
[Halb]- trocken im Unterstockbereich?

„Untersuchungen meteorologisch-hydrologischer Messgrößen im Weinbau als Anpassungsstrategie an den Klimawandel sowie für eine nachhaltige Wassernutzung von *Vitis vinifera* [cv. Riesling]. “

„Investigations of meteorological-hydrological parameters in viticulture as an adaption strategy to climate change and for sustainable water use by *Vitis vinifera* [cv. Riesling]. “

Vom Fachbereich Raum- und Umweltplanung der
Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität
Kaiserslautern-Landau zur Verleihung des akademischen Grades Doktor rerum politicarum (Dr. rer. pol.) genehmigte Dissertation,

vorgelegt von

Christian Ihrig, M.Ed.

Datum der wissenschaftlichen Aussprache: 26.03.2024

Dekanin: Univ.- Prof. Dr. Ing. habil. Karina M. Pallagst

Vorsitzender der Prüfungskommission: Prof. Dr. jur. Willy Spannowsky

1. Berichterstatter: Univ.- Prof. Dr. rer. nat Sascha Henninger

2. Berichterstatterin: Prof. Dr.-Ing. Anke Schmidt

Eingereicht am 25.10.2023

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eid statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung angegebener Quellen angefertigt habe. Alle wörtlichen und sinngemäßen Entlehnungen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Worms, den 01. Oktober 2023

Vorwort

Ein Dank gilt zuvorderst einer der wichtigsten Personen, meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Sascha Henninger. Die freundliche Überlassung des hochinteressanten Themas und die Bereitstellung des Arbeitsplatzes gilt mein Dank. Ein scheidender Kooperationspartner zu Beginn meiner Promotion zwang mich zum Umdenken des geplanten Messkonzeptes. In dieser Phase haben Sie mich durch Ihre Worte und stetige Unterstützung immer wieder aufs Neue motiviert und mir Mut zugesprochen. Besonders bedanken möchte ich mich auch für die Freiheit, die Sie mir während des gesamten Forschungsprojektes gewährten, was maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug. Ihr kompetenter Rat und ihre Hilfe kamen mir in zahlreichen Angelegenheiten sehr zugute. Für all das möchte ich Ihnen danken. Dies werde ich Ihnen nie vergessen.

Aber auch der praktische Teil dieser Forschung wurde erst durch Dr. Bernd Prior vom DLR Oppenheim mittels der Bereitstellung von Messinstrumenten ermöglicht. Jederzeit gewährten Sie mir bei der Planung, Durchführung und Auswertung der vorliegenden Arbeit außerordentlich sachkundige, erfahrene und wertvolle Unterstützung. Für Ihre Anregungen und Inspirationen möchte ich Ihnen vielmals danken, was ohne Sie auf diese Art und Weise nicht hätte stattfinden können.

Mein herzlicher Dank gilt auch Prof. Dr. Manfred Stoll und Marco Hofmann von der Hochschule Geisenheim. Mit fachkundigen Ratschlägen und Forschungserfahrungen haben Sie mir zu jeder Zeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Selbstverständlich geht mein tief empfundener Dank an mein gesamtes Kollegenteam der Abteilung Physische Geographie. Ihr habt mir mithilfe eurer familiären und kollegialen Atmosphäre einen Arbeitsraum geschaffen, welcher ein tägliches „Nach Hause kommen“ an den Arbeitsplatz unbeschreiblich machte. Des Weiteren möchte ich mich bei meiner ehemaligen Lehrerin Christine Hahn bedanken, welche durch tagelanges Gegenlesen meine Arbeit aus grammatikalischer Sicht auf Herz und Niere prüfte.

An letzter Stelle möchte ich meine unbeschreibliche Dankbarkeit drei Personen widmen, ohne diese ich meine Forschungszeit nur schwer hätte bewältigen können. Danke Papa. Mit deinem Know-how, deiner Manpower, deiner Unterstützung bei individuellen Messungen und zu guter Letzt mit deiner Bereitstellung der Untersuchungsparzelle hast du mir meine Forschung ermöglicht. Aber auch dir Mama gebührt mein Dank. Es war nicht immer leicht, geduldig und verständnisvoll zu sein. Du hast immer an mich geglaubt und warst auch an den Tagen für mich da, an denen ich meinen emotionalen Tiefpunkt erreicht hatte. An letzter Stelle dieser Aufzählung, aber in meinem Herzen an vorderster Stelle, gilt der Dank meiner Freundin Fabi. Du hast in den letzten Jahren auf viele Dinge aus Zeitgründen meinerseits verzichten müssen, was ich sehr zu schätzen weiß. Dank dir haben meine Tagesmessungen stattfinden können. Zu jeder Zeit hast du mich nach vorne getrieben und mir in aussichtslosen Momenten immer beigestanden. In dieser Zeit warst du für mich nicht nur meine Partnerin, sondern auch Vertraute, Wegbegleiterin aber auch Dreh- und Angelpunkt.

Meine Forschungszeit hat mich aufgrund meines unbeschreiblichen Umfeldes durch Bodenständigkeit, Engagement, Loyalität und Fleiß geprägt, weshalb ich im Endeffekt nur DANKE sagen kann.

Jeder Mensch sollte in seinem Leben in vier Richtungen blicken:

Nach *vorne*, um zu wissen, wohin man geht.

Nach *hinten*, um sich daran zu erinnern, woher man kommt.

Nach *unten*, um niemanden niederzutrampeeln.

Zur *Seite*, um zu sehen, wer einen auch in schwierigen Zeiten begleitet.

N.N.

Kurzfassung

Der vom Menschen verursachte Klimawandel beeinflusst sowohl langfristige Klimaprozesse, als auch das aktuelle, kurzfristige Wettergeschehen in allen Regionen der Erde. Er äußert sich in einer Vielzahl an Phänomenen, die sich je nach Klimagebiet unterschiedlich manifestieren lassen oder auch unterschiedliche Auswirkungen mit sich bringen. Diese Forschungsarbeit beschäftigt sich mit dem Wasserhaushalt von Weinreben im Rahmen des rezenten Klimawandels. Ziel dieses Projektes ist es, mittels meteorologisch-hydrologischen Messgrößen eine Anpassungsstrategie zu generieren, die auf alle Weinbauregionen in Rheinland-Pfalz übertragen werden kann, um Winzer*innen die Möglichkeit zu eröffnen, auf natürlicher Art und Weise der Rebe Wasser zugänglich zu machen.

Durch die Zunahme abiotischer Schäden (z.B. Niederschlag) und die Veränderung der Vegetationszeit sowie die Zunahme invasiver Schaderreger ist vermehrt eine Steigerung der Vulnerabilität des Ökosystems „Wingert“ zu erkennen. Winzer*innen werden aufgrund der Zunahme von Extremwetterereignissen (Hitze-/Dürrephasen) zur langfristigen Bewässerung ihrer Weinbauflächen gezwungen. Große Mengen Wasser werden bereits vereinzelt in Weinbergsregionen gepumpt, was langfristig hinsichtlich eines sinkenden Grundwasserspiegels einen fatalen Fehler darstellt. Die ressourcenschonende Gestaltung des Wasserhaushaltes sollte daher in den Mittelpunkt der Weinbauforschung gestellt werden. Weinbauer*innen sind an regional-/ lokalklimatischen Lösungsmöglichkeiten und Anpassungsstrategien interessiert, um Risiken für die Anbaufrucht zu reduzieren und auf die lokalklimatischen Auswirkungen des Klimawandels reagieren zu können. Um gegen dieses Risiko anzugehen und den Produktionsausfall zu minimieren, muss die Anpassungsfähigkeit in Sachen Wasserhaushalt der Reben bekräftigt werden. Demzufolge wird das Mikroklima in der Weinbauregion Rheinhessen mittels des Einsatzes der Scholander-Druckkammer untersucht. Die Bestimmung des Wasserstatus hinsichtlich der exakten Bewässerungssteuerung von Weinreben hat sich durch das frühmorgendliche Blattwasser (Ψ_{pd}) und mittägliche Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) bewährt. Physiologische Prozesse, wie die stomatare Leitfähigkeit der Blattschließzellen sowie das vegetative Wachstum, aber auch die Photosynthese, sind direkt oder indirekt an $\Psi_{pd} + \Psi_{stem}$ gekoppelt. Darüber hinaus lässt sich der Wasserhaushalt durch ein an Trockenstandorten angepasstes Bodenpflegesystem, wie zum Beispiel einer flächendeckenden Bodenabdeckung mittels Holzhäcksel, deutlich verbessern. Des Weiteren wird das Mikroklima im Weinberg durch die Laubwandstruktur mitbestimmt, was durch eine gesteigerte Photosyntheseleistung der Laubwand, eine optimale Belüftung und Belichtung gewährleistet wird. Im praktischen Weinbau wird dies durch die Höhe der Laubwand realisiert. Um dem Herbizid im Unterstockraum durch das anstehende Glyphosatverbot eine Alternative zu bieten, entwickelt die Landmaschinenbranche bereits heute alternative Arbeitsgeräte, die eine Möglichkeit darstellen, dem Wuchs des Unkrautes im Unterstockbereich entgegenzuwirken.

Daher ist es von gesteigertem Interesse zu analysieren, inwiefern sich eine Bodenabdeckung im Unterstockbereich von einer flächendeckenden bzw. moderaten Tropfbewässerung in Flachlage unterscheidet. Darüber hinaus sollen Möglichkeiten zur Reduzierung

des Wasserverbrauchs und zur Reifeverzögerung (Verminderung des Botrytisbefalls, Verlängerung der Reifedauer, Vermeidung eines zu hohen Alkoholgehaltes) durch eine kürzere Laubwandhöhe beim Riesling in Flachlage in diesem Projekt erprobt werden. Als Versuchsvarianten dienen vier Variationen, um abgrenzbare und eindeutige Ergebnisse erzielen zu können (V1: Tropfbewässerung; V2: Unterstockabdeckung Holzhäcksel; V3: Flächendeckende Holzhäcksel; V4: Kontrollvariante).

VORWORT	I
KURZFASSUNG.....	III
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	VII
1 ZIELSETZUNG	- 1 -
2 FORSCHUNGSLEITENDE FRAGESTELLUNG UND FORSCHUNGSSTRATEGIE.....	- 6 -
3 THEORETISCHER HINTERGRUND	- 10 -
3.1 AUSGANGSPUNKT UND URSACHE DES KLIMAWANDELS.....	- 10 -
3.2 KLIMABEDINGUNGEN DER REBE	- 11 -
3.2.1 Lufttemperatur.....	- 11 -
3.2.2 Strahlungsintensität und Sonnenscheindauer.....	- 13 -
3.2.3 Niederschlag.....	- 14 -
3.3 WASSER(HAUSHALT) IM BODEN.....	- 16 -
3.4 WASSER(HAUSHALT) DER REBANLAGE	- 18 -
3.5 BODENWASSERPOTENTIAL VON REBEN	- 20 -
3.6 BODENABDECKUNG.....	- 23 -
3.7 LAUBWANDHÖHE UND -STRUKTUR	- 25 -
3.8 TRANSPIRATION UND UMWELTFAKTOREN	- 27 -
3.9 PHOTOSYNTHESE	- 29 -
3.9.1 Temperatur.....	- 29 -
3.9.2 Sonneneinstrahlung	- 30 -
3.9.3 Wasser – Das blaue Gold	- 30 -
3.10 AUFNAHME VON CO ₂ IN DER REBE	- 31 -
3.11 STICKSTOFFHAUSHALT	- 32 -
4 MATERIAL UND METHODE.....	- 36 -
4.1 VERSUCHSSTANDORT.....	- 36 -
4.2 MESSGEGENSTAND	- 43 -
4.2.1 Messprinzip Scholander-Druckkammer	- 43 -
4.2.2 Aufbau der Druckkammer	- 43 -
4.2.3 Fehlermöglichkeiten und Probleme bei Messungen.....	- 45 -
4.2.4 Wasserpotentialmessung	- 46 -
4.2.5 Bodenwassergehaltsmessung	- 48 -
4.2.6 Rebenbewässerung.....	- 48 -
4.2.7 Feldmethode Blattstiel-Nitrat-Test	- 48 -
4.2.8 CO ₂ - und Lichtmessung	- 49 -
4.2.9 Blattflächenberechnung	- 49 -
4.2.10 Tagesmessungen.....	- 50 -
4.2.11 Reifebeobachtung/Reifeverlauf	- 51 -
4.2.12 Traubenertrag	- 51 -
4.2.13 Schnittholzgewicht.....	- 51 -
4.2.14 Erfassung der Witterungsdaten	- 51 -
4.2.15 Verifizierung und statistische Auswertung	- 52 -
5 ERGEBNISSE	- 53 -
5.1 WITTERUNG UND PHÄNOLOGIE	- 53 -
5.2 BODENFEUCHTE	- 56 -
5.2.1 Verlauf der Bodenfeuchte unterschiedlicher Bodentiefen.....	- 56 -
5.2.2 Verlauf der Bodenfeuchte und der frühmorgendlichen Wasserpotentiale.....	- 62 -
5.2.3 Zusammenhang der Bodenfeuchte und des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials	- 68 -
5.3 GEZIELTE STICKSTOFFVERSORGUNG IM BLATTSTIEL	- 70 -
5.3.1 Phasenverlauf Nitratkonzentration.....	- 70 -

4.3.2 Zusammenhang Nitratkonzentration und Blattwasserpotential	- 72 -
5.4 MITTÄGLICHES STAMMWASSERPOTENTIAL	- 74 -
5.4.1 Verlauf des mittäglichen Stammwasserpotentials	- 74 -
5.4.2 Zusammenhang zwischen meteorologischen Parameter auf das mittägliche Stammwasserpotential	- 80 -
5.4.2.1 Verhältnis zwischen der Lufttemperatur und dem Stammwasserpotential	- 80 -
5.4.2.2 Verhältnis zwischen dem VPD und dem Stammwasserpotential	- 82 -
5.4.2.3 Verhältnis zwischen der Globalstrahlung und dem Stammwasserpotential.....	- 84 -
5.5 CO ₂ -AUFNAHME BEI UNTERSCHIEDLICHEN BLATTWASSERPOTENTIALEN 2022	- 86 -
5.5.1 CO ₂ -Aufnahme der Rebenblätter	- 86 -
5.5.2 CO ₂ -Aufnahme und frühmorgendliches Blattwasserpotential	- 88 -
5.6 OBERFLÄCHENTEMPERATUREN IM TAGESVERLAUF	- 92 -
5.6.1 Oberflächentemperatur: Boden.....	- 92 -
5.6.2 Oberflächentemperatur: Beeren.....	- 97 -
5.6.3 Oberflächentemperatur: Rebblatt	- 105 -
5.7 LUFTTEMPERATUR INNERHALB DER LAUBWAND.....	- 113 -
5.8 PHOTOSYNTHETISCH AKTIVE STRAHLUNG „AUS DEM UNTERSTOCKBEREICH“	- 118 -
5.9 BLATTTRANSPIRATIONSRATE	- 120 -
5.9.1 Verlauf der Blatttranspirationsrate und der Lufttemperatur in einer Unterstockbedeckung	- 120 -
5.9.2 Zusammenhang zwischen Blatttranspirationsrate und Lufttemperatur einer Unterstockabdeckung.....	- 124 -
5.9.3 Verlauf der Blatttranspirationsrate im Verhältnis zur Lufttemperatur und Blattoberflächentemperatur	- 127 -
5.9.4 Zusammenhang zwischen Blatttranspirationsrate und -oberflächentempera- tur.....	- 132 -
5.9.5 Blatttranspirationsrate in Abhängigkeit zum VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit)	- 135 -
5.10 GENERATIVE WUCHSLEISTUNG IN DEN VERSUCHSJAHREN 2021 UND 2022	- 137 -
5.10.1 Reifeverlauf: Mostgewicht 2021	- 137 -
5.10.2 Reifeverlauf: Mostgewicht 2022	- 140 -
5.10.3 Reifeverlauf: Gesamtsäuregehalt 2021	- 144 -
5.10.4 Reifeverlauf: Gesamtsäuregehalt 2022	- 148 -
5.10.5 Traubenertrag	- 151 -
5.11 VEGETATIVE WUCHSLEISTUNG ZWISCHEN 2021 UND 2022	- 154 -
6. KRITISCHE REFLEXION	- 156 -
7. ZUSAMMENFASSUNG	- 166 -
8. EMPFEHLUNGEN FÜR DEN PRAKTISCHEN WEINBAU.....	- 169 -
LITERATURVERZEICHNIS	- 171 -
INTERNETQUELLEN.....	- 184 -
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	- 186 -
TABELLENVERZEICHNIS.....	- 194 -
ANHANG.....	- 196 -

