinfließen. Stärkerer Wind wirkt sich verdunstungsbegünstigend aus. Die ZAMG-Station maß eine mittlere Windgeschwindigkeit von 1,90 m/s, die Adcon-Station 2,59 m/s. Die ZAMG Station befindet sich im Ortsgebiet von Andau und ist so besser vor Windeinflüssen geschützt als die Feldstation. Des Weiteren liegt die ZAMG-Station topographisch relativ um 10 Meter niedriger als die Feldstation.

Tabelle 17: k_c -Werte für unterschiedliche Entwicklungsstadien

Pflanzenkoeffizient nach FAO 56				
Stadium	init	Dev	mid	end
k_c	0.30	0.30-0.70	0.70	0.45
Dauer / Tage	30	60	40	80

Um den realen Bedingungen besser entgegenzukommen, können die k_c -Werte modifiziert werden. Allgemein wird die Bodenwassermenge durch die Berechnung unterschätzt. Es besteht die Gefahr, dass ein etwaiger Bewässerungsbedarf – im betrachteten Fall über einen längeren Zeitraum hinweg – durch die rein rechnerische Ermittlung nicht erkannt wird. Wird der k_c -Wert um 10% erhöht, nähern sich die berechneten (potentiellen) Werte den Beobachteten (aktuellen) besser an. Der theoretische k_c -Wert gilt für einen flächigen Bewuchs und adulte Pflanzen. Die Abweichungen könnten durch den starken Beikrautbewuchs und die großen Wuchsrhythmenabstände der Reben erklärt werden.

Die FDR Sensoren erfassten neben der aktuellen Verdunstung (im Gegensatz zu den potentiellen Werten der Berechnungsmodelle) und den Niederschlägen auch die Bewässerungen. Bewässerungstermine waren:

Tabelle 18: Bewässerungstermine

Bewässerungstermine	
Datum	Höhe / mm
31.05	30,4
07.06	31,1
17.06	13,1
14.07	22,2
Summe	96,8

Diese Mengen lassen sich aus dem FDR-Verlauf sehr gut erkennen (Pfeile in Abbildung 40).

Die FDR-Sensoren zeigten im Beobachtungszeitraum (1.4 – 30.10) eine kumulierte Wasserzufuhr von insgesamt 250,1 mm an. Die gemessene Niederschlagssumme der Adcon Station betrug 417,2 mm (Abbildung 41). Diese ergibt mit den Bewässerungsmengen von 96,8 mm eine Wasserzufuhr von insgesamt 514,0 mm. Das bedeutet, dass gut die Hälfte (250,1 mm) des gesamt zugeführten Wassers (514,0 mm) nicht von den Sensoren erfasst werden konnte, oder nicht zu den Sensoren gelangt ist (Evaporation, Interzeption). Die nicht erfasste Menge Wasser geht jedoch direkt in die berechneten Bodewasserbilanzen mit ein.

Die ZAMG-Station maß eine um 27,3 mm höhere Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode, im Vergleich zur Adcon-Station. Verbunden mit der niedrigeren ermittelten Verdunstung um 114,0 mm ergibt sich eine Abweichung von 141,3 mm. In Verbindung mit dem k_c -Wert ergibt sich noch eine Differenz von 44,3 mm.

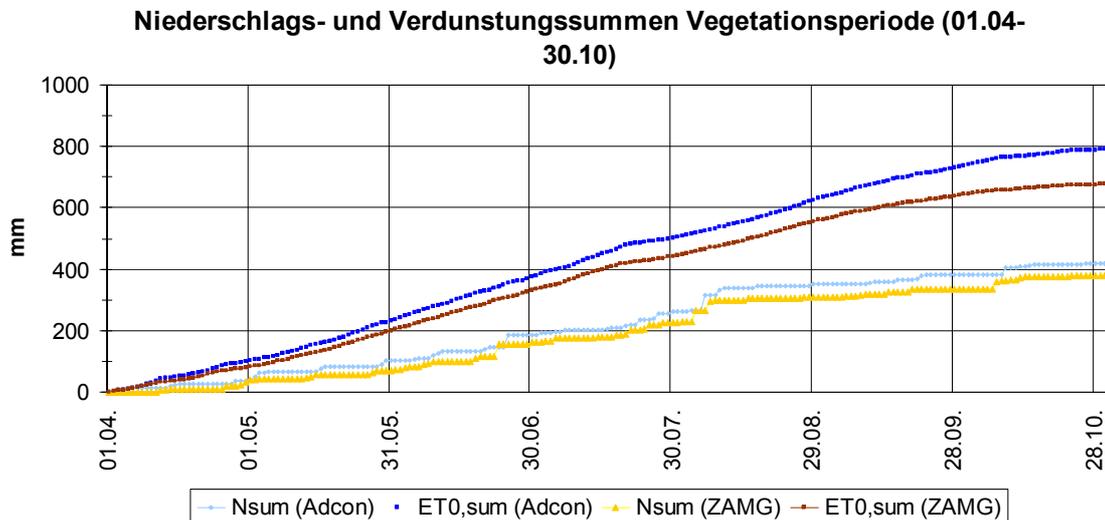


Abbildung 41: Niederschlags- und Verdunstungssumme in der Vegetationsperiode 2011

Tabelle 19: Bodenwasserbilanzvergleich

Bodenwasserstatusvergleich			
	Feld	Adcon	ZAMG
Σ ET0	-	-793,9	-679,1
Σ ET0 incl. k_c	-	-413,1	-356,7
Σ ETa	-303,1	-	-
Σ Niederschlag	*250,1	417,2	389,9
Σ Bewässerung	-	96,8	96,8
Profilwassergehalt (01.04)	137,4	123,1	147,4
Profilwassergehalt (31.10)	84,5	224,9	268,0

Die aufgezeichnete Summe der Wasserzufuhr der FDR Werte beinhaltet Niederschlag und Bewässerung, die Summe der Adcon und der ZAMG Stationen beinhaltet nur den Niederschlag. Die Bewässerung wird gesondert addiert (Tabelle 19).

Gründe für die Abweichung der Bodenwassermessung von der –Berechnung:

Die FDR-Sonden messen nur bis in eine Tiefe von 80 cm. Da auch die tieferen Schichten zur Transpirationsleistung der Pflanze beitragen, bzw. von ihr beeinflusst sind, kann angenommen werden, dass aus dem Bodenkörper mehr verdunstet als mit den FDRs gemessen werden kann. Es befinden sich keine Watermarks in tieferen Schichten. So kann nicht festgestellt werden, wie viel Wasser aus dem Wurzelraum versickert.

Die FDRs messen aktuelle Bedingungen, die Berechnungsmethoden arbeiten mit der potentiellen Verdunstung. Diese ist immer größer als die aktuelle. Wird der k_c Faktor modifiziert, nähern sich die berechneten Verläufe den Aktuellen an.

Die **2 ausschlaggebenden Parameter für Bodenwasserstatusrechnung** sind, neben den Klimadaten, der **k_c -Wert** (er dreht die Bilanz um den Ausgangswert und verzerrt den Verlauf nach unten) und das **zugeführte Wasser** (positive Ausschläge auf der Ordinate). Er ist schwierig zu eruieren, nimmt aber schwerwiegenden Einfluss auf die Bilanz. Werden die potentiellen Verdunstungsraten (ET_0) mit dem k_c -Faktor multipliziert, so ergeben sich auf die jeweilige Art bezogene, potentielle Verdunstungsraten. Die FDR Sensoren ermitteln jedoch aktuelle Feldbedingungen. Die Bewässerungsmengen werden von der Berechnung voll erfasst, von den FDR-Sensoren aber nur teilweise. Das Bewässerungswasser kann verdunsten, oder sich zur Seite hin bewegen, bevor es die Sensoren erreicht, oder es versickert.

Ein weiterer Kritikpunkt betrifft die Verlegetiefe der UTB, bzw. die Messtiefe der Sensoren. Die beiden obersten Sensoren messen oberhalb des Niveaus, auf dem die Tropfschläuche liegen. Somit ist es möglich, dass trotz Bewässerung keine Wasseranteilszunahme von den Sensoren wahrgenommen wird. Hierbei wird der Mittelwert des Wasseranteilverlaufes über die Tiefe verfälscht.

Eine FDR-Messung zur Bodenwasserstatusermittlung und zur Bodenwasserbilanzierung ist im untersuchten Fall notwendig.

Wasseranteilsverlauf 2011

Notiz: Wasseranteil besitzt eigentlich die Einheit Volumen/Volumen. Dies entspricht einer prozentuellen Angabe. Da die Messdistanzen zwischen den FDR Sensoren 10 cm betragen, lässt sich der Anteil als Wassersäulenhöhe in mm angeben (1% entspricht 1 mm)

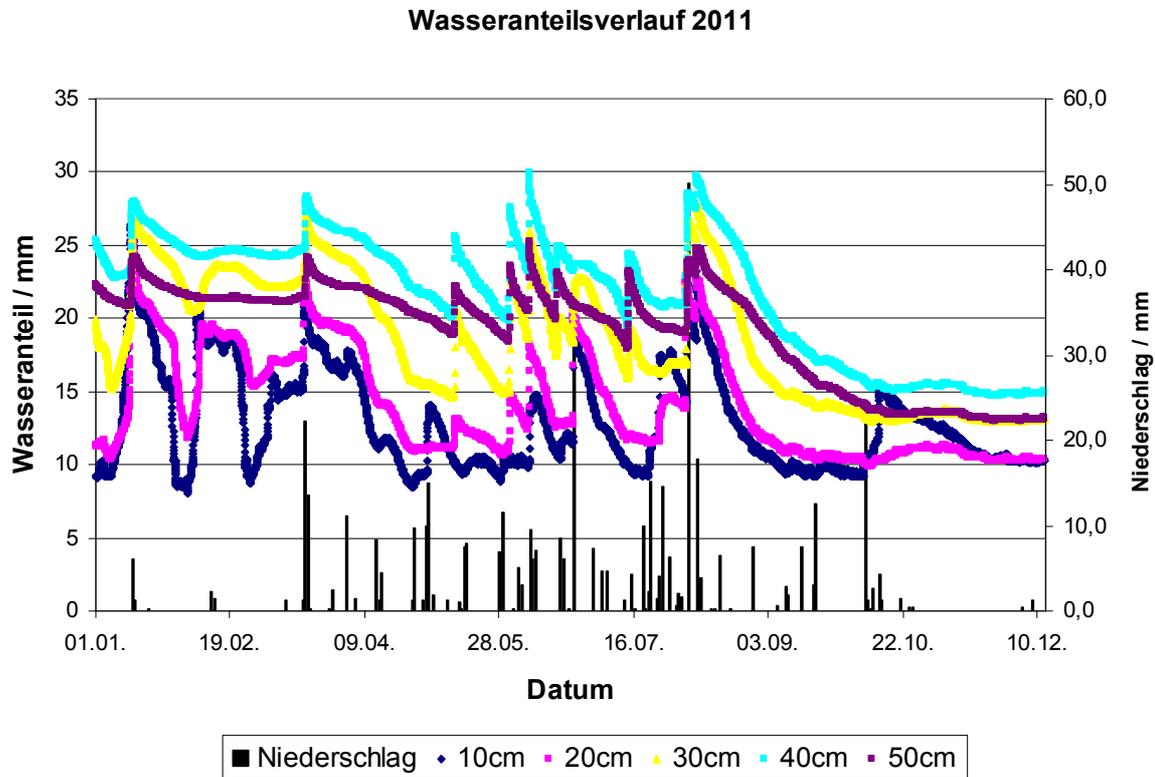


Abbildung 42: Wasseranteilsverlauf in 5 Tiefen, 2011

Die oberen Bodenschichten waren stärkeren Schwankungen unterworfen, als die Unteren. Verantwortlich dafür waren die höhere Versickerungsrate, die Evaporation und die Interzeption. In 40 cm Tiefe herrschte durchwegs ein höherer Wasseranteil als in 50 cm, vor. Der Wasseranteilsverlauf in 30 cm Tiefe war dem in 50 cm Tiefe ähnlicher als dem in 40 cm. Dies lässt darauf schließen dass im Bereich von 30 cm Tiefe ein höherer Porenanteil und Wasserdurchlässigkeit vorlag (Abbildung 42). Der Durchlässigkeitsversuch zur hydraulischen Leitfähigkeit (Abbildung 32) bestätigte die Annahme.