Abkürzungsverzeichnis

Ψ_g	gravimetrische Potential
Ψ_{leaf}	Blattwasserpotential
Ψ_o	osmotisches Potential
Ψ_{pd}	Frühmorgendliches Wasserpotential
Ψ_p	Druckpotential
Ψ_{shoot}	Triebwasserpotential
Ψ_{soil}	Bodenwasserpotential
Ψ_{stem}	Stammwasserpotential
Ψ_t	Gesamtbodenwasserpotential
$\Delta\Psi$	Wasserpotentialgradient
$\Delta\mu$	Potentialgefälle zwischen zwei Punkten
θ_v	Bodenwassergehalt (%v/v)
BBCH	Einheitliche Skala zur Kodierung der Phänologie; Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
BFV	Blatt-Frucht-Verhältnis
BF	Blattfläche (cm ²)
bspw.	beispielsweise
C_{mg NO₃/L}	Nitratkonzentration Blattstiel
CO₂	Kohlendioxid
D	Wasserdampfsättigungsdefizit zwischen Blatt und Luft
—	Eingekürzte Laubwand (0,70 m)
g_s	Stomatäre Leitfähigkeit (mol*m ⁻² * s ⁻¹)
h	Stunde
h	Höhe (m)
HH	Holzhäckselabdeckung Unterstock
HH-O	Holzhäcksel Unterstock Ostseite
HH-W	Holzhäcksel Unterstock Westseite
HH+	Holzhäckselabdeckung flächendeckend
HH+-O	Holzhäcksel flächendeckend Ostseite

HH+-W	Holzhäcksel flächendeckend Westseite
I	Stromfluss Teilchen
Kap.	Kapitel
KL	Kurze Laubwand
k_{plant}	hydraulische Leitfähigkeit
LL	Lange Laubwand
MB	Moderate Bewässerung
MB-O	Moderate Bewässerung Ostseite
MB-W	Moderate Bewässerung Westseite
N	Stickstoff
NK	Nitrat-Konzentration (mg NO_3/l)
NO_3	Nitrat
OB	Ohne Bedeckung
OB-O	Ohne Bedeckung Ostseite
OB-W	Ohne Bedeckung Westseite
° Oe	Oechsle
OT	Oberflächentemperatur
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
s	Sekunde
s.	siehe
THG	Treibhausgas
TR	Transpirationsrate ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$)
VPD	Wasserdampfsättigungsdefizit (hPa)
vgl.	vergleiche
$\Delta\mu$	Potentialgefälle
R	Transportwiderstand
ü. Gr.	über Grund

1 Zielsetzung

Die Landwirtschaft steht zunehmend vor der Hürde, eine nachhaltige Lebensmittelversorgung für eine wachsende Bevölkerung sicherzustellen und die Inanspruchnahme an Rohstoffen für die Herstellung neuartiger Produkte zu decken. Dies wird durch jährliche Änderungen hinsichtlich der Witterung und durch extremere Wettergeschehnisse (Hitze- / Dürrewellen) aufgrund des Klimawandels weiter angefeuert. Damit gegen diese Herausforderungen angegangen und das Produktionsrisiko minimiert werden kann, muss die Anpassungsfähigkeit ebenfalls im Weinbausegment bekräftigt werden. Heute wächst eine neue Generation heran, die brisant technische Geräte handhabt und zugleich ein umweltbewusstes Leben vermehrt in den Alltag rückt. Wenn sich langfristig auf die Herausforderungen des Klimaschutzes vorbereitet werden soll, müssen die zukünftigen Bedürfnisse der jüngeren Generationen auf eine Art und Weise gesichert und nachhaltige Mindeststandards auf globaler Ebene trotz Unklarheiten des Klimawandels erfüllt werden.

Zu Beginn des neuen Jahrzehnts wies die Pandemie die gesamte Menschheit in die Schranken, was einen großen Druck auf Winzer*innen und Landwirt*innen ausübte. Trotz der Aufrechterhaltung des Lebensmittelverkehrs innerhalb der EU während der Krise hat die Schließung der Grenzübergänge nicht nur für Engpässe in Sachen Verfügbarkeit von landwirtschaftlichen Arbeitskräften gesorgt, sondern auch zahlreiche Risiken der Globalisierung für eine regional – nachhaltige Nahrungsmittelversorgung offengelegt. Demzufolge müssen nachhaltige Anbau- und Arbeitsmethoden realisiert werden, welche ein „goldenes Puzzleteil“ zwischen intensiven, ökologischen und traditionellen Anbaumethoden darstellen. Sicher ist, dass der lokale Weinbau mit einem hohen Grad an Mechanisierung, Ressourceneffizienz und Qualitätsstandards immer wichtiger wird.

Längst gehört der Klimawandel zu den großen Aufgabenfeldern der Gegenwart und Zukunft. Die Änderung des Klimas ist ein globales Phänomen, welches auch in Rheinland-Pfalz sowohl Umwelt- als auch Gesellschaftsbereiche betrifft. Immer wieder auftretende Extremwetterereignisse stellen Winzer*innen vor erhebliche Aufgaben und verlangen gleichzeitig hohe Flexibilität im Arbeitsalltag. Der Wein ist eines der wichtigsten Naturprodukte der rheinhessischen Landwirtschaft. Doch der Klimawandel verändert die Anbaubedingungen bedingt durch längere Trockenperioden, höhere Lufttemperaturen, verstärkte Strahlungsintensitäten der Sonne und über das Jahr ungleich verteilte Niederschläge wie zuletzt die Flutkatastrophe an der Ahr im Juli 2021 uns vor Augen führte. Hiesige Hitzewellen zwingen die Weinbauer*innen zur langfristigen Bewässerung ihrer Weinbauflächen. Wassermassen von abertausenden Litern werden vereinzelt in Weinbergsregionen gepumpt, was auf lange Zeit gesehen ein fataler Fehler hinsichtlich des Grundwasserspiegels ist. Oftmals sind fehlende infrastrukturelle Gegebenheiten nicht vorzufinden, was das Bewässerungsnetz betrifft. Die ressourcenschonende Gestaltung des Wasserhaushaltes sollte daher vermehrt in den Mittelpunkt der Weinbauforschung gestellt werden. Unbestritten ist, dass die mit der globalen Erwärmung verbundene Klimaveränderung auch spürbare Auswirkungen für den rheinhessischen Weinbau mit sich

bringen wird. Der Klimawandel im deutschen Weinbau weist bereits folgende Merkmalserscheinungen auf (Schultz et al. 2016) :

- Eine Verfrühung der Vegetationsperiode um bis zu 14 Tagen ist zum jetzigen Zeitpunkt vorzufinden.
- Eine Zunahme längerer „Trockenperioden“ ohne Niederschläge in der Vegetationsphase → Trockenstress für die Rebe resultiert.
- Es treten massive lokale Niederschlagsereignisse mit großen Wassermengen im Frühjahr und in der Phase der Weinlese auf → Hochwassergefahr, Qualitätseinbußen herrschen vor.
- Ein erhöhter Schädlings- und Krankheitsdruck nistet sich in den Weinbauparzellen ein.

Im Bereich des Weinbausegments wurden bereits zahlreiche Anpassungsstrategien seitens der EU aber auch der Bundesrepublik Deutschland erforscht und entwickelt. Seit dem Jahre 2007 befasst sich das Bundesland Rheinland-Pfalz intensiv mit den Folgen des Klimawandels im Weinbau. Hierbei rückten Phänologie, Boden, Huglin-Index, Lufttemperatur aber auch der Wasserhaushalt in den Mittelpunkt der Analysen. Die Standardisierung der Rebenbewässerung ist längst ein probates Mittel in außereuropäischen Weinbauregionen. Aufgrund der in zahlreichen Weinbaugebieten stattgefundenen Erwärmung und der vorhergesagten zukünftigen klimatischen Veränderungen nimmt das Interesse an zusätzlicher Rebenbewässerung innerhalb des europäischen Weinbaus zu, um den regional vorhergesagten Witterungsverhältnissen entgegenzuwirken (IPCC 2013; Jones et al. 2005).

Für den Qualitätsweinbau spielen neben Pflanzenmaßnahmen und Fertigungsschritten, welche hohen Qualitätsanforderungen unterliegen, sogenannte Standorteigenschaften wie Boden, Klima und Lage sowie eine ausreichende Versorgung der Weinrebe mit Wasser und Nährstoffen eine bedeutsame Rolle (Vogt et al. 2000; Kadisch und Müller 2008). In Deutschland wird Weinbau daher nur in einigen klimatisch begünstigten Regionen an südexponierten Hang- und Steillagen, vor allem in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg, betrieben. Die wärmsten Weinbauregionen liegen in Baden und der Vorderpfalz, die kühleren Regionen in Sachsen und Saale-Unstrut (Schultz et al. 2016).

Das langjährige Niederschlagsangebot weist eine national bedeutende Spanne innerhalb der Vegetationsperiode von circa 290 mm in Rheinhessen (Alzey) und rund 570 mm in Baden (Freiburg) auf (Hoppmann und Hüster 1988). Der Wasserverbrauch von Reben ist zwischen ≈ 160 mm und ≈ 512 mm einzuordnen (Füri und Kozma 1977). Obwohl Weinreben angesichts ihres weitverzweigten und tiefgründigen Wurzelsystems zu den Pflanzen mit der höchsten Resistenz gegenüber dem Trockenstress zählen, lassen sich bei Wassermangel enorme Beeinträchtigungen in Bezug auf die Rebenentwicklung feststellen (Patzwahl 2007). Das daraus resultierende Wasserdefizit inmitten der Vegetationsperiode muss letzten Endes mit den winterlich gespeicherten Bodenwasservorräten aufgefangen werden (Hannemann 1961; Hüster 1993). Der Schwerpunkt des deutschen Weinbaus wird in Hang- und Steillagen betrieben, geprägt durch geringe Mächtigkeit und skeletthaltige Bodenstrukturen. Unter diesen Gegebenheiten können Reben unter

Berücksichtigung der Bodenart, Mächtigkeit und Hangneigung die örtlichen Bodenwasservorräte völlig aufbrauchen und in langanhaltenden Trockenperioden in Wasserarmut geraten. Aus diesem Grund beschäftigt sich die deutsche Weinbauforschung mit dem Themengebiet der Zusatzbewässerung. So konnten beispielsweise mithilfe des Einsatzes detaillierter physiologischer Parameter, welche exakt den Pflanzenwasserstatus der Reben ermitteln, eine Reduzierung von Gefahren und Risiken der Überbewässerung impliziert werden (Rupp 2005; Gruber und Schultz 2006; Prior 2006b). Als Vorreiter mit Blick auf Bewässerungsprojekte lässt sich seit Neustem Iphofen nennen, welches mit rund zehn Millionen Euro bezuschusst wurde, um ihren Steillagenweinbau mit 262 ha auch langfristig erhalten und bewirtschaften zu können. Bewerkstelligt wird dies durch eine sieben Kilometer lange Pipeline vom Main in einen Iphofener Speichersee, 180.000 m³ groß (Lenz 2021).

Demgegenüber geht aus einer bereits durchgeführten empirischen Untersuchung im Fachbereich Raum- und Umweltplanung der TU Kaiserslautern, welche einen Eindruck über das Meinungsbild der rheinhessischen Winzer*innen hinsichtlich der Wasserversorgung von Reben verleiht, hervor, dass einer *„Ressourcenschonung eine immer größere Rolle zuzuordnen ist. Zum anderen sind Bewässerungssysteme viel zu kostspielig. [...] Außerdem ist es in einigen Bundesländern verboten, das Grundwasser anzuzapfen.“* (Ihrig 2020).

Die ökologische Rechtfertigung, den Grundwasserspiegel durch weiterhin stattfindende Bewässerungsmaßnahmen abzusenken, sollte in diesem Falle in Frage gestellt werden.

„Bewässerungssysteme aufzubauen, ist technisch kein Problem. Digital kann man das wunderbar steuern. „Aber darf man ein knapper werdendes Gut wie beispielsweise das Grundwasser für den Weinbau langfristig einsetzen? In Australien laufen die Debatten längst – und zwar heftig“, so Ihrig (2020).

Die zu entwickelnde Wasserhaushaltsstrategie für den rheinhessischen Weinbau kann vor diesem Hintergrund nur nachhaltig ausgerichtet sein und folgende Ziele verfolgen:

- Eine effektive und ressourcenschonende Nutzung des Bewässerungswassers.
- Ein Erosionsschutz durch sicheres Begrünungsmanagement der offenen Gassen.
- Der Erhalt der Weinkulturlandschaft im Flach- und Hügelland.
- Den Aufbau leistungsfähiger und vitaler Rebanlagen
- Eine Qualitätssicherung des Weinbaus
- Eine Produktivitätssicherung der Betriebe

Untermauert wird diese Denkweise durch Herrn Prof. Dr. Schultz von der Geisenheimer Weinbauuniversität, welcher 2021 berichtete, dass die Durchschnittslufttemperatur im Hitzesommer 2018 den Verhältnissen im Weinbaugebiet Adelaide Hills in Australien entsprochen habe.

Grundsätzlich fördert eine gute Wasserversorgung das vegetative Wachstum, wodurch die Aufnahme der Strahlungsenergie gesteigert wird, was schlussfolgernd in einer aufgewerteten Assimilatsynthese der Rebe widerkehrt (Choné et al. 2001a). Smart konnte 1985 bestätigen, dass ein stark ausgeprägtes Wachstum die Beerenqualität negativ

beeinflusst, unter Berücksichtigung der Assimilatkonkurrenz bei sowohl generativ als auch vegetativer Entwicklung. Ein dadurch verstärkter Wuchs kann die individuelle Intensität der Beerenbelichtung hemmen, was folglich eine Veränderung des Laubwandklimas nach sich zieht (Ojeda et al. 2001). Verringerte oberflächige Beerentemperaturen und hieraus folgend eine erhöhte Gesamtsäure im Most sind Folgeerscheinungen (Smart 1985).

Nach Jackson und Lombard (1993) kann ein erhöhtes Wasserniveau der Weinreben in Zeiten des Reifebeginns eine Verlangsamung der Reife bewirken. Herrscht hingegen bei Reben ein moderater Trockenstress, ist eine aufgewertete Zuckerakkumulation in den Beeren wahrzunehmen, was in erster Linie aus dem verringerten vegetativen Wuchs und folglich einer optimierten Bereitstellung von Assimilaten darzulegen ist, so Koundouras et al. (1999). Physiologische Prozesse wie zum Beispiel das vegetative Wachstum und die stomatare Leitfähigkeit der Blattschließzellen sind an das frühmorgendlichen Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) gekoppelt, welches sich zur Bestimmung des Wasserstatus und schließlich zur exakten Bewässerungssteuerung der Weinreben etabliert haben (Schultz und Steinberg 2002a, 2002b). Die Analyse des Ψ_{pd} , welches mittels der Scholander-Druckkammer kurz vor Sonnenaufgang bestimmt wird, ist durch seine Destruktivität (Blattentnahme) charakterisiert (Scholander et al. 1965). Demgegenüber dient die Ermittlung des mittäglichen Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) zur Datengewinnung unter Berücksichtigung klimatischer Einflussfaktoren. Mittels dieser Wasserpotentialmessmethoden konnten langjährige Versuche in rheinhessischen Steillagen belegen, dass der Wasserhaushalt durch eine flächendeckende Bodenabdeckung (Stroh und Holzhäcksel) in teilflächenbegrünter Reihen und einer Tropfbewässerung stetig verbessert werden konnte. Wasserverluste durch eine stattfindende Verdunstung über dem Boden, Rebenvitalität, Infiltration von Niederschlag und eine herabgesetzte Evaporation konnten positive Effekte bewirken (Prior 2006b). Des Weiteren wird das Mikroklima im Weinberg durch die Laubwandstruktur mitbestimmt. Die durchgeführten Laubarbeiten nehmen immensen Einfluss auf die Photosyntheseleistung, was durch eine optimale Belüftung und Belichtung gewährleistet wird. Hohe Photosyntheseleistungen der Laubwand erzielen erhöhte Mostgewichte¹. Eine bedeutende Einflussgröße auf den Zuckerertrag betrifft das Blatt-Frucht-Verhältnis (BFV), welches eine optimale Zuckereinlagerung bei sieben Haupttriebblätter pro Traube vorweist (Riesling/Burgunder). Im praktischen Weinbau wird dies durch die Höhe der Laubwand realisiert. Verkürzte Laubwandstrukturen konnten bereits reduzierte Mostgewicht und eine Verzögerung der Reife vorweisen (Schiefer und Gunnar 2018; Heßdörfer 2020a; Haas et al. 2014). Eine weitere Hürde wird dem zukünftigen Weinbau in Sachen „Glyphosat-Verbot“ ab dem 31.12.2023 gestellt. Der Einsatz von Pestiziden, speziell Herbiziden, wird von vielen Verbrauchern und damit Weinkonsumenten zunehmend kritisch wahrgenommen. Aus diesem Grund verzichten mittlerweile viele Weinbaubetriebe auf den Einsatz von Herbiziden und setzen in der

¹ Mostgewicht ist die Zahl, welche angibt, um wie viel Gramm ein Liter gepresster Saft (Beeren) schwerer ist als ein Liter Wasser bei 20 K. Das Mostgewicht ist abhängig vom Zuckergehalt, sodass man dieses zur Qualitätsbeurteilung heranzieht. Die Messkala wird in Oechsle-Grade angegeben (Jakob 2012).