Der Großteil der Wasserbewegung fand in den obersten 30 cm statt. Die Pflanze zog zuerst aus diesen Nährstoffe und Wasser (größter Wasseranteil = geringstes Matrixpotential = geringster Arbeitsaufwand). Würde der Arbeitsaufwand, um aus diesen Schichten Wasser zu ziehen, größer als für tiefere Schichten, so

bediente sich die Pflanze aus diesen. Die oberen FDR-Sensoren sind somit, trotz des tiefreichenden Wurzelsystems der Rebe, zur direkten Bewässerungssteuerung auch für RDI geeignet. Die Richtung der Wasserbewegung kann ohne Matrixpotentialsensoren nicht abgeschätzt werden.

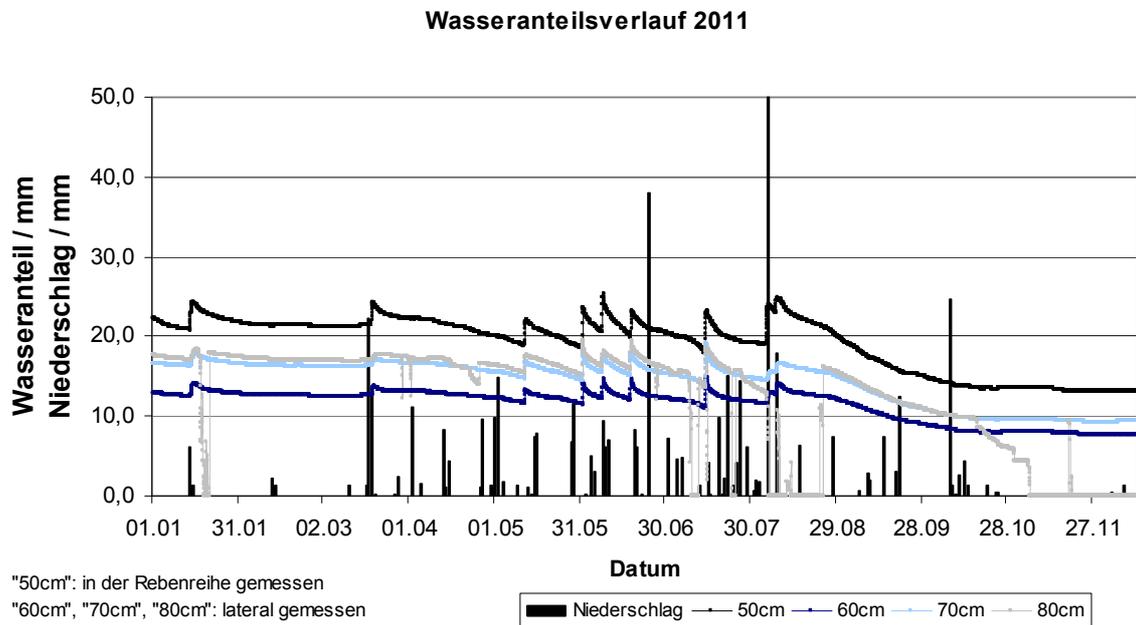


Abbildung 43: Wasseranteilsverlauf 50-80 cm

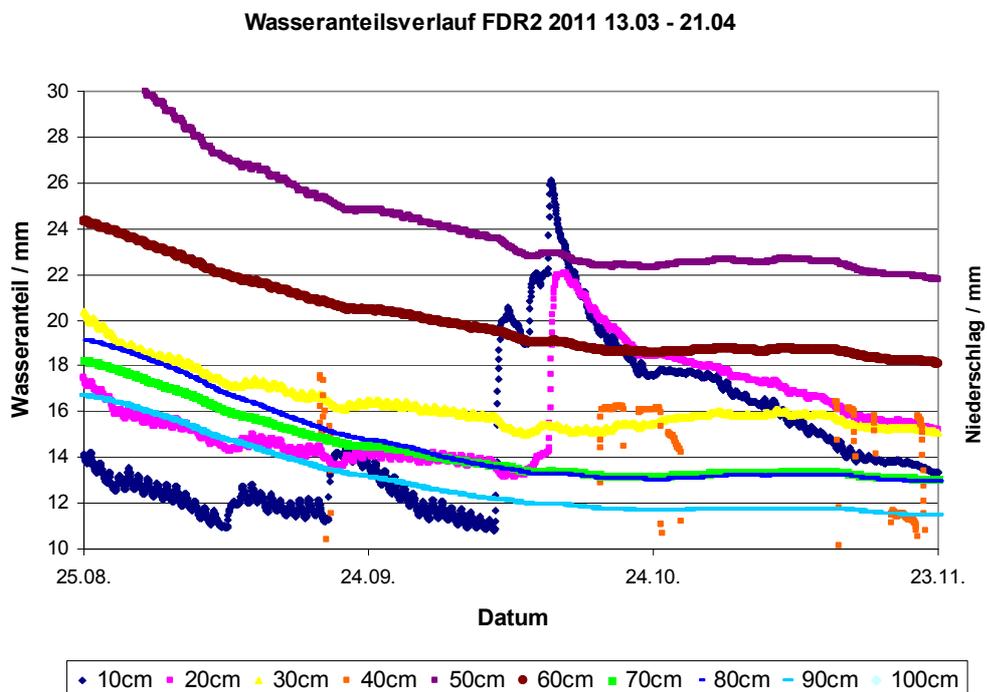


Abbildung 44: Wasseranteilsverlauf FDR2 2011 13.03 – 21.04

Bereits juvenile Reben können Bodenwasser aus mehr als einem Meter Tiefe nutzen (Nolz & Cepuder, 2011). Die Bodenwasserbewegungen in Schichten unter 80 cm können mit der aktuellen Messausstattung direkt in der Rebenreihe nicht beobachtet werden. Die zusätzliche Enviroscan-Sonde (Tiefe bis 100 cm unter GOK) zeigte auch in tieferen Schichten Wasserentzug (Abbildung 43 und Abbildung 44). In dieser Tiefe herrschte sandiges Material vor. Dieses ist leicht entwässerbar. Eine Erweiterung der FDR-Sonden bis auf eine Tiefe von wenigstens 1,0 Meter ist anzuraten um etwaig versickerndes Wasser erfassen zu können. Ideal wären zusätzliche Matrixpotentialsensoren in diesen Tiefen. Sensoren sollten eigentlich immer bis zum unteren Ende der Wurzelzone reichen.

Matrixpotentialverlauf

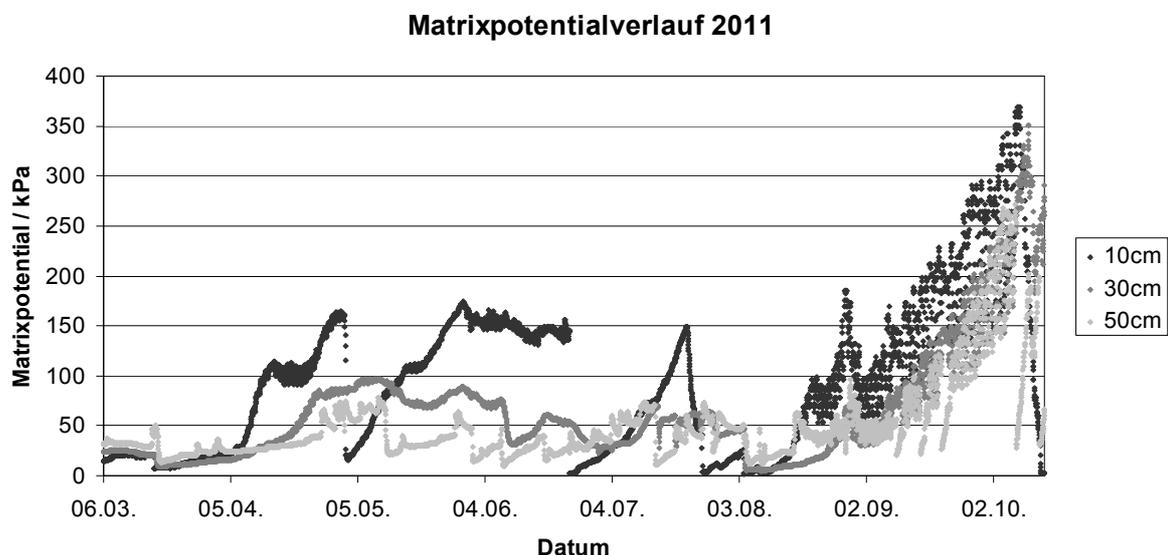


Abbildung 45: Matrixpotentialverlauf 2011

Beginnend am 07.04 stieg das Matrixpotential in den ersten 10 cm stark an und hielt dieses Niveau bis am 02.05. Dies war der Zeitraum um Ostern zu dem im Jahr 2011 für die Jahreszeit sehr hohe Temperaturen herrschten. Der Anstieg des Matrixpotentials in 10 cm Tiefe war analog des Absinkens der Wasseranteilmessungen. Am 13.04 sank der Wasseranteil in 30 cm unter den in 50 cm. Auch das lässt sich aus den Watermarksensoren ablesen.

Generell herrschte in den oberen Bodenschichten höheres Matrixpotential (eigentlich negativeres) als in tieferen Schichten. Ausnahmen waren Zeitpunkte mit starkem

Niederschlag [23.06 (38,0 mm), 21.07 (15,1 mm), und 25.07 (14,5 mm), sowie 04.08 (50.1 mm)]. Diese sind anhand des „10 cm“-Verlaufes gut identifizierbar. Den extremen Ausschlägen des oberen Sensors nach oben und unten folgten die tieferen Sensoren nicht oder nur bedingt. Es stellt sich die Frage, ob der oberste Sensor durch die wetterbedingte Dynamik (Niederschlag, Temperatur, Verdunstung) den Mittelwert für die Bewässerungssteuerung negativ beeinflusst.