Unterstockbodenpflege auf mechanische Verfahren wie Rollhacke, Scheibenpflug und Räumschar. Diese soll zum jetzigen Zeitpunkt eine Möglichkeit darstellen, den Wuchs des Unkrautes im Unterstockbereich entgegenzuwirken.

Aufgrund dessen war das Ziel der vorliegenden Arbeit, aufbauend auf das flächendeckende Holzhäckselprinzip in Steillagen von Prior (2003 - 2012) eine Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich in Flachlage auf die Anwendungsmöglichkeiten bei Rieslingreben zu generieren und hiermit über einen längeren Zeitraum das Pflanzenwasserpotential zu messen. Begünstigt wurde die Felduntersuchung durch eine Unterstockbearbeitung mittels Rollhacke in allen Versuchsvarianten, was zugleich als mechanische Glyphosat-Alternative dienen sollte. Weiterhin sollte der Einsatz der Scholander-Druckkammer und der Unterstockabdeckung dazu führen, Forschungsdefizite innerhalb des Wasserhaushaltes von Rieslingreben im System Boden-Pflanze-Atmosphäre zu bearbeiten und den Einfluss unterschiedlicher Umwelteinflüsse auf die Disparitäten der Wasserpotentiale darzustellen. Folgende Klassifizierungen der Erhebungsformen wurden vorgenommen: MB = Moderate Bewässerung, OB = Ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel. Darüber hinaus wurden Blatttranspiration-CO₂-Blattaufnahme-, Blatt-Nitratstiel-, Oberflächentemperaturen-, Bodenfeuchte- und UV-Messungen durchgeführt. Der letzte und abschließende Themenblock stellt den Einfluss der Abdeckungsvarianten auf die generative und vegetative Wuchsleistung der Rebsorte Riesling dar. Darüber hinaus wurde für jede Erhebungsform zwischen herkömmlicher Laubwandlänge (1,40 m) und verkürzter Laubwand (0,70 m) unterschieden, um mögliche Reifeverzögerungen zu praktizieren und zu untersuchen.

2 Forschungsleitende Fragestellung und Forschungsstrategie

Im Rahmen dieser Arbeit wurde primär folgende Forschungsfrage am Versuchsstandort Pfeddersheim-Kreuzblick validiert:

„Erprobung von Wasserpotentialmessungen sowie die Einflussnahme einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich und variierter Laubwandhöhe auf die generative und vegetative Wuchsleistung von *Vitis vinifera* [cv. Riesling].“

Dahingehend wurden zwei Leitfragen definiert, welche sich durch untergruppierete Themengebiete konkretisieren lassen:

1. *Wie ist die Trockenheitstoleranz einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich anhand wechselnder Witterungsbedingungen einzuschätzen?*

- Der Verlauf und die Einflussnahme von meteorologischen Aspekten auf das mittägliche Stammwasserpotential stellen den ersten Untersuchungsbaustein dar. Hierzu dient der Vergleich des Vapor Pressure Deficit (VPD), auch Wasserdampfsättigungsdefizit genannt, des Niederschlags, der Globalstrahlung, der relativen Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur mit dem mittäglichen Stammwasserpotential (Ψ_{stem}). Dies soll aufzeigen, welchen Einfluss die jeweiligen Untersuchungsparameter auf das Ψ_{stem} unter variierenden Wasserhaushalten der Versuchsformen einnehmen.
- Des Weiteren dienen Wasserpotentialverläufe des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials als zweiten Untersuchungsgegenstand. Um den Einfluss einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich zu untersuchen, werden diese auf den Zusammenhang zwischen frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen (Ψ_{pd}), Bodenfeuchte (θ_v) und Niederschlag näher beleuchtet. Als Gegenstück dient die Einflussnahme einer moderaten Tropfbewässerung (oberirdisch). Ziel ist es hierbei zu untersuchen, inwiefern eine natürliche Unterstockbedeckung gegenüber der gezielten Bewässerung einen temporär gleichwertigen Wasserstatus bieten kann.
- Der Verlauf und die Einflussnahme der Transpirationsrate mit den meteorologischen Parametern der Lufttemperatur und dem VPD dienen als drittes untersuchungsgebiet. Aufbauend wird der Tagesgang herangezogen, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede aufzeigen zu können. Zusätzlich werden die ermittelnden Oberflächentemperaturen (Beeren, Blatt und Boden) mitberücksichtigt und einbezogen. Welche der Untersuchungsvarianten die höchsten bzw. niedrigsten Blatttranspirationsraten und Oberflächentemperaturen aufgrund eines verbesserten bzw. verminderten Wasserhaushaltes aufzeigen, gilt es hierbei forciert zu untersuchen.

- Im Erhebungsjahr 2022 wurde die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) im Unterstockbereich in den Untersuchungen mitaufgenommen. Hierbei wird die einfallende Globalstrahlung im Unterstockbereich der Reben erfasst und zeitgleich in PAR-Strahlung umgerechnet. Anschließend wird der UV-Sensor in umgekehrter Richtung im Beeren-/Laubwandbereich montiert, um so die rückgestrahlte Strahlung zu erfassen. Dies soll einen Aufschluss über individuelle Unterschiede der Oberflächentemperaturen aufgrund verschiedenartiger-fablicher Bodenoberflächen im Unterstockbereich wie z.B. Holzhäcksel oder Lehm-Löß-Boden jeder Erhebungsvariante liefern.

- Ebenfalls wurde die CO₂-Messung am Rebblatt ab 2022 erhoben. Diese Teiluntersuchung wird zur Mittagszeit 12:00 bis 13:30 Uhr am gleichen Tag der durchzuführenden Blattwasserpotentialmessungen erfasst. Innerhalb eines 5-minütigen Zeitfensters werden Rebblätter jeder Versuchsvariante auf ihre CO₂-Aufnahme mittels CO₂- und UV-Sensor untersucht. Der jeweilige CO₂-Aufnahmeverlauf soll zusätzlichen Einblick über den Wasservorrat im Boden und folglich über die Photosyntheseaktivität der Versuchsvarianten verschaffen und untermauern.

- Das letzte Themengebiet, welches inmitten der ersten Leitfrage untersucht wurde, lässt sich durch die gezielte Stickstoffversorgung mittels Nitrat-Blattstiel-Test ab 2022 darstellen. Messstart ist mit Beginn der Blüte (BBCH61) bis abgehende Blüte (BBCH68). Die im Frühjahr eingearbeitete Herbst-/Winterbegrünung wird im Boden eingearbeitet, wodurch Stickstoff freigesetzt wird = Grundbaustein für Stickstoffhaushalt der Reben. Der Test, welcher am Blattstiel vollzogen wird, dient zur Ermittlung von Unter-/übersorgten Reben, welche Rückschlüsse auf möglichen Wasserstress schließen lassen. Photosynthese, Mostgewicht und Vitalität des Blattwerks sind durch die Zufuhr von Stickstoff durch ausreichende Wasserverfügbarkeit bestimmt.

Innerhalb dieser Untersuchungen wird zwischen Laubwandeinkürzung (0,70 m) und normaler Laubwandlänge (1,40 m) unterschieden.

2. Welchen Einfluss nimmt eine Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich auf die vegetative und generative Wuchsleistung?

- Die Untersuchung der individuellen Reifeparameter jeder Versuchsvariante wie Unterstockabdeckung, flächendeckende Abdeckung, moderate Bewässerung und Kontrollvariante werden differenziert beleuchtet. Hierzu zählt das Mostgewicht, der Säuregehalt, der Trauben- und Zuckerertrag (generativ) sowie das Schnittholzgewicht (vegetativ). Inwiefern es im saisonalen Vegetationsverlauf zu signifikanten Unterschieden zwischen vegetativen und generativen Wachstum der Varianten kommt, gilt es zu erarbeiten.

Innerhalb dieser Untersuchungen wird zwischen Laubwandeinkürzung (0,70 m) und normaler Laubwandlänge (1,40 m) unterschieden.

Diese Fragen stehen stellvertretend für die wichtigsten Teilfragen, die zur Klärung des Wassermanagements im flachlagigen Freilandversuch von Interesse sind. Im Erhebungsrahmen werden aufgrund einer ausgebrachten Unterstockbedeckung folgende Parameter berücksichtigt:

- Gewährleistung einer saisonalen Bearbeitung der offenen Gassen durch eine im Herbst eingesäte Herbst- und Winterbegrünung
- Einkürzung der Laubwand soll eine Reifeverzögerung hervorrufen
- Minimierung von Stressfaktoren der Weinreben:
 - Wasserstress
 - Geringere Öchsle
 - Aufrechterhaltung der Säure
 - Sicherung der Erträge
 - Herabsetzung der Oberflächentemperaturen (Boden-, Beeren- und Blatttemperatur)

Die vorliegende Arbeit ist in 8 Kapitel untergliedert, wobei Kapitel 1 (Zielsetzung), Kapitel 2 (Forschungsleitende Fragen) und Kapitel 3 den theoretischen Rahmen widerspiegeln. Das Augenmerk dieses Kapitels liegt auf dem Auslöser des Klimawandels, den Ansprüchen der Rebe und der Frage, welche Bedeutung das Wasser der Rebanlage bzw. das Wasserpotential bei Reben einnimmt (Kap. 3.1 – 3.5). Der Einfluss von bisher erprobten Bodenbedeckungen, physiologischen Prozessen, das Einkürzen der Laubwände, Transpiration durch Umweltfaktoren, Photosynthesebedingungen, die Aufnahme von CO₂ bzw. der Stickstoffhaushalt bilden den zweiten Abschnitt dieses Kapitels (Kap. 3.6 - 3.10). Die Charakterisierung des Untersuchungsgebietes ist Inhalt von Kapitel 4. Zu Beginn wird die Struktur des Versuchsstandortes (Kap. 4.1) gefolgt von der deutlichen Hervorhebung des Messgegenstandes dargestellt (Kap. 4.2). Abgesehen von der Ergebnisdarstellung kennzeichnet Kapitel 5 einen elementaren Bestandteil dieser Arbeit, da hierbei tiefgründig die Untersuchungsmethodik des Messverfahrens herausgestellt wird bzw. der Unterschied

der für diese Arbeit gewählten Erhebungsform die der Unterstockabdeckung von der bereits vorherrschenden moderaten Bewässerung und der flächendeckenden Bedeckung dargelegt wird (Kap. 5.2 – 5.11). Die bereits veranschaulichten Ergebnisse in Kapitel 5 werden mit bereits bestehender wissenschaftlicher Literatur in der kritischen Reflexion (Kapitel 6) verknüpft. Zusammenfassung (Kapitel 7) und Empfehlungen für den praktischen Weinbau (Kapitel 8) runden diesen durchgeführten Versuch ab.

3 Theoretischer Hintergrund

Zu den Folgen der Globalerwärmung gehört längst eine sich verändernde Pflanzenentwicklung, so auch die der als wärmeliebend bekannten Weinrebe. Folgeerscheinungen können sich sowohl positiv als auch negativ und zugleich regional verschieden ausprägen. Räumliche Umweltaspekte wie Wasser, Sonneneinstrahlung, Lage aber auch Bodeneigenschaften treten täglich in Kontakt mit der Rebe. Sie beansprucht spezielle klimatische Bedingungen, besitzt allerdings je nach Unterlage und Sorte ein individuelles Anpassungsvermögen an die sich verändernden Verhältnisse. So weisen zahlreiche Sorten ein breites Anbauspektrum auf, wohingegen autochthone Rebsorten eine eingegrenzte Anbaubreite mit sich bringen. Aufgrund individueller Gegebenheiten haben sich diese unter Berücksichtigung des Terroirs sukzessiv entwickelt und demzufolge eine gebietstypische Weinqualität geschaffen, wie sie im Aushängeschild Deutschlands, dem Riesling, wiederzufinden ist.

3.1 Ausgangspunkt und Ursache des Klimawandels

Das Klima unseres Planeten Erde wird direkt und indirekt durch verflochtene Interaktionen der Atmosphäre mit der Hydrosphäre (Wasser), der Lithosphäre (Boden), der Kryosphäre (Eis) und der Biosphäre (Pflanzen und Tiere) suggeriert. Eitzinger und Heilig (2021) sprechen aufgrund des klimawirksamen Verhaltens des Menschen sogar von einer sogenannten „Anthroposphäre“. Das Klimasystem der Erde zeichnet sich unter anderem durch die absorbierte Energie der Sonne, also der Solarenergie, aus. Die Gestalt der Erde und die Eigenschaften ihrer Bewegungen bestimmen grundsätzlich die räumliche und zeitliche Verteilung der aufgenommenen solaren Energie. Ein weiterer bedeutungsvoller Faktor für das Klima ist der Treibhauseffekt, gekennzeichnet durch verschiedenartige atmosphärische Gase. Gasmoleküle, definiert durch drei oder mehr Atome, besitzen die Eigenschaft, langwellige thermische Strahlungen zu absorbieren, während das kurzwellige Sonnenlicht fast uneingeschränkt durchgelassen wird. Eine Erwärmung der unteren Luftschichten der Erdatmosphäre ist die Folge (Szalay et al. 2021). Wasserdampf ist zweifellos das wichtigste Treibhausgas (THG), welches die globale Lufttemperatur ansteigen lässt. Zusätzlich hat Kohlendioxid (CO_2) zu seiner maximalen Absorption bei $15 \mu\text{m}$ die Sättigung zur Absorption zusätzlicher Wärmestrahlung bei der aktuellen Kohlendioxidkonzentration der Atmosphäre bei weitem noch nicht erreicht (Weigel et al. 2005). Dies lässt nachvollziehen, weshalb CO_2 das wichtigste Treibhausgas für die anthropogene Klimaerwärmung ist. Hierzu hat sich die Hochschule Geisenheim mittels Face2Face Projekt auf eine Simulation erhöhter CO_2 -Konzentration spezialisiert (weitreichendere Informationen in Kapitel 3.2.1 Lufttemperatur). Mit der Erwärmung des Klimas werden Extremereignisse wie Hitze- und Trockenperioden zur Regelmäßigkeit, was ein immer größer werdendes Problem für den landwirtschaftlichen Sektor darstellt. In Mitteleuropa sind die Sommer in allen Regionen heißer geworden (C3S 2021). Die kühlest Sommermonate in den letzten 25 Jahren waren wärmer als der langjährige Durchschnitt vor 1990 (Szalay et al. 2021). Die drei heißesten Sommerperioden nach Beginn der Messaufzeichnungen traten in Mitteleuropa nach der Jahrtausendwende 2000 auf, wie zum Beispiel in Deutschland 2003, 2018, 2019 und in der Schweiz 2003, 2015 und 2019. Wein wird als

eine langjährige intensive Dauerkultur mit einem geringen Maß an Sortenwechsel als ein sehr guter Klimazeiger und als eine Referenzkultur für phänologische Trends angesehen. In den mitteleuropäischen Anbaugebieten zeigte sich in den zurückliegenden 30 Jahren eine im Mittel um bis zu 30 Tage früher einsetzende Phänologie (Jones et al. 2005). Doch nicht nur Parameter innerhalb der Phänologie, sondern auch eine Vielzahl von qualitätsrelevanten Inhaltsstoffen des Weines verändern sich durch die spürbare globale Erwärmung, wie Zucker- und Säuregehalt der Beeren, wobei die Zuckergehalte (°Oechsle) zu- und die Säuregehalte abnehmen. Entwicklungsphasen wie Austrieb, Blüte und Reife setzen zudem verfrüht ein. Insbesondere Disparitäten von Lufttemperatur- und Niederschlagsänderungen in Verbindung mit Wind, erhöhter Strahlung, reduzierter Luftfeuchte lassen durch die gesteigerte Verdunstung erhöhte Wasserbilanzdefizite aufkommen. Bereits erwähnte Klimaaspekte, welche für die Rebe unabdingbar sind, werden im Folgenden näher beleuchtet.

3.2 Klimabedingungen der Rebe

Optimale Photosyntheseleistungen sind für das Wachstum der Rebe essentiell und zeigen sich erst im Zusammenspiel von Licht, Kohlendioxidgehalt, Wasser(-haushalt) und Lufttemperatur. Damit eine Rebe sich tatkräftig entwickeln kann, stellt sie grundlegende Anforderungen an Niederschlag, Lufttemperatur, Sonnenscheindauer und Vegetationszeit. Zu berücksichtigen ist, dass individuelle Faktoren, welche Auswirkung auf das Wachstum der Rebe und die Reifeentwicklung der Beeren haben, sich nicht explizit abstecken lassen. Erst im Zusammenspiel vielseitiger Elemente wie der Flachlage des Weinbergs, Geländeklima, Boden und Exposition lässt sich erkennen, ob sich gepflanzte Rebstöcke nach ihren Ansprüchen auf höchstem Niveau entwickeln können (Hoppmann 2010; Redl et al. 1996). Den internationalen Erwartungen zufolge wird die Oberflächentemperatur zukünftig rapide ansteigen, wodurch bereits eine Fülle von Szenarien entwickelt wurden, um antizipatorisch die bevorstehenden Temperaturänderungen zu prognostizieren (Pachauri und Mayer 2015).

3.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur stellt einen messbaren Wärmezustand eines Gegenstandes dar. In der Meteorologie spielt diese eine elementare Rolle, was sich gleichermaßen auf Pflanzen, so der Weinrebe, übertragen lässt. Diese Untergruppierung der Lianengewächse hat einen hohen Anspruch hinsichtlich Lufttemperatur und gilt im Vergleich zu anderen bei uns angebauten Kulturpflanzen als temperaturempfindlich: Warmkennzeichnende Biotope sind das Ideal der Rebe. Der hier zu nennende Grund ist die saisonal stattfindende phänologische Entwicklung, welche größtenteils durch die Lufttemperatur bestimmt wird. Strahlungsintensität und -dauer sowie die aus ihr resultierende Photosyntheseleistung sind nach der Blüte von höchster Priorität. Um diese Parameter zukünftig besser nachvollziehen und alternative Arbeitsmethoden entwickeln zu können, wird seit 2014 an der Hochschule Geisenheim University eine Versuchsanlage betrieben (Face2Face-Projekt), um Auswirkungen und Folgen eines erhöhten CO₂-Gehalts der Luft, welcher bis 2050 prognostiziert wird, auf den Weinbau zu untersuchen. Ziel ist es, Einflussfaktoren von steigender atmosphärischer Erwärmung, CO₂-Konzentration und geänderter

Wasserverfügbarkeit auf das Wechsel- und Zusammenspiel von Pflanze-Umwelt zu erforschen (Müller 2014).

Studien über das vegetative Wachstum der Weinreben haben jedoch gezeigt, dass gerade der Beginn der Vegetationsperiode ausschließlich über die Lufttemperatur bestimmt wird (Buttrose 1969). Eine Jahresdurchschnittslufttemperatur von etwa 9 °C als Mindesttemperatur wird begrüßt. In Rheinland-Pfalz lag 2020 die Jahresdurchschnittstemperatur bei rund 11 °C, d. h. um etwa 2,1 K über dem langjährigen Mittel (1971-2000) von 8,9 °C und demzufolge im Soll (DDW 2021). Kaltlufteinbrüche können allerdings der Rebe auch teuer zu stehen kommen. Maifröste sorgen gerade nach der ersten phänologischen Phase des Austriebs bei Winzer*innen für Aufsehen und Bangen. Als Orientierung der durchschnittlichen Lufttemperatur im Juli sind 18 °C für einen qualitativen Weinbau empfehlenswert (Redl et al. 1996). Das Wachstumsoptimum des Rebstocks liegt bei ca. 26 °C, während das Wachstumsmaximum bei rund 38 °C erreicht wird. Von einem Hitzetod spricht man bei Lufttemperaturen, die jenseits von 45 °C liegen (Buttrose 1969; Hoppmann 2010). In Bezug auf simulierte Emissionsszenarien weisen diese im niedrigsten Intervallbereich einen Lufttemperaturanstieg bis Ende des Jahrhunderts von 1,7 °C auf. Im höchsten Emissionsszenario, welches die heutigen Emissionen widerspiegelt, beträgt der maximale Lufttemperaturanstieg 4,8 °C (Cubasch et al. 2013).

Der klimatische Grenzbereich, in welchem sich der Großteil des Weinanbaus befindet, wurde von Redl et al. (1996) zwischen den 10° und 20° Isothermen festgelegt. Forschungsergebnisse von Schultz (2010) ergaben eine detailliertere Abgrenzung der Isotherme von 12° - 22° und entkräfteten den von Redl et al. (1996) ernannten klimatischen Grenzbereich aufgrund der nicht berücksichtigten winterlichen Lufttemperaturen. Sowohl Bonada und Sadras (2015) als auch Gouot et al. (2019) publizierten Messergebnisse zur Untersuchung der Lufttemperaturwirkung auf Weinreben. Reaktionsmuster von direkten und indirekten Methoden auf Temperaturverläufe brachten positive Erkenntnisse mit sich, was eine Umgestaltung der Flavonoidzusammensetzung² mit der Lufttemperatur miteinander korrelieren lässt. Temperaturdauer und mannigfache Höchsttemperaturen der Luft wurden allerdings außer Acht gelassen. Tag/Nacht-Lufttemperaturregime und phänologische Phasen wurden in diesen beiden Untersuchungen berücksichtigt. In einem experimentellen System von Brandt et al. (2019) konnte mithilfe einer künstlich erzeugten Erwärmung im Bereich der Bündelzone der Traubenbeeren eine Trennung von Wärme und indirekter Wärme durch Sonneneinstrahlung getrennt werden. Dieses passiv erzeugte Erwärmungsszenario erwies sich durch eine Reduzierung der Apfelsäure, kleinteiligere Beeren und einer Veränderung im Glukose-/ Fruktose-Verhältnis. Für zukünftige Klimasimulationen unter steigenden Temperaturbedingungen der Luft wurden bzw. werden verändernde Beerenreifeparameter bestätigt.

Die globale Erwärmung hinterlässt ihre Spuren in der Landwirtschaft, genauer gesagt auch im Weinbau. Das rheinland-pfälzische Juwel Riesling ist eine Weinrebe, welche für

² Die Flavonoide sind eine Gruppe von wasserlöslichen Pflanzenfarbstoffen und spielen eine wichtige Rolle im Stoffwechsel vieler Pflanzen. Sie gehören zusammen mit den Phenolsäuren zu den Polyphenolen (Graf et al. 2005).

kühlere Regionen prädestiniert ist, womit einhergeht, dass es wichtig ist, dem Einfluss von abiotischen Aspekten auf die Zusammensetzung des Beerengefüges zu verstehen und nachhaltig anzupassen, um den steigenden Lufttemperaturen gerecht zu werden.

3.2.2 Strahlungsintensität und Sonnenscheindauer

„Eine allgemeine Zeitspanne, während der Sonnenschein ermittelt wird, also die Zeit, in welcher die Sonne direkt auf die Erdoberfläche strahlt“, ist die Beschreibung für die vorherrschende Sonnenscheindauer (Michael 2016). Sie gilt als Haupttader der Bodenerwärmung und Photosynthese der Weinrebe. Der vieljährige Mittelwert (1991-2020) der nationalen Sonnenscheindauer beträgt 1665 h Jahr^{-1} , wobei regionale Unterschiede zu verzeichnen sind (Mühr 2021). Trotz der unter dem bundesweiten Durchschnitt liegenden Sonnenstunden in Rheinland-Pfalz (1637 h Jahr^{-1} = vieljähriger Mittelwert 1991-2020) können innerhalb des größten Anbaugebietes Deutschlands deutliche Disparitäten vernommen werden: Mit über 1600 Sonnenstunden pro Jahr zählt die Vorderpfalz und Südpfalz zu den sonnenreichsten Landesregionen überhaupt. Rheinhessen mit rund 1650 Sonnenstunden und dem Breisgau bei Freiburg mit 1720 Sonnenstunden gehören zu den führenden Weinbauregionen in Deutschland hinsichtlich der kostbaren Sonnenscheindauer (Michael 2016). Allerdings ist der Fokus innerhalb der Rebenentwicklung, also in der Vegetationszeit, nicht außer Acht zu lassen. Gerade im Weinbau ist die Sonnenscheindauer in der Vegetationszeit (April-Oktober) einer der wichtigsten Wegbegleiter weswegen mindestens zwischen 1200 und 1800, maximal 2100 Sonnenstunden erreicht werden sollten (Bauer und Amann 2002; Priewe 2017). Wird die größte Weinanbauregion Deutschlands näher forciert, so zeigt Rheinhessen auf das langjährige Mittel (1991-2020) bezogen eine Dauer des Sonnenscheins von 1995 h auf (Agrarmeteorologie RLP 2023). Eine zu hohe und langanhaltende Sonnenscheindauer ohne ausreichenden Niederschlag kann sich zudem auf die Stilistik des Weines auswirken. An extrem heißen Sommertagen bzw. bei sich nicht reduzierenden Nachttemperaturen der Luft kommt es zu einem rapiden Abbau der Säure und einer Umgestaltung des Zucker-Säure-Verhältnisses im Wein, was sich schließlich im Gesamtsäuregehalt des Weins ausdrückt (Schönthaler und Andrian-Werbung 2015).

Die Einflussnahme von abiotischen Parametern auf die Zusammensetzung der Phenole in Traubenbeeren wurde von Blancquaert et al. (2019) detailliert zusammengeführt, wodurch die Flavonolkonzentration mit steigender Lichtexposition und einem berücksichtigenden Wasserdefizit zunimmt. Eine Reduzierung von UV-Strahlung bringt eine Verminderung der Flavonolkonzentration mit sich. Temperatureffekte der Luft mittels direktem Erhebungsverfahren für lösliche Feststoffe und titrierbarer Säure bewirkten Temperaturanstiege; ein Vorziehen des Austriebs und die einhergehende Verkürzung der Ernte. Eine induzierte Frühreife ist auf Lufttemperaturveränderungen und daran geknüpfte Prozesse wie das Wasserdefizit gekoppelt (Duchne und Schneider 2005; Bock et al. 2011; Vršič und Vodovnik 2012). Die Herausforderung und der klimatische Trend birgt einen Alkoholanstieg mit sich. Jährliche Anstiege von rund 0,08 % vol. wurden aus dem Elsass evaluiert. Der Riesling zeichnet sich durch eine Ausgewogenheit von Säure und Süße aus. Steigende Strahlungsintensität und -dauer, gekoppelt an höhere Lufttemperaturen minimieren die titrierbare Säure aufgrund einer Herabsetzung der Apfelsäure (Schultz 2005).

Sonnenstunden von > 1600 h innerhalb der Vegetationsperiode bedeuten eine erhöhte Zuckerproduktion in den Beeren, wodurch sie alkoholreicher, säureärmer und weniger fruchtig für den Endkonsumenten wirken. Aktuell werden Weißweine tendenziell mit möglichst moderatem Alkoholgehalt nachgefragt. Es zeigt sich, dass die prognostizierten Alkoholgehalte sowohl national als auch international bei Weißweinen ansteigen werden (Schultz et al. 2012). Die jeweiligen Teilkomponenten verleihen speziell dem Riesling seine Struktur, was sich in einem fruchtigen Geschmacksbild widerspiegeln soll.

3.2.3 Niederschlag

Wasser ist die wichtigste Ressource für den globalen landwirtschaftlichen Anbau und wird vom Klimawandel in seinem räumlich-zeitlichen Vorhandensein stark beeinflusst. In zahlreichen Regionen der Erde ist zunehmend Wassermangel für die Weinproduktion einer der größten Herausforderungsparameter (Koochafkan 2011; Pretty et al. 2010), da aus globaler Sicht rund ca. 70 % der verfügbaren Süßwasserreserven aus Oberflächengewässern und Grundwasser für Bewässerungsmaßnahmen beansprucht (Siebert und Döll 2007; Wisser et al. 2008) und die zu bewässernden Flächen weiterhin zunehmen werden (D'Odorico et al. 2020). Etzinger et al. (2019) rät eine Verbesserung von mannigfaltigen Stellschrauben zu forcieren, um die Effizienz der Wassernutzung von Pflanzenbeständen zu stärken:

- Verbesserung der verfügbaren Wasserressourcen
Dies betrifft Bodenwasserreserven, welche Winzer*innen durch entsprechende Bodenbewirtschaftungen (bspw. Herbst-/ Winterbegrünung) optimieren können. Sowohl die Bodenwasserspeicherkapazität als auch das Wassereinsickerungsvermögen können beispielsweise durch Bodenerosionsschutz, Humusaufbau, Förderung der Bodenstruktur und aktives Bodenleben sowie richtiges Zeitmanagement von Bodenbearbeitungsmaßnahmen gefördert werden.
- Steigerung der Verdunstungswiderstandes
In der gesamten Pflanzenwelt, so auch bei Reben, spielt ein optimaler Spaltöffnungsmechanismus eine essentielle Rolle, da die Transpiration den Motor des Wasserverbrauches (> 80 %) beansprucht. Eine Beeinträchtigung der Spaltöffnungszellen kann zur verminderten Wassernutzung führen.
- Reduzierung von verdunstungstreibenden Standortfaktoren
Klimatische Einflussfaktoren wie Strahlung, Wind, Luftfeuchte und -temperatur kurbeln die Transpiration an. Damit diesen entgegengewirkt werden kann, dienen Bodenabdeckungen (Holzhäcksel/Stroh/Mulch) als Handlungsmaßnahme für eine verbesserte Wasserspeicherung.

Jede Phänologiephase (Austrieb, Blüte, Reife) profitiert auf ihre bestimmte Art und Weise von den Vorräten des Wassers. Menge und Intensität können variierend auf die am Ende resultierenden Erträge einwirken. Allerdings ist die Menge der Niederschläge in vielen Gebieten der entscheidende Aspekt, welcher die Erträge begrenzt. Um im Weinbau 1 kg Trockenmasse herstellen zu können, werden etwa 300 l Wasser benötigt. Langanhaltende Trockenheitsperioden schaden der Rebe, was sich durch Stoffwechselleistungen wie

zum Beispiel des gehemmten Wachstum und Verrieselung³ bemerkbar macht (Priewe 2017). Des Weiteren ist bei anhaltender Trockenheit eine Verminderung der Frostresistenz zu erkennen (Redl et al. 1996).

Ein Überfluss von Niederschlägen kann kurz vor und während der Weinlese zu einer Qualitätsminderung der Beeren führen, da Aromen durch eine intensivierete Feuchtigkeitsaufnahme verwässern. Ein weiterer Aspekt von zu hohen Niederschlagsraten sind Ergebnisse von Redl et al. (1996) und Prior (2006a), welche ein erhöhtes Risiko an Infektionsgefahr durch Pilzerkrankungen belegen.

Trotz der Abhängigkeit des Niederschlages weist die Weinrebe ein hohes Maß an Trockentoleranz auf, was durch das tiefreichende Wurzelwerk gewährleistet wird. Versuche mit der Erprobung unterschiedlicher Rebsorten wie zum Beispiel Müller-Thurgau, Bacchus, Riesling, Trollinger und Chardonnay ergaben, dass auffällige Unterschiede nach einer reduzierten Wasserversorgung hinsichtlich des Wasserflusses innerhalb der Rebe, der Reaktion sowie der Transpirationsrate bestehen (Eibach und Alleweldt 1984; Gruber und Schultz 2006; Prior 2006b). Schultz (2003) differenziert Reaktionstypen, die divergierend auf Trockenstress reagieren. In Bezug auf sich unterscheidende sortenspezifische Reaktionen nimmt Patzwahl (2007) eine tiefgründigere Trennung von sogenannten hydrostabilen und hydrolabilen Rebsorten vor. Hydrolabile Pflanzen regulieren ihr Wasserpotential bei Trockenheit frühzeitig über ihre Stomata, die einen Gasaustausch mit der Umgebungsluft ermöglichen. Die Stomata hydrostabiler Pflanzen sind toleranter gegenüber Trockenheit. Eine Einlagerung von osmotisch wirksamen Stoffen in deren Zellorganismus verhelfen diesem Typ von Pflanze bei niedrigem Wasserpotential seine geringen Wasservorräte in Anspruch zu nehmen. Zu den hydrostabilen Rebsorten zählen Syrah und Riesling (Patzwahl 2007). In Bezug auf das Untersuchungsgebiet lag vor Messstart im Jahr 2020 der Niederschlag in Rheinland-Pfalz mit 686 mm rund 15 % unter dem langjährigen Mittel (1971-2000) von 806 mm (DWD 2023). Als Faustregel gilt, dass die jährliche Niederschlagsmenge für den qualitativ-quantitativen Weinbau mindestens 600 mm pro m² betragen sollte, was demzufolge im unteren Drittel (686 mm) einzuordnen ist (Priewe 2017).