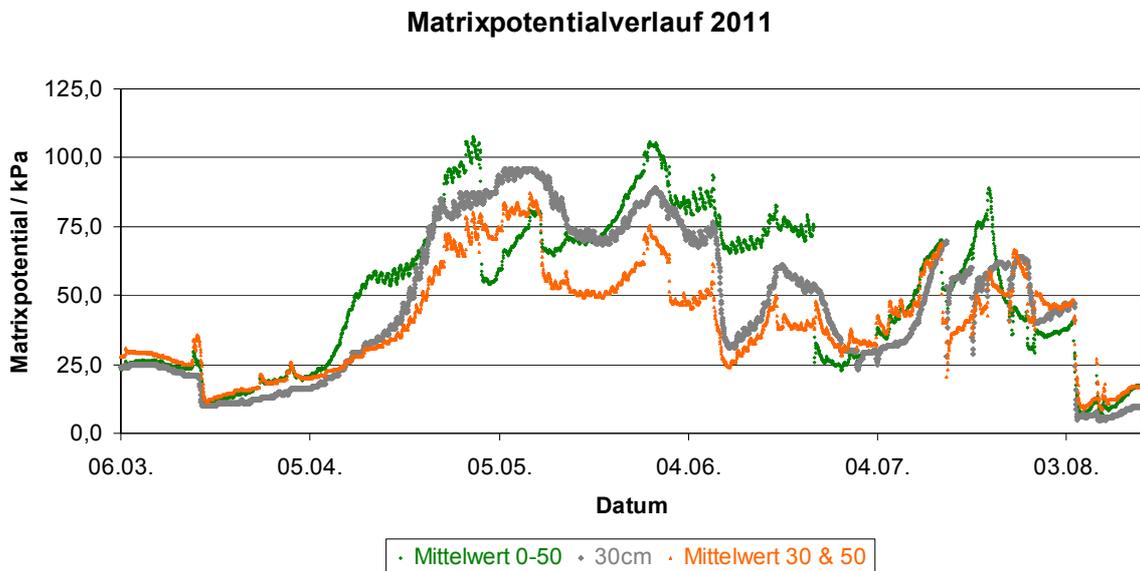


Abbildung 46: Matrixpotentialverläufe 2011 (Mittelwert 0-50cm / 30cm / Mittelwert 30&50)

Man könnte annehmen, dass der mittlere Matrixpotentialensensor (in diesem Fall „30 cm“) auch das mittlere Matrixpotential über das Profil (0-50) anzeigt. Die Verläufe der Matrixpotentiale des „30 cm“ Sensors und Mittelwerts zeigen ähnliche Verläufe (Abbildung 46), weichen aber im Betrag teilweise stark ab. Würde nur dieser Sensor verwendet werden, würden Stresslevels falsch eingeschätzt werden. Es könnten zwar wetterbedingte Ausreißer eliminiert, gleichzeitig aber die Wasserbewegung in höhere Schichten nicht bestimmt werden. Wenn sich ober- und unterhalb des Sensors kaum Wasser befände, würde die Pflanze unter Trockenstress leiden, der nicht messbar ist. Ein weiterer Kritikpunkt hierbei ist, dass der „10 cm“-Sensor das Matrixpotential oberhalb des Bewässerungshorizontes bestimmt. Er kann die Bewässerungsereignisse nicht erfassen und lässt den Stresslevel, unter dem die Pflanze leidet, höher erscheinen, als es eigentlich ist. Für die Bestimmung des Gradienten ist der Sensor unumgänglich.

Eine Verwendung von Matrixpotentialsensoren in mehreren Tiefen ist zwar notwendig, von der Verwendung des obersten Sensors zur Matrixpotentialmittelwertbestimmung ist allerdings abzuraten. Das Mittel aus den Werten der 30 & 50 cm Sonde scheint für die Ermittlung der Stressgrenzen geeigneter zu sein. Es bildet die Situation im Profil 0-80 cm besser ab als ein Einzelwert oder der ausreißerbehaftete Mittelwert der ganzen Profilhöhe.

Das Bodenprofil wies in tieferen Schichten sandiges, leicht zu entwässerndes Material auf. Mit der derzeitigen Matrixpotentialsensorausstattung konnte ein Versickern des Porenwassers in Schichten tiefer als 50 cm nicht erfasst werden. Ein zusätzlicher Sensor in etwa einem Meter Tiefe, oder tiefer, ist empfehlenswert, um die Bodenwasserbewegung in oder aus dieser Tiefe (Gradient) ermitteln zu können.

Der Versuchsaufbau wies nicht jedem FDR-Sensor (8 / 0-80) einen Watermark-Sensor (3 / 0-50) zu. Die Bewässerungsgrenzen waren auf eine Tiefe von 70 cm bezogen. Dies entsprach nicht den Tiefen der Watermarks. Jeder Watermark bildete den Mittelwert aus den 10 cm, die ober- und unterhalb seiner Einbautiefe liegen. Der unterste Watermark umfasste so die Tiefen 40-60 cm. Matrixpotentialwerte schwankten in tieferen Schichten weniger stark, weil der Wassergehalt näher beim gesättigten Bereich lag. Die Retentionsfunktion ist im gesättigten Bereich quasi-linear. Der Fehler der durch die auf 70 cm Tiefe bezogenen Grenzwerte und die auf 60 cm gemessenen Matrixpotentiale begangen wird, kann als gering und vernachlässigbar angesehen werden.

Aus diesen Beobachtungen kann geschlossen werden dass...

...der Sensor in 10 cm Tiefe den Matrixpotentialmittelwert durch seine wetterbedingte Dynamik (Ausreißer) stark beeinflusst.

...die alleinige Steuerung nach einem einzelnen Watermark-Messwert (in diesem Fall „30 cm“) Stresslevels ungenau einschätzt.

...durch die aktuelle Sondenanordnung keine Aussage über tiefere Schichten getroffen werden kann, somit das aus dem Wurzelraum entweichende Porenwasser nicht erfasst wird.

Somit wären eine Steuerung nach dem Mittelwert der tieferen Matrixpotentialsensoren (30 & 50 cm) und die Einbringung eines Sensors in tieferen Schichten besser zur Bewässerungssteuerung geeignet als das derzeitige Verfahren.

Im Boden wird sich zwischen Bodenmatrix und Watermark gleiches Matrixpotential einstellen. Im Watermark und im Boden herrschen bei gleichem Matrixpotential aber unterschiedliche Wasseranteile vor, da die Medien unterschiedliche „Kornzusammensetzungen“ und Porenzusammensetzungen aufweisen. Um vom Matrixpotential des Bodens (der dem des Sensors entspricht) auf dessen Wasseranteil schließen zu können muss die RTF des Bodens bekannt sein.

Bisher wurde die PTF nach Baumer (1989) zur Bestimmung der Bewässerungsgrenzen verwendet. Sie gibt die Wassergehalte (PWP, FK, obere und untere Grenze) als Wasseranteil in Prozent des Porenvolumens aus. Diese Prozentwerte können in eine Wassermenge (cmWS) umgerechnet werden. Die in Kapitel 5.2 ermittelten Grenzen sind ebenfalls nur als Wassersäulenhöhe in Zentimetern angegeben. Über den gemessenen Wasseranteil im Boden kann die Steuerung mittels FDR Sensoren einfach durchgeführt werden.

Die Bewässerung kann, wenn die Bewässerungsgrenzen als Wassersäulenhöhe vorliegen, vorrangig nach dem Wasseranteil gesteuert werden. Da für den Stresslevel, dem die Pflanze unterliegt, aber in erster Linie das vorherrschende Matrixpotential verantwortlich ist, darf auf eine Matrixpotentialmessung nicht verzichtet werden. Einzusetzen wäre somit eine Steuerung über den Wasseranteil mit zusätzlicher Mitbeziehung des Matrixpotentials.

Vergleich Matrixpotential-/Wasseranteilsverlauf

Die Werte der beiden Messreihen sollten sich durch die Veränderung des Bodenwassergehaltes gegengleich verhalten (bei Zunahme des Wasseranteils im Boden wird der Betrag des Matrixpotentials geringer (positiver)). Eine Gegenüberstellung der Jahresverläufe 2010 und 2011 zeigen Abbildung 47 und Abbildung 48.

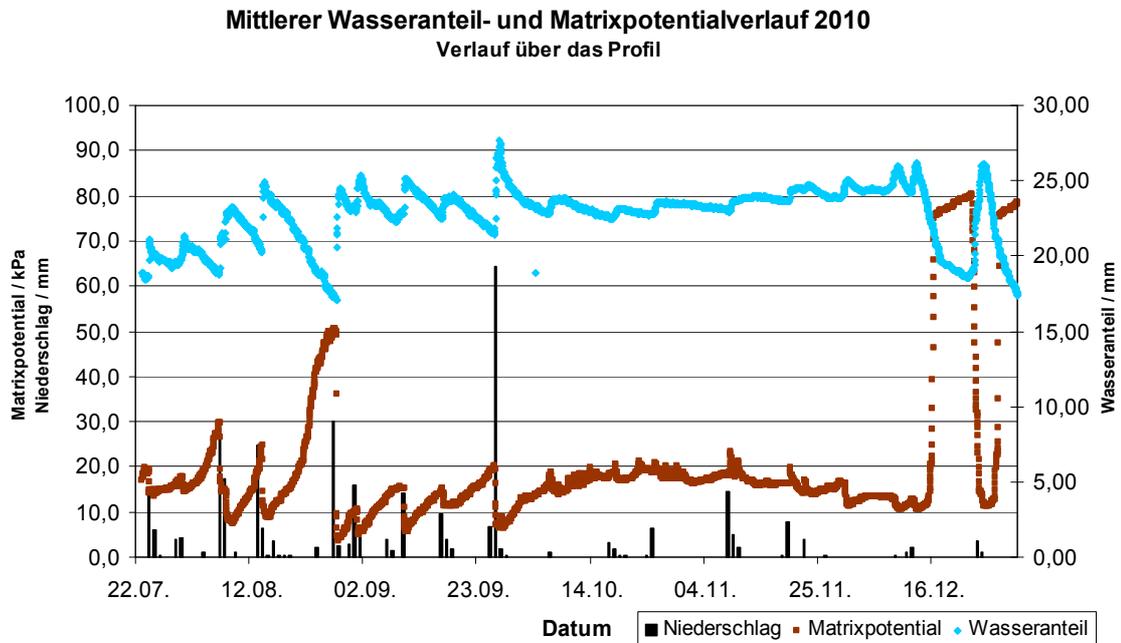


Abbildung 47: Vergleich Matrixpotential/Wasseranteil 2010, Mittelwert über das Profil (0 - 50 cm)