³ Bezeichnung einer Befruchtungsstörung eines Rebstockes. Dies tritt bis drei Wochen nach der Blüte auf und zeigt sich durch den Verlust von Blütenknospen (Tischelmayer o.A,c).

3.3 Wasser(haushalt) im Boden

Der Boden bildet die Verbindungsstelle zwischen Biosphäre, Atmosphäre und Grundwasser. Er ist der belebte Teil der oberen Erdkruste, gekennzeichnet durch Mineralien unterschiedlicher Klasse, Größe und Humus. Eine ausbalancierte Wasserversorgung der Reben ist ein fester Bestandteil für Quantität und Qualität des zu lesenden Erntegutes. Hierbei das idealtypische Gleichgewicht zu finden, ist die jährliche Hürde für alle Winzer*innen. Rebpflege, Klima, Meteorologie, Bodeneigenschaften, genetisches Potential, Bodenpflege, Rebanlage und Bewässerung zerrren und beeinflussen das Oberhaupt „Wasserhaushalt“ während einer Weinbausaison. Abbildung 1 verdeutlicht insgesamt sieben Bausteinelemente, welche durch anthropogen-/ klimatischen Einfluss den Rebenwasserhaushalt vermehrt ins Wanken geraten lassen aber auch ausgleichen können.

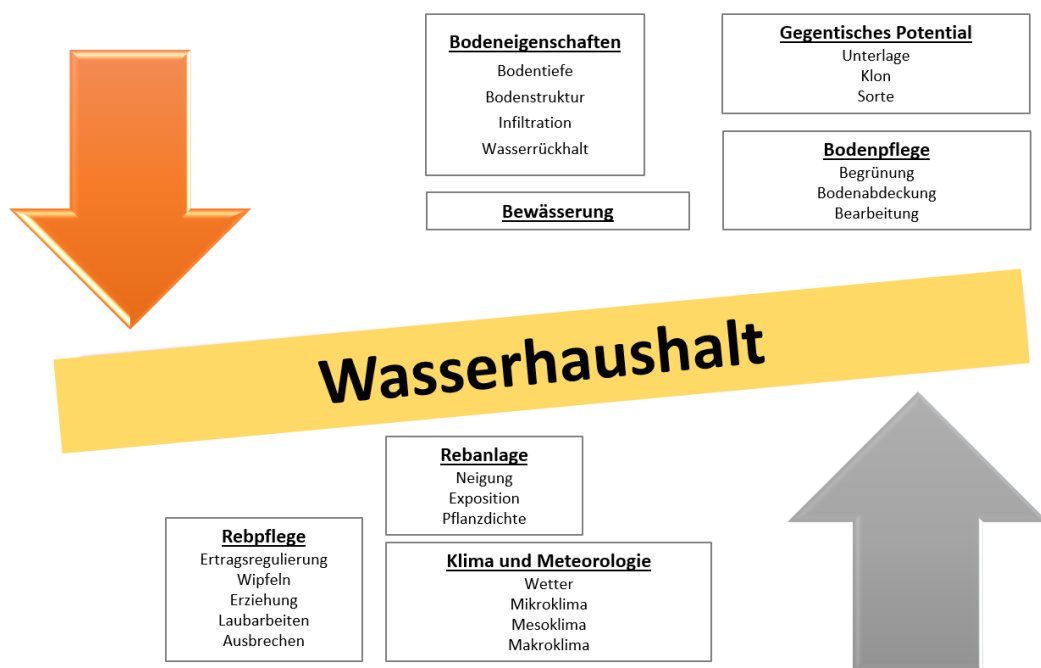


Abbildung 1 Wasserhaushaltswaage der Rebe (Niggli 2012), verändert – [Eigene Darstellung 2021].

Abbildung 1 wird durch nachfolgende Beschreibungen weiterführend verdeutlicht. Einerseits dient der Boden als Wasserspeicher aber auch als Wuchsstandort; in Bezug auf das Grundwasser wird er als Sickerwasserspender und Filterkörper angesehen. Synonyme wie Klima, Grundwasserstand, Boden und Nutzung stehen in enger Verbindung mit dem Bodenwasserhaushalt der Reben. Aufgrund seines individuellen Hohlraumsystems wird dieser durch die Bodenwasser-/ Bodensubstanz-/ und Bodenluftbeziehung gekennzeichnet (Rowell und Munch 1997). Befindet sich der Hohlraum in einem wassergesättigten Stadium, so herrschen flüssige und feste Phasenbestände vor. Liegt keine Wassersättigung vor, so tritt eine dritte Komponente, die der gasförmigen hinzu, so Kammerer und Loiskandl (2005). Ein weiter daran gekoppeltes Zahnrad definiert sich durch die Bodenfruchtbarkeit, welche in der Landwirtschaft mit bodenbürtigen ertragswirksamen Standorteigenschaften assoziiert wird (Patzel et al. 2000). Fruchtbare Böden bieten durch ihre Sorptions- und Nährstoffnachlieferungseigenschaften den Pflanzen ausreichende

Wachstumsbedingungen und zugleich werden anbautechnische Maßnahmen bei geringem Aufwand in hohe Erträge transformiert. Abhängig von Klima, Vegetation und dem örtlichen Ausgangsgestein ist die Unterscheidung von fruchtbaren und unfruchtbaren Böden vorzunehmen (Müller 1990; Schubert 2018). In Bezug auf die Weinrebe ist der Boden als wichtigster Lieferant von Nährstoffen und Wasser anzusehen, was sich in den rhein-hessischen Weinbergen vermehrt durch kalkhaltige Löss- und Lösslehm Böden (42 %), kalkreiche Lehm- und Tonböden aus tertiärem Mergel (27 %), kalkreiche Lehm Böden aus tertiärem Kalkstein (5 %), kalkfreie kiesig-sandige Böden aus quartären Flussablagerungen (3 %) und kalkhaltigen Böden aus Ton, Sand und Stein und Konglomeraten des Rotliegend (3 %) abbildet (Backes et al. 2013). Ein robustes und weitverbreitetes Wurzelwerk ist nur durch eine intakte Durchlüftung des Bodens möglich, wodurch eine bestmögliche Wasseraufnahme sichergestellt werden kann. Damit dieses Wassersystem reibungslos vonstattengehen kann, wird ein geeigneter Mitspieler benötigt, der des Bodenwassers.

Kastanek et al. (2001) bestimmen das Bodenwasser als solches, welches bei einer Trocknung von circa 105 °C bis zur Massenkonstanz völlig entfernt werden kann. Nicht mit inbegriffen sind hingegen das Kristall-/ Konstitutionswasser, was sich bei ansteigender Lufttemperaturen in den gasförmigen Aggregatzustand verwandelt (Kastanek et al. 2001). Des Weiteren kann das Bodenwasser einerseits in Grundwasser aber auch in das über dem Grundwasserspiegel auftretende Haft- und Sickerwasser unterschieden werden (Fohrer et al. 2016). Als Sickerwasser wird alles im Boden versickernde Wasser, also sowohl das natürliche Gravitationswasser, das anthropogen veränderte Wasser (Abwasser) als auch das frei bewegliche Wasser, beschrieben. Es fließt in groben Poren mit einem Durchmesser von über 0,01 mm. Aufbauend kann dieser Vorgang als Infiltration benannt werden, womit das bereits existierende Bodenwasser reduziert und somit zum Sickerwasser bestimmt wird. Der Gegenpart wird durch das Haftwasser, welches gegen die Schwerkraft festgehalten wird, gekennzeichnet. Dieses setzt sich aus den festen Bodenteilchen (Adsorptionswasser) und dem feinporigen Kapillarwasser zusammen (Leser 2011). Zum Adsorptionswasser zählen jene Wassermoleküle, welche sich in Form eines dünnen Wasserfilms an die feste Bodenmatrix⁴ anlagern. Ausgehende elektrostatische Kräfte von festen Bodensubstanzen führen zu einem Herausbilden von sogenannten Wasserstoffbrücken, welche zur Ausprägung eines „Films“ aus Wassermolekülen an den Bodenteilchen führen kann (Leser 2011). Der vados-zonale Bodenwassergehalt wird nach variierenden Witterungsverhältnissen durch Abläufe wie der Infiltration, Evaporation, Transpiration beziehungsweise der Evatranspiration bestimmt (Glawion 2012). Wasser wird für die Ernährung, die tägliche Hygiene und für Freizeitaktivitäten verwendet. Außerdem ist Wasser als Energiequelle, Transportmedium und Rohstoff wichtiger Wirtschaftsfaktor. Ein effektiver Schutz und der schonende Umgang mit der Ressource Wasser sind Voraussetzung für eine biologische Vielfalt und nachhaltige Nutzung, um ein

⁴ Die Bodenmatrix bezeichnet in der Bodenkunde die festen Bestandteile des Bodens ohne Porenraum (Helmholtz-Zentrum Hereon, 2021).

Naturprodukt wie den Wein auch unter klimatischen Änderungen zukünftig in der Bundesrepublik Deutschland anbauen zu können.

3.4 Wasser(haushalt) der Rebanlage

Stoffwechselaktive Pflanzenbestände bestehen zu 70 bis 95 % aus Wasser (Patzwahl 2007). Schopfer und Brennicke (2010) untergliedern das Wassertransportsystem von Pflanzen in drei Bereiche:

- Die Wasseraufnahme durch das Wurzelsystem und Abgabe in die Leitbahnen des Xylems.
- Die Zufuhr von Sprossorganzellen und Abgabe an die Atmosphäre durch Stomata der Pflanzen.
- Der hydraulische Langzeitstreckentransport in den Kapillaren des Xylems.

Das Überwinden unzähliger Widerstände ist die regelmäßige Aufgabe eines Wasserteilchens, um vom flüssigen Zustand im Boden in den gasförmigen Zustand in der Atmosphäre zu gelangen (Richter 1977). Der auftretende Transport erfolgt aufgrund von vorherrschenden Wasserpotentialdifferenzen innerhalb des Weinrebensystems und deren Umgebung. Schopfer und Brennicke (2010) verbinden das Wasserpotential (MPa) mit dem chemischen Potential. Die in der unteren Abbildung 2 dargestellten Wasserpotentialwerte gelten als Orientierung und können je nach vorherrschenden klimatischen Bedingungen variieren. Dies wird nochmals anhand der sich deutlich unterscheidenden Potentialwerte der Blätter (-0,5 bis -2,5 MPa) und der nicht wassergesättigten Atmosphäre (- 94 MPa) verdeutlicht (Abbildung 2). Den größten Anteil der Energie, der für den Wassertransport zuständig ist, wird durch dieses Druckgefälle injiziert. Für den Wasserhaushalt der Weinrebe spielt demzufolge die Transpirationsregulierung der Stomata an den Blättern eine bedeutende Rolle. Im äußeren Gewebe der Blätter, der Epidermis, befindet sich die Stomata. Aufgrund der sogenannten Dampfsperre, der Cuticula, können unkontrollierte Wasserabgaben gesteuert und verhindert werden (Vogt et al. 2000). Dieses komplexe Wassertransportsystem ermöglicht es, das Naturgut Wasser im System „Rebe“ zu verteilen und ist zugleich durch eine Vielzahl von Aufgaben und Funktionen charakterisiert: Lösungsmittel für organische Nährstoffe und lösliche Gase (Sauerstoff und Kohlendioxid). Wasser ist der Motor in vielen chemischen Reaktionen, was unter anderem die Spaltung von Wassermolekülen betrifft, um Lichtenergie zu potentiell-chemischer Energie im Photosyntheseprozess umzuwandeln (Kadereit et al. 2014). Für die Weinproduktion hat die dadurch stattfindende Zuckererzeugung, hervorgerufen durch das Mitwirken von Sonnenlicht und Wasser, indem CO_2 zu Zucker umgewandelt wird, eine große Bedeutung (Niggli 2012). Allerdings dient Wasser auch der Temperaturregulation im System „Rebe“ und Stützfunktion der Weinrebe, um das Spannungsverhältnis des Zellgewebes, bedingt durch den induzierten Druck aufrechtzuerhalten (Patzwahl 2007; Vogt et al. 2000).

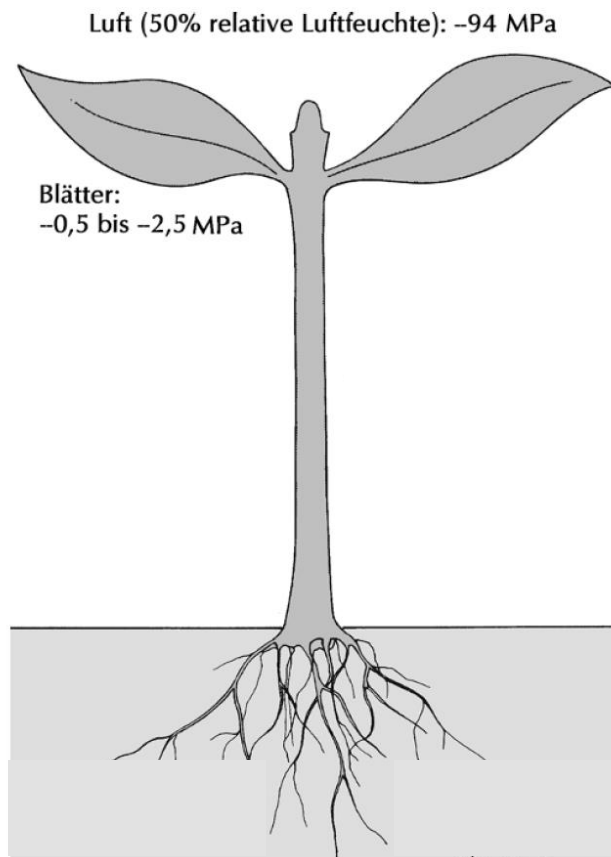


Abbildung 2 Wasserpotentiale im Boden-Pflanze-Atmosphäre System, (Schopfer & Brennicke 2010, verändert).

Eine beachtliche Beständigkeit besitzt die Rebe gegenüber Trockenstress. Dies ist nicht nur alleiniger Grund ihres Wurzelwerkes, sondern lässt sich auch auf die feinen Filzhaare der Blätter zurückführen, womit die Wirkungskraft der Sonneneinstrahlung sowie die Einflussnahme der Luftströmungen in Blattnähe minimiert und letzten Endes die Transpiration eingeschränkt wird (Niggli 2012; Blaich 2000). Des Weiteren sind mannigfache physiologische Steuerungsmaßnahmen in der Rebe vorhanden, um dem Wassermangel entgegenzuwirken. Erzeugt werden diese durch das Hormon Abscisinsäure, welches bei Trockenstress im Wurzelwerk hervorgerufen wird und nachfolgend mithilfe der Pflanzenorgane in oberirdische Bodenschichten befördert wird (Prior 2003). Damit das Wasser vom Kontinuum „Boden-Pflanze“ transportiert werden kann, müssen unterschiedliche Potentialbereiche überwunden werden, die auf das Bodenwasser einwirken. Das Bodenwasser unterliegt im Porenraum folgenden Kräften: Erdanziehung bzw. Gravitation; Adsorptions- und Kapillarkräften an den Bodenteilchen und der hygroscopischen Anziehungskraft durch Bodensalze.

Die genannten Aspekte resultieren aus der gegenseitigen Anziehung zwischen der Bodenmatrix und dem Bodenwasser, den aufgelösten Substratlösungen, sowie der extern wirkenden Gasdrücke. In der Pflanzenphysiologie wird anstelle der definierten Kraft, das Potential, genauer gesagt das Wasserpotential, verwendet. Dadurch wird die Verfügbarkeit von Wasser in einem Boden-, Luft- oder Pflanzensystem beschrieben. Schlüsselbegriffe wie Wassertransport und Wasseraufnahme sind in diesem Prozess von elementarer

Bedeutung (Taiz et al. 2015). Aus physikalisch-/ wissenschaftlicher Sicht wird das Wasserpotential als chemisches Potential betrachtet, angegeben in Einheiten des Drucks (MPa). Nach Kramer und Boyer (1995) ist es die Bestimmung für die Arbeit, welche aufgebracht werden muss, um ein Einheitsvolumen Wasser von einem Ausgangsort zu einem anderen System hinzuzuführen. Vereinfacht gesagt ist das Wasserpotential das Energieniveau des Wassers. Es ist umso höher, je mehr Wassermoleküle in einem bestimmten Raumvolumen vorhanden sind. Jede Mischung von Wasser mit zusätzlichen Stoffen senkt sein Energiepotential. Folglich fließt Wasser von einem Ort mit hohem Energiepotential zu einem Standort, an welchem ein niedriges Energiepotential vorherrscht. Als Folgeerscheinung entsteht eine Sogwirkung (Petgen 2015). In Bezug auf den Weinbau ist diese entstehende Wasserpotentialdifferenz zwischen Boden und Atmosphäre der „Motor“ des Wassertransportes von Reben (vgl. Abbildung 2). Der Wassernachschub für Verdunstungsverluste an den Blättern ist intakt, solange ein Potentialgefälle zwischen Boden und Blättern besteht. Bei sommerlich austrocknenden Böden sinkt das Wasserpotential kontinuierlich ab (Müller 2006). Aufgrund dessen, dass unterschiedliche Potentiale auf das Bodenwasser wirken und keine einheitliche Einflussgröße existiert, werden alle Teilpotentiale der Kräfte miteinander addiert und als Gesamtbodenwasserpotential ausgedrückt. Hierzu entwickelten und definierten Bolt et al. (1976) das Grundgerüst zum Gesamtbodenwasserpotential, welches im Folgenden in Gleichung 1 aufgezeigt wird:

Gleichung 1

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

Ψ_t = Gesamtbodenwasserpotential

Ψ_o = osmotisches Potential

Ψ_g = gravimetrische Potential

Ψ_p = Druckpotential

Das zuletzt aufgelistete Druckpotential (Ψ_p) wird nochmals in Matrixpotential und Gasdruckpotential unterschieden. Druckdifferenzen zwischen Boden- und atmosphärischem Luftdruck bestimmen das Gasdruckpotential, welches gleich Null und demzufolge nicht von hoher Relevanz ist. Ist zusätzlich das gravimetrische Potential bekannt und das osmotische Potential konstant, so ergibt sich letzten Endes das sogenannte Matrixpotential, welches die entscheidende Kennung darstellt (Leser 2011).

3.5 Bodenwasserpotential von Reben

Für den Wasserhaushalt der Weinrebe spielt schlussfolgernd die Transpirationsregulierung eine entscheidende Rolle. Die Rate an Transpiration wird über die Stomataschließzellen der Blätter bestimmt. Ein zu tiefes Absinken der Wasserpotentiale bzw. auftretende Ausfallerscheinungen des hydraulischen Leitsystems können somit verhindert werden (Schultz und Matthews 1997; Tyree und Sperry 1988). Eine entsprechende Feinjustierung der Schließzellen wird in diesem Fall durch das in verbindungstehende VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit) veranlasst, so Mott und Buckley (1998). Diese Art von

physiologischen Reaktionen ist eine Maßnahme des Pflanzenwasserstatus, um eine vorherrschende Transpiration regulieren zu können. Gleichung 2 wird durch das im Zähler sich befindende Potentialgefälle ($\Delta\mu$) und dem im Nenner stehenden Transportwiderstand (R) einer Strecke zwischen zwei beliebigen Orten beschrieben. Diese Gesetzmäßigkeiten basieren beispielsweise auf dem HAGEN-POISSEUILLESchen Gesetz, welches für den Volumenstrom (Strömungsintensität) in einer Kapillare dargestellt wird (Schopfer 1989). Der Strom von Teilchen eines Stoffes lässt sich in einem Potentialgefälle wie folgt notieren:

Gleichung 2

$$I = \frac{\Delta\mu}{R}$$

Die in Gleichung 3 gezeigten Variablen beschreiben die stomatäre Leitfähigkeit (g_s) und D , welche das VPD zwischen der Luft und dem Blatt definiert. Nach Phillips et al. (2002) kann weiterführend mithilfe der Reblattfläche ($E = \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) die benötigte Transpiration (E) aufgestellt werden:

Gleichung 3

$$E = g_s * D$$

Mittels der vierten Gleichung werden die hydraulische Leitfähigkeit ($k_{\text{plant}} = \text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) der Rebe und die vorherrschende Kraft zur Wasserbewegung ($\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{leaf}} - 0,01 * h$) zwischen den beiden Orten Boden-Pflanzen gekennzeichnet. Durch die Kennung (h) wird die Höhe der Rebe mit dem hydrostatischen Gradienten von $0,01 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ ergänzt:

Gleichung 4

$$E = k_{\text{plant}} (\Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{leaf}} - 0,01 * h)$$

Werden Gleichung 3 und 4 näher betrachtet, so ist festzustellen, dass k_{plant} und VPD mit g_s in Verbindung stehen und dass k_{plant} einen Effekt auf die Wirkungsweise des VPD hervorruft. Aus Berichten von Oren et al. (1999), Sperry et al. (2002) und Ewers et al. (2005) lässt sich zusätzlich bestätigen, dass die zuvor genannten Elemente einen Direkteinfluss auf das Verhältnis der Rebe zwischen Boden-Wurzel sowie der Laubwand-Atmosphäre besitzen. Das für eine Pflanze lebensnotwendige Wasser wird im Gefüge Boden-Pflanze-Atmosphäre durch die Zugspannung innerhalb des Pflanzenxylems gesteuert. Aufgrund unterschiedlich vorherrschender Wasserpotentiale kann der Wassertransport von den Rebenwurzeln bis hin zu den Blättern stattfinden. Grundlage bildet in diesem Falle der Potentialgradient ($\Delta\Psi$) (Oren et al. 1999). Ψ_{soil} definiert das Wasserpotential der Wurzeln im Boden und Ψ_{leaf} bildet das Blattwasserpotential ab (Gleichung 5).

Gleichung 5

$$\Delta\Psi = \Psi_{\text{soil}} - \Psi_{\text{leaf}}$$

Heßdörfer (2015) gliedert den Wassertransport in vier in sich aufbauende Teilschritte: 1. Vom Boden in die Rebenwurzel, 2. Von der Rebenwurzel zum vorhandenen Trieb über

das Xylem, 3. Vom Xylem in die Rebenblätter über die Blattstiele, 4. Von Blättern in die Atmosphäre mittels Stomata. Der individuelle Wasserstatus einer Rebe steht immer in Abhängigkeit zum örtlichen Wasserpotential im Boden, der Evaporation und den einwirkenden Umwelteinflüssen (s. Abbildung 2). Mithilfe der traditionellen Scholander-Kammer kann ein empfindlich zu erfassender Parameter, sprich der Pflanzenwasserstatus, gemessen werden, welcher z. B. klimatisch örtliche und bodenkundliche Gegebenheiten beinhaltet (Choné et al. 2001b; Scholander et al. 1965). Eine Splittung von drei Potentialbereichen ist hierbei zu kontrastieren: Ψ_{leaf} , Ψ_{pd} und Ψ_{stem} . Bereits in den frühen Morgenstunden, vor Sonnenaufgang zwischen 04:00 – 06:00 Uhr, wird der Wasserstatus der Rebe durch das Ψ_{pd} bestimmt. Diese Maßnahme muss deshalb so früh praktiziert werden, da sich nach Sonnenaufgang die Schließzellen der Blätter öffnen und die Rebe beginnt, Wasser zu transpirieren. Dabei sinkt das Wasserpotenzial in den Blättern. Da in der Nacht geringfügig bis keine Transpiration stattfindet, aber noch Wasser zu den Reorganen nachströmt, gleichen sich allmählich die Potenzialwerte der Blätter wieder dem Bodenwasserpotenzial an (Schultz und Steinberg 2002b). Demzufolge kann dieser Teilschritt dem Ψ_{soil} gleichgesetzt werden, da sich der Wasserstatus der Rebe mit dem des Bodens annähert bzw. ausgleicht. Aufbauend zur frühmorgendlichen Potentialmessung wird die mittägliche Messung (Ψ_{leaf}) durch verschiedenartige Zusammensetzungen von biologisch klimatologischen Parametern charakterisiert, so zum Beispiel durch das VPD, die Transpiration von Blättern oder auch der Globalstrahlung (Rodrigues et al. 2012).

Aufgrund dieser unterschiedlichen Ausgangssituationen bezüglich der frühmorgendlichen und mittäglichen Wasserpotentialmessungen entwickelte Choné et al. (2001b) das Ψ_{stem} , welches an nicht transpirierenden Rebenblättern ermittelt wird. Dies ist ein Konglomerat aus der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen dem Messpunkt und Boden, der Transpirationsleistung einer Rebe und dem Ψ_{soil} . Infolgedessen wird das Ψ_{stem} der aufgewendeten Kraft gleichgesetzt, mit welcher die Rebe das verfügbare Wasser vom Boden in die Atmosphäre befördert. Da sowohl klimatische- und bodenkundliche Themenbereiche im Ψ_{stem} mitinbegriffen sind, hat sich diese Kenngröße zur Steuerung der Bewässerung aber auch als Trockenstresskennzeichnung in zahlreichen Studien für Holzpflanzen bewahrt, so z. B. bei *Vitis Vinifera* (Choné et al. 2001b).

Mithilfe der Wasserpotentialmessung und dem von Schultz (1997) definierten Bewässerungsschwellenwert von circa -0,25 bis -0,30 MPa lässt sich eine objektive und dem aktuellen Pflanzenwasserstatus angepasste Zusatzbewässerung realisieren. Langjährige Versuche in rheinhessischen Steillagen wie zum Beispiel in Nierstein (Rheinland-Pfalz) konnten die Übertragbarkeit des Schwellenwertes durch Herrn Dr. Prior (DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück) bestätigen. Des Weiteren wurden an diesem Versuchsstandort verschiedenartige Abdeckungsvarianten in offenen Fahrgassen durchgeführt. Flächendeckende Bodenabdeckungen begünstigen den Wasserhaushalt durch einen herabgesetzten Oberflächenabfluss und Evaporation sowie einer verbesserten Infiltration. Aus diesem Grund ist sie für erosionsanfällige Hang- und Steillagen empfehlenswert. Synonyme wie die der Rebenvitalität und eine Begünstigung der Wasserversorgung bereits unmittelbar nach Blütenende brachten Ertragssteigerungen mit sich (Prior 2012). Demgegenüber konnte mit einer moderaten Tropfbewässerung (10 bis 12 l/Rebe) eine Ertragssicherung und

weniger eine Ertragssteigerung erzielt werden. Wird sie zum Zwecke des Erosionsschutzes und als allgemeingültiges System für wechselhafte Witterungsbedingungen mit einer flächendeckenden Begrünung kombiniert, so ist die Intensität der Bewässerung zu erhöhen (Prior 2012).

3.6 Bodenabdeckung

Eine ausreichend hohe Biodiversität gekoppelt an eine außerordentliche Bodenfruchtbarkeit bilden das Fundament des Qualitätsweinbaus. Um den klimatischen Bedingungen durch eine ausgewogene Balance des Terroirs⁵ entgegenwirken zu können, ist die Berücksichtigung einer Bodenbearbeitung, Mulchauflage, Bewässerung und Begrünung unabdingbar. Eine Vielzahl von Stellschrauben, mit welchen der Wasserhaushalt und die Nährstoffdynamik beeinflusst werden kann, stehen Winzer*innen zur Verfügung. Die Biologie des Bodens kann durch einen belebten aktiven Boden gefördert werden, was explizit zu den Leitziele des ökologischen Weinbaus zählt (Wachendorf et al. 2022). Der gleichzeitigen Ausnutzung, der rücksichtslosen Bewässerung und der mineral-synthetischen Düngung zur Ertragssteigerung stehen eine ressourcenschonende Nutzung natürlicher Güter und der gleichzeitige Humusaufbau gegenüber. Ein probates Mittel ist die Abdeckung des Bodens im Weinberg, womit sich die Anfälligkeit für Wasserverluste und Erosion minimieren lässt (Niggli 2011). Eine geringfügige Erwärmung unterhalb der Abdeckung, gekoppelt durch eine aufrechtgehaltene Verdunstungsrate aber auch das Zurückhalten der Feuchtigkeit mittels Auftragen einer Abdeckung durch eine verzögerte Diffusion, sind maßgeblich die zu nennenden Begleiterscheinungen einer Bodenabdeckung (Schultz und Deppisch 2003). Fallende Niederschläge können auf diese Art und Weise wirkungsvoller genutzt und die Versorgung der Reben mittels Nährstoffe verbessert werden (Niggli 2011). Der Oberflächenabfluss bei Starkniederschlägen und das Abtragen von Bodenmaterial des obersten Bodenhorizontes wurden durch eine flächendeckende Bodenabdeckung herabgesetzt bis vollständig verhindert (Prior 2011). Thomson und Hoffmann (2007) konnten des Weiteren belegen, dass organische Substanzen als essentielle Nahrungsgrundlage für Bodenorganismen bzw. als eine bedarfsgerechte Nährstoffquelle gelten. Ein höheres Niveau der Bodenfeuchtigkeit fördert letztlich auch die Bodenaktivität, da mikrobielle Abläufe vom Vorhandensein des Wassers profitieren.

Eine Bodenbearbeitung inmitten der offenen Rebgassen (Grundreihe) ist mithilfe der zuvor genannten flächendeckenden Abdeckung ausgeschlossen, was eine mindernde Bodenflora und -fauna mit sich bringt. Eine Bodenbearbeitung stellt die Lebensbedingungen für all die im Boden vorherrschenden Lebewesen dar, welche durch folgende Parameter unterstützt und hervorgerufen werden:

- Die Zerkleinerung von Pflanzenresten kann die Oberfläche erhöhen und den mikrobiellen Abbau ankurbeln.

⁵ Das Terroir umfasst die naturgegebenen Standortparameter einer Reblage wie Klima (Makro-, Meso- und Mikroklima), Boden (Erdreich und Geologie) und Topographie (Laville 1993).

- Die Einarbeitung der Pflanzenreste erhöht die Kontaktfläche zwischen den Pflanzenresten und Bodenlebewesen.
- Zusätzlich dient eine Bodenbearbeitung zur Steuerung des Wasser- und Lufthaushaltes des Bodens und zur Beeinflussung von abiotischen Anbaubedingungen. Für den mikrobiellen Abbau der Pflanzenreste ist ein feuchter, warmer und gut durchlüfteter Boden vorteilhaft, welcher nur durch Bearbeitungsmaßnahmen gewährleistet werden kann.

Mittels einer weiteren Abdeckungsvariante konnten Schultz und Deppisch (2003) den technischen Einsatzes mit sog. reflektierenden Unterstockfolien in Hang- und Direktzulagen belegen. Eine Bedeckung im Unterstockbereich führte zu einer geringfügigeren oberflächigen Bodentemperatur als unbedeckte Unterstockbereiche. Angesichts organischer Bodenbedeckung wurden hierzu langjährige Versuche des DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück in rheinhessischen Steillagen erprobt. Abdeckungsempfehlungen konnten sich bis dato vorwiegend auf austrocknungsgefährdeten und/ oder erosionsgefährdeten Standorten, bei welchen eine Begrünung schlecht zu etablieren ist, wiederfinden. Der Einsatz von Stroh und/ oder Holzhäcksel sind im Steillagenweinbau flächendeckend empfehlenswert (DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück 2013). Dieses Bodenpflegesystem kann zwar nicht flexibel auf unterschiedliche Witterungsvorkommnisse reagieren, kann allerdings in Trockenjahren bezüglich der Begünstigung des Wasserhaushaltes weitgehend mit einer Tropfbewässerung konkurrieren oder ist dieser teilweise sogar überlegen (Prior 2014). Walg, vom DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, empfiehlt im DDW (Der Deutsche Weinbau) für den zukünftigen Weinbau eine Abdeckung im Unterstockbereich bzw. eine Offenhaltung jeder zweiten Rebengasse, wozu allerdings bis dato noch keine fundierten Studien existieren. Der sommerliche Bewuchs im Unterstockbereich hebt die Wasserkonkurrenz auf ein höheres Niveau. Wasserschonende Bewirtschaftungen mit Abdeckungen wie Holzhäcksel oder Stroh sind künftig in Flach- und vor allem in Steillagen unabdingbar (Loose und Strub 2021).

Mit der 2012 novellierten Bioabfallverordnung (BioAbfV) haben sich die Vorgaben zur Anwendung von Holzhäcksel und Grüngut im Weinbau grundlegend geändert. War Grüngut und Holzhäcksel bisher von Behandlungs- und Untersuchungspflichten ausgenommen, ist nun eine bundesweite Kompostierung wie für viele andere Bioabfälle ein fester Bestandteil der Gesetzmäßigkeiten.