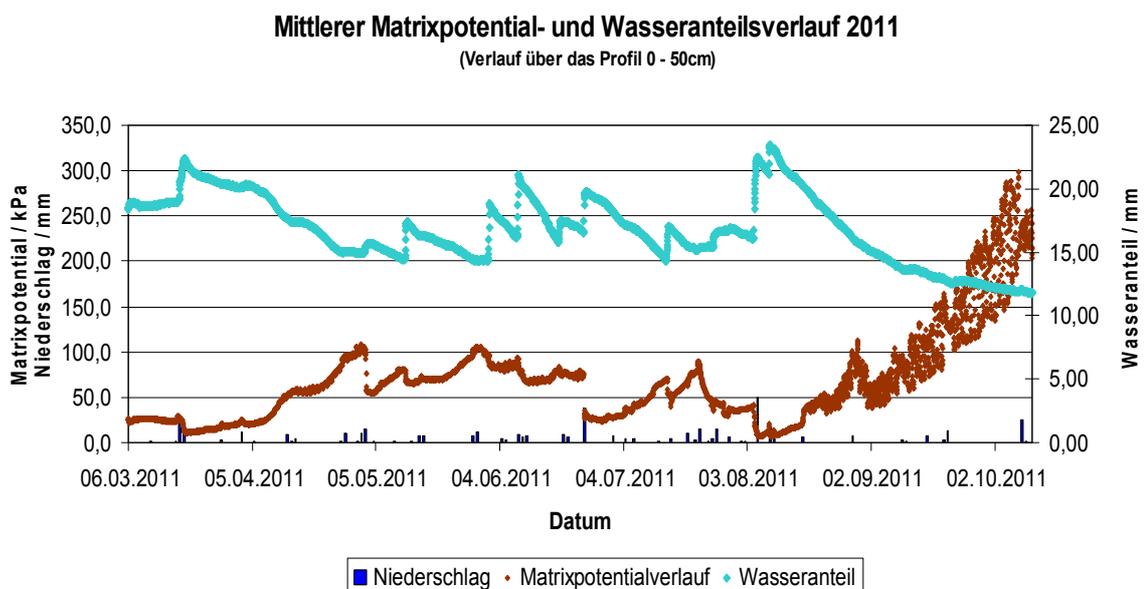


Abbildung 48: Vergleich Matrixpotential/Wasseranteil 2011, Mittelwert über das Profil (0 - 50 cm)

Die Verläufe (2011 und 2010) der oberen 50 cm stimmen im Allgemeinen gut überein (Abbildung 47 & Abbildung 48). Die relativen Änderungen der Werte entsprachen nicht immer derselben Größenordnung. Gründe könnten der Hysteresiseffekt oder ungleichmäßige Wasserverteilung sein.

Die Watermarksensoren sprachen konstruktionsbedingt (wegen des granularen Materials aus dem sie bestehen) verzögert auf die Änderung des Bodenwassergehalts an (Abbildung 49 und Tabelle 20 sowie Abbildung 50 und Tabelle 21). Watermarks benötigten im Allgemeinen länger, um sich auf einen stabilen Endwert einzustellen.

Weder das Mittel des Wasseranteils, noch das des Matrixpotentials (trotz der stark klimabedingten Beeinflussung des jeweiligen Sensors in 10 cm Tiefe) reagierte auf jedes Niederschlagsereignis (Abbildung 49 und Abbildung 50). So waren Veränderungen im Wasserhaushalt nicht immer aus beiden Sensorwerten gleich ersichtlich. Sie waren jedoch allein anhand der Daten der Watermarksensoren schwieriger abzuschätzen, als aus den FDR Daten. Mit FDR-Sensoren alleine konnten die Bodenwasserhaushaltsveränderungen nicht sicher erkannt werden (Tabelle 20 & Tabelle 21). Mit den Matrixpotentialsensoren kann die Wasserbewegung abgeschätzt werden. Die Frage, ob Wasser versickert wäre für die bedarfsgerechte Bewässerungssteuerung ein wichtiger Aspekt.

Das Zusammenspiel aus gemessenem Wasseranteil und Matrixpotential ist somit für eine bedarfsorientierte Bewässerungssteuerung unerlässlich.

Gegenüberstellung θ/ψ – Verlauf ausgewählter Zeiträume

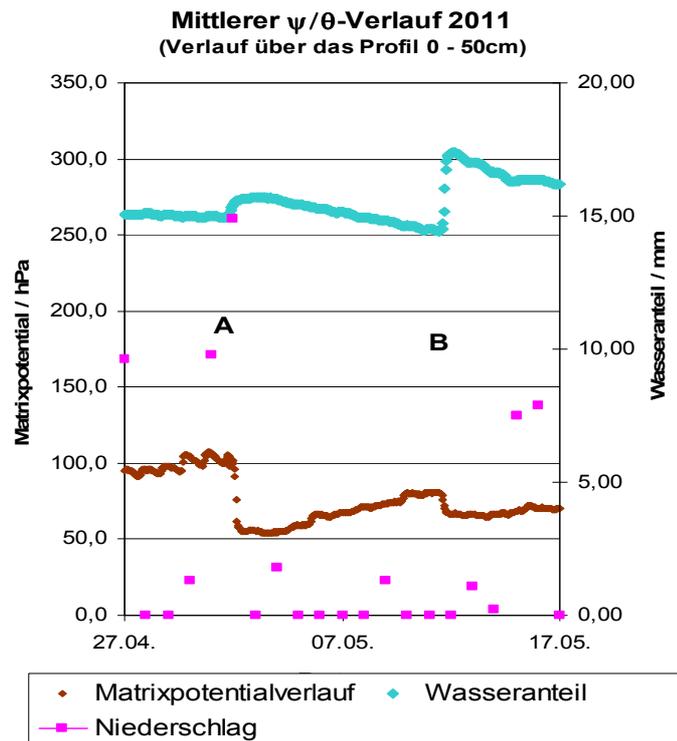


Abbildung 49: $\theta/\psi/N$ - Ende April – Mitte Mai

Tabelle 20: θ/ψ -Veränderungen Ende April – Mitte Mai

	Datum/Uhrzeit (Wert1)	Datum/Uhrzeit (Wert2)	Reaktionszeit	Wert1	Wert2
A	θ	01.05. 18:00	02.05. 04:00	15,0	15,6
	ψ	01.05. 22:00	02.05. 09:00	102,7	55,6
B	θ	11.05. 13:00	11.05. 23:00	14,5	17,3
	ψ	11.05. 10:00	11.05. 22:00	80,7	66,8

Der FDR-Ausschlag bei Punkt A (Wert 2) war so gering, dass keine eindeutige Wasseranteilszunahme erkannt werden konnte. Das Matrixpotential verdoppelte sich beinahe.

Mittlerer Matrixpotential- und Wasseranteilsverlauf 2011
(Verlauf über das Profil 0 - 50cm)

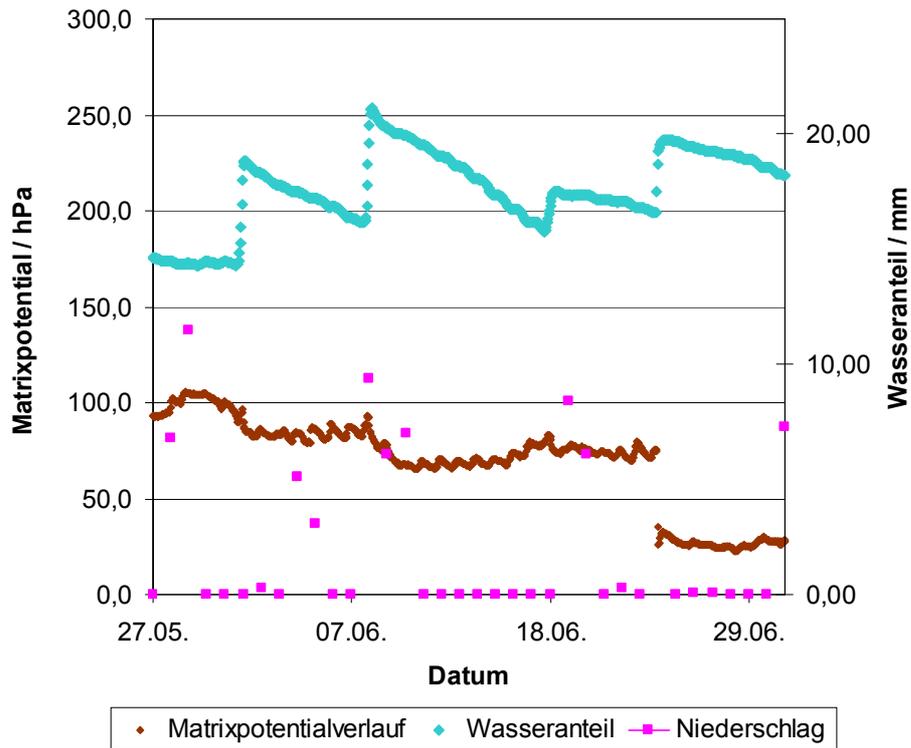


Abbildung 50: $\theta/\psi/N$ - Ende Mai – Ende Juni

Tabelle 21: θ/ψ -Veränderungen Ende Mai – Ende Juni

	Datum/Uhrzeit (Wert1)	Datum/Uhrzeit (Wert2)	Reaktionszeit	Wert1	Wert2	
A	θ	31.05. 17:00	01.06. 02:00	00d 09h	14,4	18,8
	ψ	31.05. 14:00	01.06. 19:00	01d 05h	95,2	82,7
B	θ	07.06. 20:00	08.06. 03:00	00d 07h	16,8	21,2
	ψ	07.06. 21:00	08.06. 12:00	00d 15h	93,7	76,3
C	θ	17.06. 16:00	18.06. 06:00	00d 14h	15,8	17,5
	ψ	17.06. 22:00	18.06. 15:00	00d 17h	82,9	73,4
D	θ	23.06. 21:00	24.06. 08:00	00d 11h	16,6	19,7
	ψ	23.06. 22:00	23.06. 23:00	00d 01h	75,0	35,0

6. Schlussfolgerung/Zusammenfassung

1. Ist die derzeitige Sensorausstattung und -anordnung geeignet um eine bedarfsorientierte Steuerung der UTB umzusetzen?

Die aktuelle Sensorausstattung umfasst FDR-Sensoren bis in eine Tiefe von bis zu einem Meter und Watermarksensoren bis in eine Tiefe von 50 cm. Beobachtet wurden rebbeflusste Veränderungen im Bodenwasseranteil bis in eine Tiefe von einem Meter. Sowohl Watermark-, als auch FDR-Verläufe waren nicht immer nachvollziehbar. So konnten nicht erklärbare Ausreißer des Wasseranteils und des Matrixpotentials nach oben und unten beobachtet werden. Auch traten Unterbrechungen in der Datenaufzeichnung auf.

Durch die aktuelle Sensoranordnung kann eine Wassergehaltsänderung mit den FDRs, bis in eine Tiefe von einem Meter erfassen werden, mit den Watermarks eine Potentialänderung bis 50 cm. Die obersten Sensoren (FDR und WM) liegen oberhalb des Bewässerungshorizontes (Tiefe auf 25 – 30 cm). Sie zeigen Trockenheit an, obwohl bewässert wurde (wenn kein kapillarer Aufstieg erfolgt).