Aufgrund langjähriger Versuchsergebnisse, welche die hervorragende Eignung von grobem, unbehandeltem Holzhäcksel zum Zwecke der Erosionsminderung und Wasserhaushaltsverbesserung im Weinbau bestätigen, wurde in Rheinland-Pfalz eine Umsetzung der beschriebenen rechtlichen Regelung ermöglicht, welche weiterhin eine Ausbringung von grobem unbehandeltem Grüngut bzw. Holzhäcksel gewährleistet. Nach der Gesetzesverordnung ist unbehandeltes, grobes Material, das aus stückigem Material > 40 mm besteht, als Bodenabdeckung zum Zwecke des Erosionsschutzes und zur Wasserhaushaltsbegünstigung geeignet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2014).

3.7 Laubwandhöhe und -struktur

Ein weiteres Gefüge im Mikroklima des Weinbergs wird durch die Laubwandstruktur bestimmt. Der Gesundheitszustand der erzeugten Trauben, der Zuckergehalt und der Mengenertrag sollen am Ende einer Weinbausaison positive Ergebnisse liefern. Ab einem entsprechenden Ertrag von maximal 9000 kg und in Abhängigkeit von den weinbaulichen Rahmenbedingungen, wie Wasser- und Nährstoffversorgung, besteht zwischen dem Mengenertrag und der Qualität des resultierenden Weines ein intensiv debattiertes Thema, das der Menge-Güte-Relation. Für die Bildung der Beereninhaltsstoffe sowie der Gesundheitszustand der Beeren ist das Laubwandmanagement von wichtiger Bedeutung. Ausrichtung und Exposition sind elementare Faktoren im Prozess der Zucker- und Assimilationsbildung, welche durch Licht beeinflusst werden (Schiefer und Gunnar 2018). Je nach Ausrichtung und Geometrie des Erziehungssystems spielt das Verhältnis aus Laubwandoberfläche zum Laubwandvolumen eine wichtige Rolle (Schultz 1997).

In den Rebenblättern wird durch den Photosyntheseprozess unter anderem Zucker produziert. Eine weitere wichtige Komponente spielt dabei das sogenannte Blatt-Frucht-Verhältnis (BFV). Hierbei wird der Sachverhalt verstanden, dass unter klimatischen Bedingungen eine bestmögliche Zuckereinlagerung in den Trauben vonstattengeht, sofern pro Gramm Traubenertrag eine Blattfläche von 17-22 cm² vorzufinden ist (Petgen 2010). Für Weißweinsorten wie Riesling mit mittlerer Traubengröße ist ein optimales BFV erreicht, wenn pro Traube sieben Haupttriebblätter gegeben sind. Dagegen weist das einzelne Blatt in südlichen Weinbauregionen, beispielsweise Sizilien, aufgrund der stärkeren Sonneneinstrahlung eine erhöhte Leistung auf. Demzufolge genügt bereits eine kleinere Laubwandfläche. Adäquate Strategien im Weinberg zur Entschleunigung der Vegetation und Verzögerung der Ernte existieren. Seit mehreren Jahren werden an der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (LWG) verschiedenste Verfahren im Weinberg getestet, um eine Minimierung der Zuckereinlagerung und eine Verzögerung der Traubenreife zu generieren. Das Entfernen von Blattmasse ist eine der interessantesten Techniken innerhalb des Laubwandmanagements, da sie einfach zu handhaben und für die Mechanisierung geeignet ist. Dabei beruht die Methode auf dem Prinzip der bewussten Reduzierung des Blatt-Frucht-Verhältnisses (Heßdörfer 2020b).

Obwohl das BFV entscheidend den Gesundheitszustand und das Reifungspotential des Lesegutes beeinflusst, wird es in der Praxis wenig berücksichtigt, da sowohl die Abschätzung der Blattfläche als auch die Traubenertragsschätzungen immer mit hohem Aufwand und großen Fehlern behaftet sind. Im praktischen Weinbau wird dies durch die Laubwandhöhe von circa 1,40 m (Laubwandunterkante 0,70 m; Laubwandoberkante 2,00 m) realisiert. Das BFV variiert in Abhängigkeit der Rebsorten und der vorherrschenden klimatischen Bedingungen (Stoll et al. 2012). Im Extremfall, dem Minimalschnitt im Spalier, hat die gezielte Ertragskontrolle und damit die Einstellung des BFV zur erfolgreichen Einführung dieses „low input-Systems“ geführt (Walg 2011).

Verkürzte Laubwandstrukturen konnten bereits positive Ergebnisse mit sich bringen, so zum Beispiel erhöhte Most-Stickstoffwerte, welche sich in einer sicheren Gärungsaktivität der Hefen als Vorteil erwiesen. Spaltöffnungen gewährleisten den für die Photosynthese grundlegenden Gasaustausch, indem sie der Luft Kohlenstoffdioxid entziehen, während Sauerstoff und hauptsächlich Wasserdampf abgegeben werden. Disparitäten während der Photosyntheseleistung entstehen zwischen Wasseraufnahme der Wurzeln und der Wasserabgabe der Spaltöffnungen (Heßdörfer 2020a). Eine herabgesetzte Blattmasse nimmt einen erheblichen Einfluss auf den Wasserverbrauch, was folglich von der transpirierenden Oberfläche, also der Laubwand, in Abhängigkeit steht. Heßdörfer (2020a) konnte mittels Trockenstressanalysen belegen, dass die Reduktion der Laubfläche signifikant niedriger Trockenstresssymptome vorweisen, als mit normaler Laubwandlänge. Verringerte Oechsle und gesteigerte Säurewerte waren erste Forschungsergebnisse bezüglich Laubwandeinkürzung.

Verzögerungen der Zuckereinlagerung und demzufolge eine Reifeverzögerung von rund einer Woche wurden 2014 in Laimburg herausgestellt (Haas et al. 2014). Ertrags-, Botrytis- und Schnittholzreduzierungen wurden 2013 bis 2016 an der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg mittels Laubwandkürzungen erzielt. Im Sektor der Sensorik wurden verschiedenartige Rebsorten, welche im Kurzlaubwandsystem gepflegt wurden, als „*leichte und lockere Citrusweine mit tropischer Komponente*“ deklariert, was dem Geschmacksideal der zukünftigen Weinen sicherlich entgegenkommt (Schiefer und Gunnar 2018).

3.8 Transpiration und Umweltfaktoren

Die experimentelle Ökologie wird durch die Bildung wichtiger Fragekomplexe des Wasserhaushalts von Reben spezifiziert. Physikalische und osmotische Bodensaugkräfte, wie die Menge und Zufuhr aufnehmbaren Wassers der Pflanzen, münden im Wesentlichen in eine Untersuchung der Transpiration und ihrer inneren und äußeren Bedingungen.

Es wird dabei zwischen der stomatären und der cuticularen Transpiration unterschieden. Die stomatäre Transpiration, welche die Abgabe von Wasser über die auf den Blättern befindlichen Spaltöffnungen beschreibt, stellt einen Großteil der Gesamttranspiration dar. Einen geringeren Transpirationsanteil nimmt hierbei die cuticulare Transpiration ein, also die Wasserabgabe über die Cuticula. Der primäre Vorgang der Transpiration und deren Intensität sind an unabdingbare Faktoren gekoppelt, wobei die Öffnungsweite der Spaltöffnungen maßgebend ist (Kadereit et al. 2014). Dies wird von der Pflanze durch die sogenannten Schließzellen gesteuert. Das Öffnen und Schließen werden dabei durch multilaterale Vorgänge wie die Wasserverfügbarkeit und Luftfeuchtigkeit geprägt. Diese beeinflussen vor allem den Turgor⁶ der Schließzellen, welcher wiederum die Öffnungsweite steuert (Walter 1962). Die Funktion der Transpiration für die Pflanze ist vielseitig. Sie ist ein Bestandteil des Stofftransports innerhalb der Rebe, da durch ausströmende Wassermolekülen ein Sog und zudem eine Änderung der Nährstoffkonzentration im Blatt entsteht. Zudem führt das Ausströmen des Wasserdampfes zu einem Kühlungseffekt. Darüber hinaus ist nicht nur die Wasserabgabe durch Spaltöffnungen zu nennen, sondern auch die Aufnahme von Sauerstoff als Kohlenstoffdioxid, welches wichtige Bestandteile für die Photosynthese sind. Die Effektivität der Transpiration wird in der Transpirationsrate, kurz TR ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) ausgedrückt und über den Öffnungsgrad der Stomata gesteuert, welcher vom Wassergehalt des Bodens, Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Wind, Lichtintensität, Unterlage und Rebsorte beeinflusst wird. Rühl (1981) konnte ermitteln, dass bei der Sorte Riesling von geringeren Transpirationsraten bei trockenen Böden ausgegangen werden kann. Im direkten Vergleich liegt die TR von Rieslingreben bei trockenen Böden zwischen 0,2 bis 0,7 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$ und bei feuchten Böden zwischen 1,1 bis 1,4 $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Bei ansteigenden Lufttemperaturen ist eine Öffnung der Stomata zu beobachten. Ist allerdings ein Wassermangel in der Rebanlage vorzufinden, schließen sich die Spaltöffnungen der Blätter (Currell 1983). Im Zusammenspiel mit der Lufttemperatur spielt auch die relative Luftfeuchtigkeit eine elementare Rolle hinsichtlich der TR. Mit dem Anstieg der Lufttemperatur steigt zugleich die Wasseraufnahmekapazität der Luft. Als Folgeerscheinung ist ein Abfall der relativen Luftfeuchtigkeit zu verzeichnen. Das Dampfdruckgefälle zwischen Pflanze und Atmosphäre nimmt zu und es kann stetig mehr Wasser verdampfen, was letztlich von der Windgeschwindigkeit mitbestimmt wird.

⁶ Als Turgor bezeichnet man den hydrostatischen Druck, welcher mittels osmotisch beeinflusster Wassereinlagerungen innerhalb der Zellen existiert und auf die Zellwände einwirkt (Schubert 2018).

Die TR der Pflanze wird direkt über die Stomataschließzellen der Blätter reguliert. Hieraus folgend kann ein zu tiefes Absinken des Wasserpotentials und damit einhergehend ein möglicher Zusammenbruch des hydraulischen Leitsystems innerhalb der Pflanze verhindert werden (Tyree und Sperry 1988; Schultz und Matthews 1997).

Die Aktivität der Schließzellen wird dabei größtenteils durch das VPD (Wasserdampf-sättigungsdefizit) gesteuert. Es gibt an, wie viel Wasserdampf die Luft aufnehmen kann bis sie vollständig gesättigt ist. Bei einem hohen VPD ist das Dampfdruckgefälle zwischen der Atmosphäre und dem Blatt ebenfalls hoch. Dies würde ohne Steuerungsmechanismen wie der Stomata zu einer signifikant steigenden Transpiration der Pflanze führen. Dagegen würde bei geringem VPD und somit einem niedrigen Dampfdruckgefälle die Transpiration der Pflanze verringert werden. Das VPD ist dabei vor allem abhängig von der Luft- und der oberflächigen Blatttemperatur wie auch der relativen Luftfeuchtigkeit der Atmosphäre. So bestätigen Untersuchungen von Mott und Buckley (1998), dass mit einem Anstieg des VPDs das Schließen der Stomata einhergeht. Diese Anpassungsstrategie ist vornehmlich eine Rückkopplung des Pflanzenwasserstatus zur Regulierung der Transpiration. Dies steht im unmittelbaren Zusammenhang mit den Ergebnissen von McCutchan und Shackel (1992) bei *Prunus domestica* (Pflaumenbäumen) und Shackel et al. (1997) bei *Prunus dulcis* (Mandelbäumen). Zur Bestimmung der Transpiration in Freilandversuchen stehen zwei zu unterscheidende Methoden zur Verfügung: Die Chemische und die gravimetrische Methode. In der vorliegenden Arbeit wurde sich auf Zweitere, aufgrund der im Freiland praktisch einfachen Handhabung, festgelegt. Hierbei wurde die Transpirationsbestimmung nach Otto Stocker (1929) angewandt, welche als etablierte und praxisnahe Methode gilt. Die von Otto Stocker entwickelte „Momentan-Methode“, welche die Transpiration von Pflanzen anhand von Gewichtsmessungen kennzeichnet, findet heutzutage noch Verwendung in Freilandversuchen. Gravimetrische Methoden definieren sich entweder durch Gewichtszunahme einer hygroskopischen Substanz oder durch direktes Wiegen eines Blattes oder Pflanzen. Aus der ermittelnden Gewichts-differenz wird die Menge des abgegebenen Wassers errechnet. Die Transpirationsbestimmung am Standort verläuft in folgenden Arbeitsschritten:

- Abtrennen des zu analysierenden Pflanzenteils mittels Rasierklingen.
- Erste Wägung, Feststellung der Anfangszeit.
- Zurückbringen des Pflanzenteils an seinen Standort und Exposition unter den früheren Standortbedingungen.
- Zweite Wägung, Feststellung der Schlusszeit.

Die Genauigkeit von Momentanbestimmungen ist in erster Linie begrenzt durch unvermeidliche Störungen der Außenbedingungen während den Wägungen. Eine kurzes Messzeitfenster und Verringerung dieser Störungen wie z.B. Umweltfaktoren (Wind) bedingt eine komprimierte Versuchsdauer und somit eine höhere Genauigkeit der Messungen. Durchschnittliche Expositionszeiten sollten zwischen zwei bis drei Minuten, die gesamte Messung maximal fünf Minuten andauern (Hölzl 1955; Grüner 2012). Praktisch muss gewährleistet sein, dass die Distanz zwischen Waage und Expositionsort möglichst kurzgehalten wird, um eine rasche Wägung zu gewährleisten. Aus dem zweiten Grund ist eine Analysewaage mit einem Auflösungsvermögen von 0,1 mg von Vorteil, um eine exakte

Bestimmung der Gewichtsänderung zu ermöglichen. Zur Wägung werden Blätter gleicher Insertionshöhe verwendet. Während der Messdurchführung bewährte sich ein schließbarer Windschutzkasten oberhalb der Analysewaage.

3.9 Photosynthese

Die Photosynthese ist der grundlegende Prozess zur Übertragung von Sonnen- in chemische Energie (Larcher 1995) innerhalb der Chloroplasten von Pflanzen (Arnon et al. 1954). Insgesamt werden zwei Differenzierungen vorgenommen:

- temperaturunabhängige, aber lichtabhängige Lichtreaktion
- temperaturabhängige, aber lichtunabhängige Dunkelreaktion.

Bei der Lichtreaktion (Primärreaktion) in den Photosystemen I und II wird durch die Absorption von photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) Kohlenstoffdioxid durch Photolyse fixiert (Kadereit et al. 2014). Aus diesem Vorgang heraus resultiert der freigesetzte Sauerstoff (Mohr und Schopfer 1992). In der Dunkelreaktion (Sekundärreaktion) werden das in der Lichtreaktion erhaltene Kohlenstoffdioxid und der aus der Photolyse erlangte Wasserstoff zu Glucose transkribiert (Heldt und Piechulla 2014). Wie ökonomisch eine Rebe Photosynthese betreibt und demzufolge der erzielende Ertrag ausfällt, ist durch biotische und abiotische Faktoren bestimmt. Folgend werden die eminentesten Individualfaktoren isoliert und zusammen mit anderen Parametern betrachtet.

3.9.1 Temperatur

Die Temperaturminima (T_{\min}) von Atmung und Photosynthese stehen in engem Zusammenhang (Abbildung 3). Die Nettphotosyntheserate (graue Fläche) ist das Endprodukt aus der Differenz von Bruttophotosynthese minus des Energieverbrauchs durch die Atmung und steigt mit wachsenden Lufttemperaturen bis zum Temperaturoptimum (T_{opt}) an (Abbildung 3).

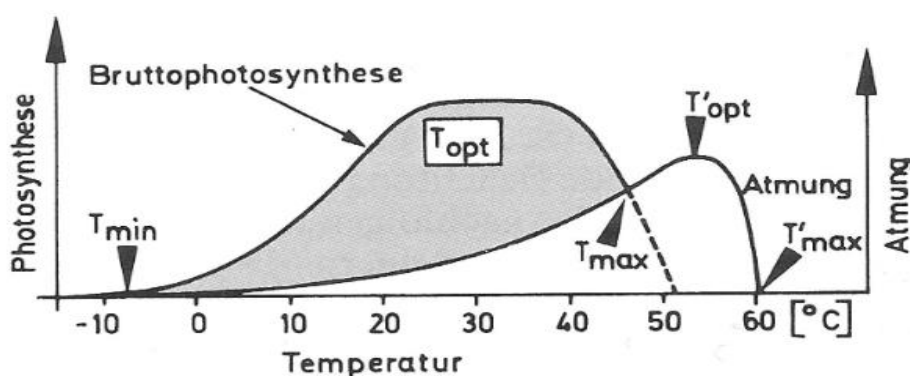


Abbildung 3 Temperaturabhängigkeit von Photosynthese und Atmung, Strasburger et al. (1988) - verändert nach Larcher (1980).