Dies alles macht eine bedarfsorientierte Steuerung der Bewässerung mit einer UTB aktuell schwierig umsetzbar. Mit einigen Adaptionen, ist eine bedarfsgerechte Steuerung in verbessertem Ausmaß realisierbar.

2. Können mit der gewählten Sensorausstattung und -anordnung moderne Bewässerungskonzepte (etwa RDI) umgesetzt werden?

Die obersten FDR-Sensoren (10 cm) lagen sehr nah an der Oberfläche. Sie waren somit stärker Temperatureinflüssen ausgesetzt, als tiefer liegende Sensoren. Sensoren in den obersten 20-60 cm des Bodenprofils lagen ausreichend nah an der Oberfläche, um Niederschlag erfassen zu können. Geringe Niederschläge (bis ca. 2 mm) konnten jedoch nicht erfasst werden. Die Verdunstungsberechnung aus den Klimadaten lieferte stark, von den gemessenen Werten, abweichende Ergebnisse.

Um den Bodenwasserstatus zu erfassen empfiehlt es sich die FDR-Messung aus dem Feld heranzuziehen. Berechnete Werte wichen zu stark von der

Messung ab. Ausschlaggebend hierfür war, dass die Berechnungen potentielle Bedingungen wiedergeben, die Messungen aber aktuelle. Niederschlags- und Bewässerungsereignisse gehen zu 100 % in die Berechnung mit ein, werden jedoch nicht im selben Ausmaß von den FDRs erfasst. Die berechneten Verdunstungsraten sind ebenfalls potentiell. Der Pflanzenkoeffizient k_c steuert die Verdunstungsraten maßgebend.

Die aktuelle Anordnung der Watermarksensoren ließ keine Schlüsse über die Wasserbewegung in Tiefen von mehr als 50 cm zu. Somit war weder versickerndes, noch aufsteigendes Wasser bestimmbar.

Durch die aktuellen Methoden zur Erfassung des Bodenwasserstatus und des verfügbaren Wassers im Profil, sowie des Ermittlungsverfahrens der Bewässerungsgrenzen ist die Anwendung des RDI Konzeptes mit Unsicherheiten behaftet. Eine verbesserte Bewässerungssteuerung und Bewässerungsgrenzenermittlung würde die RDI einfacher anwendbar machen.

Stresslevels

Die bisher verwendeten Bewässerungsgrenzen wurden mittels Pedotransferfunktion nach Baumer (1989) ermittelt. Diese Berechnung enthielt nur eine, über das gesamte Bodenprofil, gemittelte Korngrößenverteilung. Außerdem vernachlässigte sie die Berechnung den Humusgehaltes im Boden. Die Trockendichte wurde geschätzt. Die Grenzen sind für eine grobe Bewässerungssteuerung ausreichend genau, entsprachen in etwa den ermittelten Stressgrenzen aus dem Drucktopfversuch. Die Entnahme mehrerer Proben in unterschiedlichen Tiefen und die Miteinbeziehung des Humusanteils führten zu genaueren Ergebnissen. Diese lagen sehr nahe an den gemessenen Laborwerten. Die Ermittlung der Stressgrenzen mittels Literaturwerten konnte nicht überzeugen. Die Ergebnisse von Rosetta waren bei höherem Arbeitsaufwand und größerer Datengrundlage ungenauer als die Ergebnisse der PTF nach Baumer (1989). Die Methode nach Baumer (1986) ist bei sehr kleiner verfügbarer Datenmenge aus wirtschaftlich, praktischer Sicht den anderen untersuchten Methoden vorzuziehen. Je mehr Eingangsdaten zur Verfügung stehen, desto genauer ist das Ergebnis. Dies gilt sowohl für Baumer (Kornverteilung, Humusgehalt, Compaction-Faktor), als auch

für Rosetta (3 unterschiedliche Berechnungsmethoden). Aus wissenschaftlicher Sicht, ist die Labor-RTF vorzuziehen, da sie direkt aus dem zu untersuchenden Material gewonnen wird.

Die Umsetzung des RDI Konzeptes ist mit den aktuellen Stressgrenzen möglich, jedoch nicht optimal umgesetzt.

3. Wie könnte die Sensorausstattung und -anordnung aus wissenschaftlicher Sicht optimiert werden?

Es sollte weder auf FDR-, noch auf Watermark-Sensoren verzichtet werden. Die Bodenwasserbilanzierung mittels FDR-Sensoren und Klimadatenaufzeichnung direkt im Feld ist unerlässlich. Die berechneten Wasserbilanzen ergaben eine zu geringe Verdunstung, dies lag vor allem an den gewählten k_c Faktoren. Damit ergab sich ein zu hoher Wasseranteil im Boden, und der vorherrschende Stress den die Pflanzen erleiden wurde unterschätzt.

Da für den Stresslevel, dem die Pflanze unterliegt, aber in erster Linie das vorherrschende Matrixpotential verantwortlich ist, kann auf eine Matrixpotentialmessung auch aus praktischer Sicht nicht verzichtet werden. Vorteilhaft wäre somit eine Steuerung über den Wasseranteil mit zusätzlicher Miteinbeziehung des Matrixpotentials.

FDR Sensoren reagierten im Allgemeinen schneller als Watermarks und stellten sich rascher auf einen stabilen Endwert ein. Die Trägheit der Sensoren und die Möglichkeit, dass Niederschlag durch Nichtreagieren von einem der beiden Sensortypen nicht erfasst wurde, wird durch den Einsatz beider Sensorenarten kompensiert. Mit Watermarks soll bestimmt werden, ob Wasser aus den oberen Schichten in tiefere sickert.

Sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht ist eine Erweiterung der Sensoren bis in eine Tiefe von einem Meter anzuraten. Schon die junge Rebe beeinflusst den Bodenwassergehalt in Schichten tiefer als 1 Meter. Ein Watermark in dieser Tiefe ist zur Ermittlung des Gradienten (Wasserbewegung) notwendig.

4. Wie könnte die Sensorausstattung und -anordnung aus praktischer und wirtschaftlicher Sicht (Winzer) optimiert werden?

Die Daten der Sensoren in einer Tiefe von 10 cm sind zwar unter wissenschaftlichen Gesichtspunkten interessant, liefern aber für die praktische Bewässerungssteuerung kaum verwertbare Daten. Er bestimmt das Matrixpotential oberhalb des Bewässerungshorizontes. Er kann die Bewässerungsereignisse nicht erfassen und lässt das Matrixpotential höher erscheinen, als es eigentlich ist

Aus praktischer Sicht ist die Steuerung der Bewässerung mit FDR-Sensoren einfacher zu handhaben. In Kombination mit den Stressgrenzen nach Baumer, die auf die Bodentextur aufbauen, und im gewissen Sinne auch den Energiestatus der für die Wasseraufnahme notwendig ist beinhalten, ist diese Methode brauchbar. Aus Sicht der Wasserbilanzierung ist das Konzept des virtuellen Lysimeters (simultane Messung des Matrixpotenzials und des Wasseranteils) unumgänglich.

Die Tiefe von einem Meter ist für den phänologischen Zustand der Pflanzen und das vorherrschende Bodenprofil (sandiges Material ab 1 Meter Tiefe) ausreichend.

5. Abschließende Bemerkung

Durch die Analyse des Feldversuches konnten Schwächen aufgezeigt und Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Die Feldmessungen sind mit Unsicherheiten verknüpft, aber ohne sie kann eine RDI nicht sinnvoll angewandt werden. Vom Betreiber einer derartigen Anlage wird einiges an Erfahrung verlangt. Gerade wenn die Bewässerung auf die leichter zu messende Größe des Wasseranteils aufbaut, muss der Energiestatus, d.h. der Aufwand bzw. der Stress dem die Pflanze ausgesetzt ist, sorgfältig eingeschätzt werden. Alles in Allem konnte durch die Ergebnisse aufgezeigt werden, dass sowohl eine Unterflurbewässerung als auch eine RDI mit Hilfe der vorhandenen Messanordnung steuerbar sind.

7. Quellenverzeichnis

7.1. Literatur

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome
- ASAE Standards (1999) – 46th Edition – 256.1 Soil Water Terminology, St Joseph – USA
- Baumer O. W. (1989): Predicting Unsaturated Hydraulic Parameters. In van Genuchten M., Th. und F.J. Leij. Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils. Proceedings of the International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside, California, October 11-13.
- Bear J. (1979) Hydraulics of Groundwater, McGraw-Hill Book Company
- Beckingham C., Bright J., Creecy H., Moulds G., Quirk L., Somers A. (2004): Irrigating Grpaevines with Limited Water Supplies; NSW Agriculture, Orange
- Buss, P. (2000): Measuring soil moisture to improve yields and wine quality. Seminar; Modern Vineyard Development Emphasising the Smart Dyson Trellis, Orange, pp. 1-5.
- Camp C. R. (1998): Subsurface drip irrigation -A Review. Transactions of the ASAE, Vol.41 (5): 1353-1367, Florida, USA
- Camp, C. R.; Lamm, F. R.; Evans, R. G.; Phene, C. J. (2000): Subsurface drip irrigation - past, present, and future; National irrigation symposium – Proceedings of the 4th Decennial Symposium, pp. 363-372, Phoenix, Arizona, USA
- Campbell G.S., Gee G.W. (1986): Water Potentials: Miscellaneous Methods; Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods – Agronomy Monograph no. 9 (2nd Edition), Wisconsin, USA

- Centeno A., Baeza P., Lissarague J. R. (2010): Relationship Between Soil and Plant Water Status in Wine Grapes Under Various Deficit Regimes, HortTechnology 2010, Volume: 20, Issue 3: 585-593
- Cepuder P, Kammerer G., Klik A. (2009): Applied Soil Physics, Lehrbehelf an der Universität für Bodenkultur, Institut für Hydraulik und Landeskulturelle Wasserwirtschaft. Wien
- Dasberg, S., Or, D. (1999): Drip Irrigation; Springer Verlag, Berlin Heidelberg
- Doorenbos J., A.H. Kassam, C.L.M. Bentvelsen, V. Branscheid, J.M.G.A. Plusje (1979): Yield response to water. In: FAO Irrigation and Drainage Paper (FAO), no. 33 / FAO, Rome (Italy) Land and Water Development Div., 1979, 200 p.
- Dry, P.R. and Loveys, B.R. (1998). Factors influencing grapevine vigour and the potential for control with partial rootzone drying. Australian Journal of Grape and Wine Research 4: 140-148.
- Dry, P.R., Loveys, B.R., Stoll, M., Stewart, D. & McCarthy, M.G. (2000): Partial rootzone drying - an update. Australian Grapegrower and Winemaker 438a: 35-39.
- FAO (2009): Land and Water Digital Media Series No 36: ETo calculator version 3.1, <http://www.fao.org/nr/water/docs/EToCalculatorV31.zip>
- Finnern H., Grottenthaler W., Kühn D., Pächen W., Schrapf W.-G., Sponagel H. (1996): Bodenkundliche Kartieranleitung, AG Boden, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Hannover.
- Goodwin, I., Macrae I. (1990): Regulated deficit irrigation of Cabernet Sauvignon grapevines. *Australian and New Zealand Wine Industry Journal* 5: 131-133.
- Goodwin I. (1995): Irrigation of Vineyards: A winegrape grower's guide to irrigation scheduling and regulated deficit irrigation, Agriculture Victoria
- Goodwin I. (2002): Managing Water Stress in Grape Vines in Greater Victoria, Agriculture notes of the Victoria Department of Primary Industries, Victoria, Australien
- Hanke B. (1989): Taschenbuch der Bewässerung – Bewässerungstechnik, VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin

- Hillel D. (1998): Environmental Soil Physics. London, Academic Press
- Kainz, H.; Renner, H.; Kauch, E.P. (2002): Siedlungswasserbau und Abfallwirtschaft - Wasserversorgung, Abwasser, Abfall und Recycling, Verlag Manz, N.A.
- Kammerer G., Loiskandl, W. (2008) Scriptum zur LVA „Bodenphysik (Vertiefung)“ SS2008 an der Universität für Bodenkultur, Wien
- Kastanek F. (1996): Kritische Bemerkungen zur Bestimmung der Wasserspannung im Boden mit der Blockmethode, Die Bodenkultur – Band 47, Wien
- Kastanek F. (et al.) (1980): Zur Nomenklatur in der Bodenphysik, Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft, Heft 22 55–72, Wien
- Keller, M. (2010): The Science of Grapevines: Anatomy and Physiology. Academic Press, Burlington, Massachusetts.
- Kennedy J. (2002): Understanding Grape Berry Development, Department of Food Science & Technology, Oregon State University, Corvallis, USA
- Kriedemann, P.E., Sturt C., Goodwin I. (2003): Regulated Deficit Irrigation and Partial Rootzone Drying, Irrigation Insights No. 4, Land & Water Australie, Canberra, Australien
- Larcher, W. (1994): Ökophysiologie der Pflanzen, 5. Aufl.; UTB/Ulmer; Stuttgart
- Matthews M.A., Anderson M.M., Schultz H.R. (1987): Phenological and Growth Response to Early and Late Season Water Deficits In Cabernet, Vitis 26, 147-160
- McCarthy M.G., Coombe B.G. (2000): Dynamics of grape berry growth and physiology of ripening, Australian Journal of Grape & Wine Research 6: 131-135.
- McCarthy M.G., Loveys B.R., Dry P.R., Stoll M. (2002): Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines; Deficit Irrigation Practises, 79 – 87, Water Reports (FAO). 1020-1203, no. 22, FAO, Rom
- Müller G. (2011): Geostatistische Analyse der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Bodenwassergehaltes eines Bewässerungsversuches im Weinbau, Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien

- Nolz R. (2007): Unterflurtropfbewässerung bei Wein im Seewinkel – Optimierung der Wasser- und Nährstoffversorgung durch neue Bewässerungs- und Monitoringssysteme, Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur, Wien
- Nolz R., Himmelbauer M., Cepuder P., Loiskandl W. (2010): Remote monitoring of a novel irrigation system in a vineyard, 18th International Poster Day Transport of Water, Chemicals and Energy in the Soil - Plant - Atmosphere System, Bratislava, 11th November 2010
- Nolz R. (2011): Feldmessstelle Wein Andau, Präsentation Jahreshauptversammlung Weinbauverein Andau 2011
- Nolz R., Himmelbauer M., Kogelbauer I., Müller G. (2011): Innovative Approaches to the Subsurface Drip Irrigation (SINAPSIS) – Zwischenbericht 2011, pp 29-38, Wien
- Nolz R., Cepuder P. (2011a): Weather Data As Basis For Calculating Reference Evapotranspiration On An Irrigation Trial Plot Within A Vineyard, Mikroklima a mezoklima krajinných struktur a antropogenních prostředí. Skalní mlýn, 2. – 4.2. 2011, ISBN 978-80-86690-87-2
- Nolz R., Cepuder P. (2011b): Wasseraufnahme im Wurzelbereich junger Weinreben, 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung 2011, 89-92, Gumpenstein
- Patzwahl, W. (2007): Bewässerung im Weinbau; Verlag Eugen Ulmer KG, Stuttgart
- Phene C.J. (1995): The sustainability and potential of subsurface drip irrigation. Proc Fifth International Microirrigation Congress Orlando, Florida ASAE Publication 4, 359 – 368, USA
- Redl H., Ruckenbauer W., Traxler H. (1996): Weinbau Heute, 3. Auflage, Leopold Stocker Verlag, Graz
- Rogers D.H., Lamm F.R., Alam M. (2003): Subsurface Drip Irrigation (SDI) Components: Minimum Requirements, Irrigation Management Series, Kansas State University, Kansas City, USA
- Scheffer F., Schachtschabel P. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg

- Schaap M. G., Leij F. J. (1998): Database Related Accuracy and Uncertainty of Pedotransfer Functions, *Soil Science Journal* 163, pp: 765-779, Soil Science Society of America
- Schaap M. G., Leij F. J. (2000): Improved Prediction of Unsaturated Hydraulic Conductivity with Mualem-van Genuchten Model, *Soil Science Journal* 163, pp: 765-779, Soil Science Society of America
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. Th. (1996): Neural Network Analysis for Hierarchical Prediction of Soil Water Retention and Saturated Hydraulic Conductivity, *Soil Science Society Journal*, pp: 847-855, Soil Science Society of America
- Schaap M. G., Leij F. J., van Genuchten M. Th. (2001): ROSETTA: a Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions, *Journal of Hydrology* 251 (2001), pp: 163-176, Elsevier Science BV, USA
- Schultz H.R. (2005): Physiologische Veränderungen im Wasserhaushalt der rebe und der Traube bei Trockenheit, XV Kolloquium internationaler Arbeitskreis Begrünung im Weinbau, Weinsberg, Deutschland
- Seguin, G. (1986): "Terroirs" and pedology of vine growing, *Cellular and Molecular Life Sciences* Volume 42, Number 8, pp 861-873
- Sitte P., Ziegler H., Ehrendorfer F., Bresinsky A. (1993): *Strasburger - Lehrbuch der Botanik für Hochschulen*, Spektrum Akad. Vlg, Berlin
- Soil Science Society of America (1997): *Glossary of Soil Science Terms*. Wisconsin, USA
- Van Genuchten M.Th. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils .*Soil Sci.Soc.Am.J.*,44,892-898.
- Van Leeuwen C. Friant P., Choné X., Tregoat O., Koundouras S., Dubourdieu D. (2004): Influence of Climate, Soil, and Cultivar on Terroir, *American Journal for Enology and Viticulture* 55:3, pp 207-217; American Society for Enology and Viticulture, USA
- Veihmeyer F.J., 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, USA

- Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M., Lieder L.A. (1974): General Viticulture, University of California; Press Berkeley, Kalifornien – USA
- World Meteorological Organization (2003): Manual on the Global Observing System. WMO-No. 544, Genf - Schweiz.
- Wu, Wei (2007): Scriptum zu LVA 873.101VU Geotechnik I an der Universität für Bodenkultur Wien, Wien
- N.A. (2008): Hydrographisches Jahrbuch von Österreich 2008 – 116. Band, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft Abteilung VII/3 - Wasserhaushalt, WIEN,

7.2. Internetquellen

Austria.info - <http://www.austria.info/at/wissenswertes-zu-oesterreich/landschaft-so-weit-das-auge-reicht-1090588.html>

Zugriff am 06.07.2011 (9:30)

Geoland.at – Geoland Viewer - <http://www.geoland.at/geoland2/%28twghrr452s0ooaiqqi41nvfh%29/init.aspx?karte=geo&hotspot=677241,972|437137,248|Andau>

Zugriff am 06.07.2011 (10:30)

Google Earth – Vers. 5.2.1.1588 – Aufnahme vom 30.07.2005

Meteowiki – Meteorologisches Wiki von Florian Geyer. Abrufbar unter http://www.unet.univie.ac.at/~a0304353/wiki/index.php?title=Bild:Klima_%C3%B6sterreich.jpg. Zugriff am 14.07.11 (12:23)

Schumacher P., Schifferli A., Henn R., Brunner M. (2011): Lohnt sich die Tropfbewässerung auch in der Deutschschweiz?, abrufbar unter: http://www.weinbau.ch/exterior_rebberg_au/bewaesserung_im_weinbau. Zugriff am 04.05.2011 (9:20)

sswm.info - Sustainable Sanitation and Water Management. Zugriff am 22.09.2011 (16:34)

umwelt.luzern.ch – Tensiometer/Messnetz Bodenfeuchte, abrufbar unter: http://www.umwelt-luzern.ch/index/themen/bodenschutz/uwe-messnetz_bodenfeuchte_/messnetz_bodenfeuchte_projektinformationen.htm. Zugriff am 22.09.2011 (18:54)

wurzelwasser.de/t-tape – Tropfbewässerungsschlauch. Zugriff am 22.09.2011 (17:01)

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklungsstadien der Beeren im jahreszeitlichen Verlauf (modifiziert nach Coombe & McCarthy, 2000 und Kriedemann, 2003).....	15
Abbildung 2: Pflanzenkoeffizient über die Vegetationsperiode	20
Abbildung 3: pF-Kurve für Ton- Sand- und Schluffboden (Scheffer und Schachtschabel, 2002).....	25
Abbildung 4: Auswirkungen von RDI zu verschiedenen Entwicklungsstadien (modifiziert nach Buss, 2000; Quelle Fotos: „Knospe“, „Blüte“ & „Ernte“ - rgs.applicare.ch; „Veraison“ - www.avalonwine.com. Zugriff beide: 04.10.2011). Grüne Pfeile bedeuten „Zunahme“, Rote „Abnahme“.	30
Abbildung 5: Watermark [®] Sensor (www.irrometer.com)	32
Abbildung 6: Matrixpotentialverlauf des Jahres 2010 in verschiedenen Tiefen (Nolz, 2011).....	32
Abbildung 7: Verlauf des Matrixpotentials.....	33
Abbildung 8: Kalibrationskurve Watermark während des Kalibrationsvorganges (Kastanek, 1996) (Kastanek, 1996)	33
Abbildung 9: EnviroSCAN Messsonde mit 3 Sensoren (www.ums-muc.de)	35
Abbildung 10: Wasseranteilsverlauf 2010	35
Abbildung 11: Kumulierter Niederschlag und Verdunstung, Projektjahr 2010 (Nolz et al., 2011).....	38
Abbildung 12: Verlauf des Wasseranteils in einem Bodenprofil, Projektjahr 2010 (Nolz et al., 2011).....	38
Abbildung 13: Klimazonen Österreichs (modifiziert nach Geyer F., Univie.ac.at)	42
Abbildung 14: Lage der Versuchsfläche (geoland.at (1 & 2) & Google Earth(3)).....	42
Abbildung 15: Wetterstation.....	44
Abbildung 16: Wetterstation.....	44

Abbildung 17: Temperatur- und Niederschlagmonatmittelsverlauf Andau 1996-2010 (ZAMG, 2011)	44
Abbildung 18: Niederschlag und Temperaturjahresmittel, Niederschlagsmittel (1996 – 2010) Andau 1996-2010 (ZAMG, 2011)	45
Abbildung 19: Querschnitt durch die Sensorausstattung im Feld (modifiziert nach Nolz et al., 2011).....	46
Abbildung 20: Lageplan der Versuchsfläche (modifiziert nach Nolz et al., 2011)	48
Abbildung 21: Stechzylinder I.....	51
Abbildung 22: Stechzylinder II.....	51
Abbildung 23: Versuchswanne mit Zylindern.....	53
Abbildung 24: Boyle Marriot'sche Flasche.....	53
Abbildung 25: Drucktöpfe.....	54
Abbildung 26: Drucktopf und Zylinder	54
Abbildung 27: Nasssiebapparatur.....	56
Abbildung 28: Siebe unterschiedlicher Maschenweite	56
Abbildung 29: Pyknometer auf Waage.....	57
Abbildung 30: Exsikkator.....	57
Abbildung 31: Scheibler-Apparatur	59
Abbildung 32: Verlauf der hydraulischen Leitfähigkeit über die Tiefe	61
Abbildung 33: Sieblinie Mischprobe 0-60 cm (Müller, 2010)	62
Abbildung 34: Texturdreieck des untersuchten Bodens (Müller, 2010).....	62
Abbildung 35: Sieblinie Probe aus 1 Meter Tiefe	63
Abbildung 36: Gegenüberstellung Bewässerungsgrenzen.....	66
Abbildung 37: Aktuelle Grenzwerte (Nolz et al., 2010).....	69
Abbildung 38: Monatsmittel Niederschlag und Temperatur Adcon-Station	73
Abbildung 39: Niederschlags- und Verdunstungssumme 2011.....	74

Abbildung 40: Bodenwasserstatus – gemessen und gerechnet.....	75
Abbildung 41: Niederschlags- und Verdunstungssumme in der Vegetationsperiode 2011	78
Abbildung 42: Wasseranteilsverlauf in 5 Tiefen, 2011	80
Abbildung 43: Wasseranteilsverlauf 50-80 cm	81
Abbildung 44: Wasseranteilsverlauf FDR2 2011 13.03 – 21.04.....	81
Abbildung 45: Matrixpotentialverlauf 2011	82
Abbildung 46: Matrixpotentialverläufe 2011 (Mittelwert 0-50cm / 30cm / Mittelwert 30&50)	83
Abbildung 47: Vergleich Matrixpotential/Wasseranteil 2010, Mittelwert über das Profil (0 - 50 cm).....	86
Abbildung 48: Vergleich Matrixpotential/Wasseranteil 2011, Mittelwert über das Profil (0 - 50 cm).....	86
Abbildung 49: $\theta/\psi/N$ - Ende April – Mitte Mai	88
Abbildung 50: $\theta/\psi/N$ - Ende Mai – Ende Juni	89
Abbildung 51: LK, FK und nFK in Vol % in Abhängigkeit von Bodenart und Trockendichte (Finnern et al, 1996)	105
Abbildung 52: k_s in Abhängigkeit von Bodenart und Trockendichte (Finnern et al., 1996).....	106
Abbildung 53: Bodenartendiagramm Feinboden (Finnern at al., 1996).....	107
Abbildung 54: Potentialkonzept (modifiziert nach Kammerer & Loiskandl, 2008) ...	108

9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mindestansprüche der Rebe an das Klima (Redl et al., 1996)	13
Tabelle 2: Pflanzenkoeffizient für Wein nach FAO 56.....	20
Tabelle 3: Stresslimits für RDI.....	40
Tabelle 4: Stressbereiche für RDI	40
Tabelle 5: Gegenüberstellung Adcon/ZAMG, 2010 (Nolz & Cepuder, 2011a)	45
Tabelle 6: Sensorausstattung (modifiziert nach Nolz, 2007).....	46
Tabelle 7: Druckstufen	54
Tabelle 8: Mittelwerte der Durchlässigkeiten verschiedener Tiefen	60
Tabelle 9: Feststoffdichten verschiedener Tiefen.....	64
Tabelle 10: Trockendichten unterschiedlicher Tiefen.....	64
Tabelle 11: Porenanteil	65
Tabelle 12: Übersicht Bewässerungsgrenzen verschiedener Methoden.....	66
Tabelle 13: Retentionsfunktionswertepaare Labor.....	68
Tabelle 14: Ergebnisse der PTF nach Baumer (1989).....	70
Tabelle 15: Ergebnisse Rosetta	71
Tabelle 16: Wetterdaten des Jahres 2011 (Adcon-Station)	73
Tabelle 17: kc-Werte für unterschiedliche Entwicklungsstadien	76
Tabelle 18: Bewässerungstermine	77
Tabelle 19: Bodenwasserbilanzvergleich	78
Tabelle 20: θ/ψ -Veränderungen Ende April – Mitte Mai	88
Tabelle 21: θ/ψ -Veränderungen Ende Mai – Ende Juni	89
Tabelle 22: Hydraulische Leitfähigkeit k_s	110
Tabelle 23: Trockendichten unterschiedlicher Tiefen.....	111
Tabelle 24: Porenanteile unterschiedlicher Tiefen	111

10. Anhang

10.1. Theorie

Literaturwerte - Bodenart und Feldkapazität

Bodenart*	Luftkapazität Poren >50 µm (pF < 1,8)			nutzbare Feldkapazität Poren 0,2–50 µm (pF 4,2 bis 1,8)			Feldkapazität Poren < 50 µm (pF ≥ 1,8)			
	Kurzzeichen	pt1–2	pt3	pt4–5	pt1–2	pt3	pt4–5	pt1–2	pt3	pt4–5
Ss		24	21,5	18,5	15,5	11	10,5	22	15,5	14,5
Sl2		17	14,5	10,5	19,5	17,5	17	28	24,5	22
Sl3		12,5	11,5	7,5	22,5	18,5	16	34,5	27	24
Sl4		11,5	10	6	20,5	17,5	14,5	34	29	25,5
Slu		8	7	5,5	27	21,5	18,5	41,5	32	29
St2		18,5	17	13	20	15,5	11,5	28,5	22,5	20
St3		–	9,5	7,5	–	14,5	12	–	29	26
Su2		18	15,5	12,5	19,5	16,5	14,5	27,5	22	20
Su3		12	9,5	8	24	22	19	32,5	28,5	25,5
Su4		10,5	8	5	26,5	24,5	21,5	35	31	28,5
Ls2		9	7	5,5	20	14,5	13	39,5	32,5	29
Ls3		7,5	6,5	4,5	19,5	15	12,5	41,5	32,5	28,5
Ls4		8,5	7,5	5,5	19	15,5	12	40	32	27,5
Lt2		5,5	4,5	3	16,5	13	10,5	44,5	36,5	31,5
Lt3		4	3	2,5	14,5	10,5	8	45	38,5	33
Lts		4	3,5	3	15	12	10	45	36,5	30,5
Lu		6,5	5,5	4	19,5	16	14	42	35,5	32
Uu		7,5	5	–	28	25,5	–	41	36,5	–
Uls		8,5	7	3,5	26	22,5	20,5	40,5	33,5	31,5
Us		8,5	6,5	–	28,5	26	–	41	34	–
Ut2		9,5	5	2	27,5	25,5	23	40	36	34,5
Ut3		10	4,5	2	25,5	24	22	38	36	34,5
Ut4		9,5	5	2	22	20,5	17,5	38	36	33,5
Tt		3	2,5	–	16	11,5	–	54	42	–
Tl		4	3	–	14	9	–	50	40	–
Tu2		3	2,5	2	15	10	7,5	50	40,5	35,5
Tu3		4,5	4	3	15,5	11	6,5	45	37,5	33
Tu4		7	5	–	17	15	–	41	36	–
Sande										
gSfs		–	20	15	–	14	15	–	17,5	19
mS		–	25,5	22	–	8	8	–	12	12
mSgs		28,5	25	20	9,5	8,5	9,5	13,5	13	13,5
mSfs		26	23,5	18	14	12,5	13,5	16,5	15	17
fS		23	17	13,5	20,5	20	22	23	22,5	25
fSms		21,5	19	16	19	16,5	17,5	22	19,5	20

Abbildung 51: LK, FK und nFK in Vol % in Abhängigkeit von Bodenart und Trockendichte (Finnern et al, 1996)

Literaturwerte - Durchlässigkeitsbeiwert

Bodenart*	Wasserdurchlässigkeit kf in cm/d						Gesamtmittel**
	qt1-2	qt3	qt4-5	Ld1-2	Ld3	Ld4-5	
Ss	335	230	200	349	229	126	276
S12	126	66	43	109	49	36	64
S13	51	42	17	47	33	15	30
S14	46	21	12	43	21	12	16
S1u	47	15	8	41	11	8	13
St2	106	65	49	91	79	37	74
St3	–	16	12	–	17	7	14
Su2	155	126	64	157	88	36	111
Su3	92	51	19	75	32	17	38
Su4	39	34	17	41	24	20	28
Ls2	22	19	11	41	20	13	17
Ls3	11	7	6	13	7	6	8
Ls4	13	12	6	20	14	6	7
Lt2	9	7	4	13	9	4	7
Lt3	9	9	3	10	10	7	8
Lts	8	5	5	12	6	3	6
Lu	25	12	5	26	18	6	13
Uu	17	10	–	16	7	–	13
Uls	49	17	6	35	14	5	16
Us	27	13	–	22	10	–	16
Ut2	44	9	3	30	7	4	13
Ut3	45	8	3	38	8	3	10
Ut4	32	8	5	31	9	4	9
Tt	4	2	–	7	2	1	2
T1	2	1	–	10	3	1	2
Tu2	5	4	1	20	5	1	3
Tu3	15	10	2	27	13	6	12
Tu4	35	16	–	34	28	8	20
Sande							
gSfs	–	273	105	369	130	–	209
mS	–	593	311	653	427	–	492
mSgs	–	512	230	581	281	–	339
mSfs	344	191	177	311	221	–	258
fS	273	166	57	172	106	–	141
fSms	262	194	141	244	169	–	194

Abbildung 52: k_s in Abhängigkeit von Bodenart und Trockendichte (Finnern et al., 1996)

Bodenartendiagramm nach Finnern (et al., 1996)

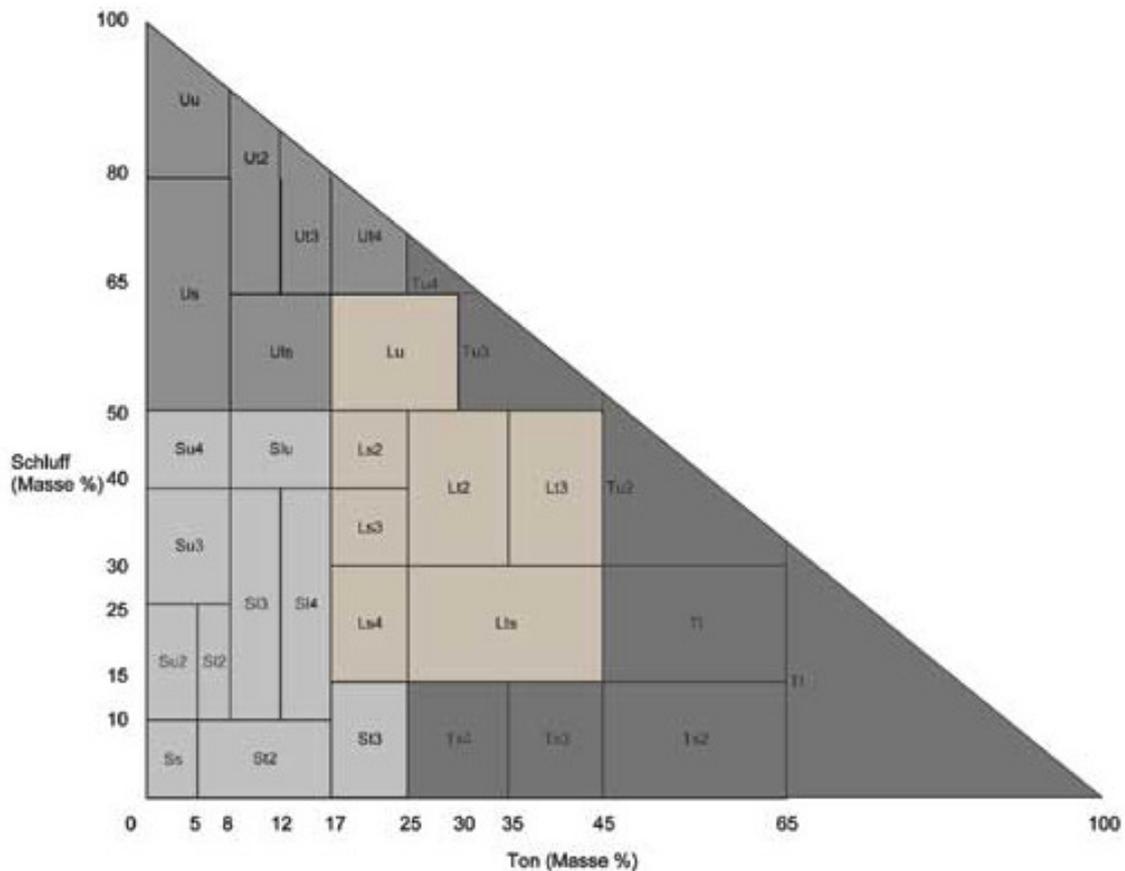


Abbildung 53: Bodenartendiagramm Feinboden (Finnern et al., 1996)

Potentialkonzept

Betrachtet man eine infinitesimale Menge Wasser und hebt sie reversibel und isothermal vom System S0 in das System S1 (Abbildung 54), so wird das gravimetrische Potential überwunden.

Die Systeme S1 und S0 sind definiert als Behälter reinen, freien Wassers, unterscheiden sich jedoch in der Höhenlage. Bewegt man die Wassermenge isothermal und reversibel vom System S1 in das System S2, so wird das osmotische Potential überwunden. S2 ist ein „Behälter“ mit einer Lösung von der gleichen Zusammensetzung wie die Bodenflüssigkeit. Diese besitzt einen osmotischen Druck. In der Natur kommt das osmotische Potential nur bei Vorhandensein einer semipermeablen Membran zur Wirkung. Ansonsten findet eine Salz-/Wasserbewegung statt.

Um Wasser reversibel und isothermal vom System S2 in den betrachteten Punkt im Bodenkörper zu bewegen, muss das Druckpotential überwunden werden. Dieses Potential kann mit einem Tensiometer gemessen werden. Es entspricht dem Druck den eine Wassersäule auf eine Membran ausüben müsste, um mit dem Bodenwasser in Gleichgewicht zu stehen (Kammerer & Loiskandl, 2008). Dieser Wert ist zu meist negativ, ansonsten würde Wasser aus dem Boden austreten.

Die Vorgänge geschehen alle reversibel und isothermal, somit ist das thermische Potential nicht Bestandteil des Potentialkonzeptes.

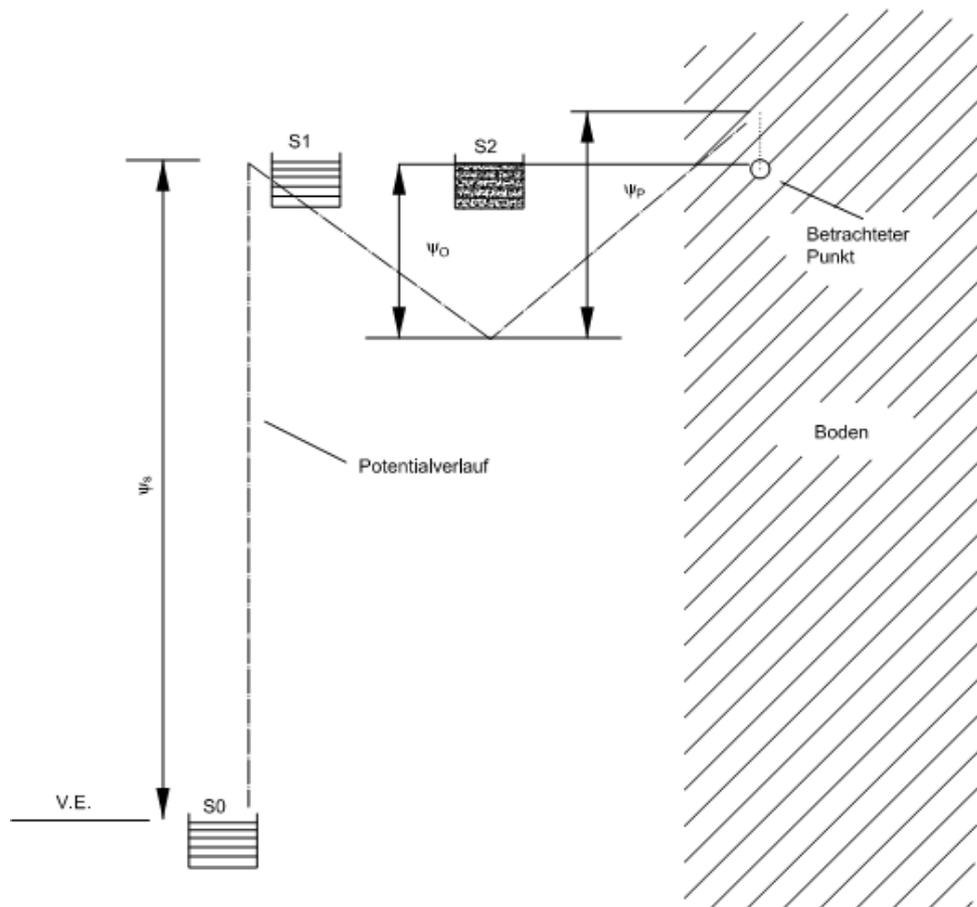


Abbildung 54: Potentialkonzept (modifiziert nach Kammerer & Loiskandl, 2008)

Allgemeine Penman-Monteith-Formel

Formel 17

$$ET_a = \frac{1}{L} \cdot \frac{s \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot c_p}{r_a} \cdot (e_s - e)}{s + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)}$$

Mit...

- [L] = J/kg spezifische Verdunstungswärme für 1 mm Verdunstungshöhe
- [s] = hPa/K Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
- [R_n] = W/m² Strahlungsbilanz
- [G] = W/m² Bodenwärmestrom
- [ρ] = kg/cm³ Luftdichte
- [c_p] = J/(kgK) spezifische Wärme der Luft
- [r_a] = s/m aerodynamischer Widerstand
- [e_s-e] = hPa Sättigungsdefizit, abhängig von Lufttemp. und Dampfdruck
- [γ] = hPa/K Psychrometerkonstante
- [r_s] = s/m Stomatawiderstand

10.2. Ergebnisse

Labordaten

Hydraulische Leitfähigkeit k_s

Tabelle 22: Hydraulische Leitfähigkeit k_s

k _s - Wert Analyse, Probennahmedatum 19.05.2011					
Entnahmetiefe	Nummer eingepägt	k	k	k	
[cm]		[cm/d]	[m/sec]	[cm/sec]	
10	129	5.04E+02	5.83E-05	5.83E-03	
	79	4.45E+02	5.15E-05	5.15E-03	
	256	4.16E+02	4.81E-05	4.81E-03	
	544	5.42E+02	6.27E-05	6.27E-03	*
	387	2.45E+02	2.84E-05	2.84E-03	*
20	305	1.72E+01	1.99E-06	1.99E-04	
	15	4.96E+01	5.74E-06	5.74E-04	
	420	-	-	-	
	126	1.88E+01	2.17E-06	2.17E-04	*
	16	2.26E+01	2.62E-06	2.62E-04	*
30	28	-	-	-	
	450	5.29E+02	6.12E-05	6.12E-03	
	124	1.01E+02	1.17E-05	1.17E-03	
40	599	7.40E+01	8.56E-06	8.56E-04	
	322	3.72E+01	4.30E-06	4.30E-04	
	280	4.99E+01	5.78E-06	5.78E-04	
50	350	1.27E+04	-	-	
	311	6.03E+01	6.97E-06	6.97E-04	
	251	1.41E+03	-	-	

	Messung liefert kein eindeutiges Ergebnis
	Messung fehlerhaft / mit Probe nicht durchführbar
*	Proben zur Verdichtung des Messfeldes

Trockendichte

Tabelle 23: Trockendichten unterschiedlicher Tiefen

Tiefe / cm	10cm	ρ_d / g/cm ³	20cm	ρ_d	30cm	ρ_d	40cm	ρ_d	50cm	ρ_d	0-50
	129	1,43	305	1,52	124	1,65	322	1,52	251	1,33	
	256	1,45	16	1,54	28	1,67	280	1,45	311	1,32	
	387	1,35	126	1,57	450	1,46	599*	1,47	350	1,37	
	79	1,29	15	1,47							
	544	1,33	420	1,48							
Mittelwert		1,37		1,52		1,59		1,48		1,34	1,46

Porenanteil

Tabelle 24: Porenanteile unterschiedlicher Tiefen

Tiefe / cm	10cm	n	20cm	n	30cm	n	40cm	n	50cm	n	0-50
	129	0,49	305	0,42	124	0,45	322	0,47	251	0,43	
	256	0,46	16	0,42	28	0,39	280	0,43	311	0,42	
	387	0,48	126	0,43	450	0,42	599*	0,44	350	0,41	
	79	0,49	15	0,42							
	544	0,40	420	0,39							
Mittelwert		0,46		0,42		0,42		0,45		0,42	0,44