Dieses Intervall lässt sich zwischen 15 °C und 25 °C definieren. Oberhalb von 30 °C bis 35 °C ist eine Reduzierung der CO_2 -Assimilation ersichtlich. Der Scheitelpunkt (T_{\max}) stellt ab diesem Moment deren Beendigung dar. Das Temperaturmaximum bzw. der Hitzekompensationspunkt der Nettphotosynthese liegt bei Weinreben bei ca. 40 °C (Rosenzweig und Hillel 1998). Mit weiter steigenden Temperaturen inmitten des Rebsystems bewegt sich die Bruttophotosynthese gegen 0 und ein Optimum (T'_{opt}) der Atmung wird erreicht.

Lufttemperaturen, welche bis zu 60 °C reichen (T'_{\max}), bewirken ein Zusammenbruch der Atmung.

Mit steigenden Lufttemperaturen geht ein Öffnen der Stomata einher (Schopfer und Brennicke 1999). Stark empor kletternde Lufttemperaturen generieren ein Schließen der Stomata, wodurch eine reduzierte Photosyntheseleistung möglich ist. Hauptsächlich während der Mittagszeit, bei welcher die Sonne im Zenit steht, tritt der sog. Mittagshit-zestress auf. Dieser vermindert die Photosyntheserate dahingehend, dass sogar Negativwerte impliziert werden (Mohotti und Lawlor 2002; Tenhunen et al. 1984; Tenhunen et al. 1985). In Bezug auf die oberflächige Blatttemperatur lässt sich diese zwar mit Messapparaten bestimmen, allerdings nicht direkt berechnen. Einflussfaktoren sind bspw. Wasserstress, Sonneneinstrahlung und die Lufttemperatur (Wiegand und Namken 1966).

3.9.2 Sonneneinstrahlung

Licht ist in Sachen Photosyntheseintensität der Antriebsmechanismus, welcher in drei Gruppierungen betrachtet werden kann: Intensität, Belichtungsdauer und Qualität. In den frühen Morgenstunden sorgen erste Sonnenstrahlen für die vollständige Aktivierung der Zellatmung. Die Atmungsintensität nimmt mit steigender Einstrahlung bis zum Lichtkompensationspunkt ab (Bayrhuber und Kull 2005) und es kann kein Gasaustausch mehr stattfinden (Bilger et al. 2008). Sowohl steigende CO₂-Konzentrationen oder Lufttemperaturen lassen den Lichtkompensationspunkt absinken. 1960 konnte Lieth oberhalb der 20 °C -Marke mit zunehmenden Lufttemperaturen einen gesteigerten Lichtkompensationspunkt nachweisen. Darüber hinaus nimmt die Photosyntheserate mit ansteigender Einstrahlung bis zum Lichtsättigungspunkt zu (Bowsher et al. 2008). Eine resultierende Abnahme der Photosynthese bei übermäßiger photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) wurde in Freilandversuchen zusätzlich bestätigt (Mohotti und Lawlor 2002). Ist die Strahlungsintensität zu hoch, treten unterschiedliche Merkmalserscheinungen, wie z.B. das Abwenden der Rebblätter längs zur Einstrahlungsrichtung der Sonne, auf. Ein Bewegungsfluss der Chloroplasten hin zu den Zellwänden, die sich dort übereinander stapeln, baut sich auf. Die von den Reben absorbierte PAR befindet sich im Wellenlängenbereich von etwa 380 bis 750 nm des wahrzunehmenden Spektrums. Vorrangig werden die Wellenlängen im roten und blauen Spektralbereich absorbiert (Engelmann 1883). Keine Absorption findet hingegen im grünen Bereich statt, sondern eine Streuung dieses, was die Rebblätter in der Farbe Grün erscheinen lässt. In Bezug auf die Belichtungsdauer nimmt diese keinen Einfluss auf die Photosyntheserate, allerdings auf den zu erzielenden Ertrag, so (Blackman 1905).

3.9.3 Wasser – Das blaue Gold

Die Verfügbarkeit von Wasser ist ein weiterer Baustein im gesamten Photosynthesebaukasten. Die Stoffaufnahme/-transport und die Aufrechterhaltung des Transpirationsstroms zählen zu den wichtigsten Aufgabengebieten des Wassers. Ein vermindertes Blattwasserpotential, der Verlust des Wassergehaltes bereits im Boden und der Stomataschluss sind Merkmalserscheinungen (Jaleel et al. 2009). Das Schließen der Stomata wird durch erhöhte Lufttemperaturen und Einstrahlungsstärken weiter vorangetrieben. Leidet zudem die Rebe unter Wassermangel, resultiert als Folgeerscheinung die Abnahme der

Photosynthese. Dies wird in erster Linie vom Schließen der Stomata und der daraus verminderten CO₂-Aufnahme praktiziert (Chaves 1991). Starker Wassermangel kann bis hin zu einem Zusammenbruch des Stoffwechsels und der Zellstrukturen führen (Sharkey und Seemann 1989; Smirnoff 1993). Die Rebe fährt ab dieser Situation auf „Sparmodus“ herunter, reduziert den Wassergehalt, senkt ihr Blattwasserpotential ab und verhindert ein Wachstum ihrer Zellen. Das Aufrollen des Blattwerkes ist ein visuell hervorgebrachtes Erscheinungsmerkmal. Darüber hinaus bewirkt Wassermangel eine Verminderung bzw. Störung der Stickstoffversorgung der Rebe. Grundlegend lassen sich zwei Prozesse differenzieren:

Zum einen eine verminderte Stickstoffassimilation, welche zu einer gehemmten Photosynthesekapazität führt und zum anderen werden NH₃-Verluste verzeichnet (Heckathorn und DeLucia 1995; Heckathorn et al. 1997). Geringere Photosyntheseraten der Rebe gehen mit einem verminderten Aufbau organischer Verbindungen einher, wodurch die Vitalität Verlust erleidet. Visuelle Symptome schlagen sich in mangelnder Stickstoffversorgung, dadurch geringeren Chlorophyllgehalten und schlussendlich in hellgrünen bis gelben Rebblättern mit verminderter Wuchskraft und Blattmasse nieder (Jaleel et al. 2009).

3.10 Aufnahme von CO₂ in der Rebe

Die natürliche CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beträgt im Jahre 2023 ca. 0,04 Col. % (etwa 419 ppm). Mitte der 1960er- Jahre betrug dieser Wert noch etwa 320 ppm. Seit diesem Zeitpunkt ist die mittlere CO₂-Konzentration der Atmosphäre fast linear auf den heutigen Kennwert angestiegen (NOAA 2023). Über geöffnete Stomata strömt CO₂ in die Rebe und die individuelle Stomataöffnung bestimmt die Photosyntheseleistung. Während der ablaufenden Photosynthese kommt es zu einem Wasserverlust durch stomatare Transpiration. Darüber hinaus wird der Öffnungszustand der Stomata einerseits von der örtlichen Wasserversorgung, andererseits von der CO₂-Konzentration im Rebenblatt und dem vorherrschenden Licht bzw. der Lufttemperatur mitbestimmt. Reben mit ausreichender Wasserversorgung kann die CO₂-Abhängigkeit der Spaltenaktivität bei stark erhöhten Lufttemperaturen verloren gehen. Aus ökologischer Sicht ist dies von wichtiger Bedeutung, da die Transpirationskühlung bei hohen Lufttemperaturen eine mögliche Blattüberhitzung verhindert (Kadereit et al. 2014). Der saisonale Entwicklungszustand der Reben hängt davon ab, wie geregelt die Wasserabgabe, Wasseraufnahme und Wassertransport vorstattengehen können. Steht der Rebe zu wenig Wasser im optimalen thermodynamischen Zustand zur Verfügung, wird dies als Trockenstress bezeichnet (Larcher 1995). Trockenstress entwickelt sich im Gegensatz zu anderen Stresssymptomen vorerst verlangsamt, verstärkt sich mit Verstreichen der Zeit der Trockenheit. Reaktionen können in unterschiedlichste Art und Weise auftreten, wie zum Beispiel der Stomaschluss innerhalb weniger Sekunden oder Minuten und Veränderung der Genexpression über mehrere Stunden. Morphologische Symptome treten über einen Zeitraum von mehreren Tagen hinweg auf. Die Aufnahme des essentiell wichtigen Nährstoffs CO₂ steht letzten Endes in Abhängigkeit zum örtlich vorherrschenden Wasserstatus. Ein limitierter Wasserhaushalt zwingt die Rebe zur verringerten Aufnahme an CO₂, was durch das Stomataschließen

verursacht wird. Weitere Prozesse wie die Photosynthese und das gleichzeitige Kühlen der Rebenblätter kann nur noch gehemmt stattfinden. Eine verminderte Chlorophyllproduktion ist lediglich unzureichend zu gewährleisten. Eine mögliche Blattüberhitzung droht, was im Vergilben und Absterben der Rebenblätter enden kann.

3.11 Stickstoffhaushalt

Stickstoff (N) ist einer der Makronährstoffe der Rebe, welcher das Wachstum und den Entwicklungszyklus maßgeblich mitbestimmt. Zudem ist eine Beteiligung bei der Bildung von Makromolekülen wie Proteinen, Chlorophyll aber auch Aminosäuren vorzufinden. Die Rebe nimmt einen Großteil N aus dem Boden auf, wo er in Form von NO_3^- , Ammonium (NH_4^+), Aminosäuren und Proteinen vorliegt. Böden mit einem Sauerstoffreichtum weisen eine rasche Nitrifikation auf, wodurch NO_3^- die Hauptnährstoffquelle in Sachen Stickstoff darstellt (Crawford und Forde 2002). In Abhängigkeit der Lichtintensität und Lufttemperatur findet die Assimilation von NO_3^- in den Wurzel- und Blattzellen statt (Smirnow und Stewart 1985). Die Verfügbarkeit von Stickstoff für die Weinrebe steht mit der Wasserversorgung des Bodens in enger Verbindung, da einerseits für eine Stickstoffmineralisation Photosynthese, Transpiration als auch für den Massenfluss zum Wurzelwerk Wasser erforderlich sind (Marschner und Marschner 2012). Reben mit ausreichender Feuchte ist es möglich, den Stickstoff innerhalb der Rebe zu verteilen und zu transportieren, was bei gestressten Reben zur Hemmung der N-Aufnahme führt (grüne Linie-Abbildung 4).

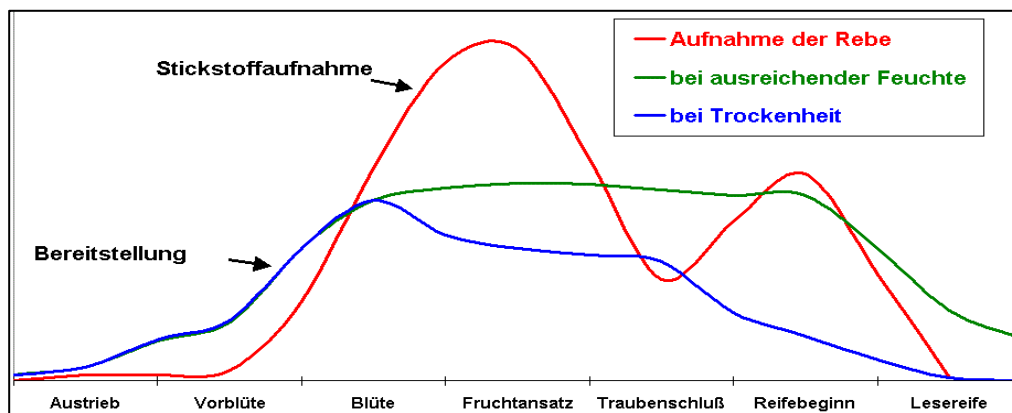


Abbildung 4 Verlauf der Stickstoffaufnahme bei ausreichender Feuchte und vorherrschender Trockenheit, verändert nach Fox 2000.

So kann es bei zu geringem Niederschlag und anhaltender Trockenheit bereits vor der ersten Hauptbedarfsphase der Rebe (April/Mai) zur Minderung der vorhandenen Reserven kommen. Bereits der erste Bedarfshöhepunkt kann nicht gedeckt werden (blaue Linie-Abbildung 4).

Ist weiterhin Trockenheit durch fehlende Niederschläge zu verzeichnen, ist eine rudimentäre Verfügbarkeit an Nährstoffe vorzufinden, da das Lösungs- und Transportmittel „Wasser“ ausbleibt. Befeuert wird diese Situation durch eine gehemmte Mineralisation, welche in den oberen Bodenschichten stagniert und demzufolge geringfügig bis keine Mengen Stickstoff als Antreiber des Wachstums der Rebe zur Verfügung stellen kann. Aus diesem Grund kommt dem Standort eine angepasste Bodenpflege zugute, um eine optimale Nährstoffversorgung zu gewährleisten. Parallel zur Düngermenge spielen vor allem die Anwendungen der Bodenpflegemaßnahme eine markante Rolle, welche einerseits das räumliche, andererseits das zeitliche Vorhandensein von Nährstoffen in entsprechender Weise steuern können.

Der zeitliche Verlauf der Stickstoffaufnahme ist bei Reben von großer Bedeutung, was mit Beginn des Austriebes der Reben einhergeht (Löhnertz 1988). Die Hauptmenge an N wird im Zeitraum der Blüte bis zum Start der Reife aufgenommen. Innerhalb dieses Vegetationsabschnittes existieren zwei Aufnahmemaxima, welche sich zwei Wochen nach der Blüte und wiederum zwei Wochen nach Erreichen des Reifebeginns feststellen lassen (Abbildung 4). Forschungsergebnisse von Löhnertz (1988) ergaben herabgesetzte und gleichmäßigere Nitratkonzentrationsverläufe in der Rebe bei einer Dauerbegrünung gegenüber einem bearbeiteten Boden. Rupp et al. (1995) bestätigen hingegen, dass die zeitliche Bereitstellung von mineralischem Stickstoff unter einer kontinuierlichen Dauerbegrünung dem Bedarf der Reben entgegenläuft. Eine Störung bzw. Unterbrechung der Begrünung im Frühjahr bei reichlicher Bodenfeuchte mithilfe mechanische Bodenbearbeitungsmaßnahmen soll eine bedarfsgerechte Stickstofffreisetzung implizieren, so Fox und Rupp (1999); Arbeitskreis Begrünung im Weinbau (1998a) und Perret et al. (1989). Ebenfalls ergaben Messergebnisse in Steillagen mittels Stroh- und Rindenmulchabdeckung eine teilweise Ausschaltung der Wasser- und Nährstoffkonkurrenz (Meinke 1982; Schwab 1998a; Arbeitskreis Begrünung im Weinbau 1998b). Im Hinblick auf die N-Aufnahmeperiode der Rebe ist diese im Vergleich zu anderen Kulturpflanzen verkürzt. Zu Zeiten des Austriebes greift die Rebe vermehrt auf Stickstoffreserven im Holzkörper zurück. Bis zu einer Trieblänge von ca. sechs Blättern wird nur in minimaler Menge N aufgenommen. Ab Blütenende und zunehmenden Traubenwachstum wird die N-Aufnahme erheblich gesteigert (rote Linie-Abbildung 4), wodurch sie im Schrotkorn- bis Erbsenstadium ihren absoluten Höhepunkt erreicht. Sofern die Zellteilungsphase innerhalb der Beeren beendet ist, findet eine verstärkte N-Aufnahme statt (Abbildung 5). Innerhalb des ersten N-Aufnahmezyklus beträgt die maximale Aufnahme ca. 1400 g/ha/Tag. Ein zweiter Anstieg der N-Aufnahme erstreckt sich mit der Volumenvergrößerung der Traubenbeeren nach dem Weichwerden für rund zwei bis drei Wochen. Bei frühreifen Sorten bzw. in frühen Jahren ist die Aufnahme Anfang September oder beim Erreichen von etwa 50 °Oechsle größtenteils abgeschlossen. Weitere Einlagerungsmaßnahmen erfolgen ab diesem Zeitpunkt durch Rückverlagerungen aus den Blättern. Analog werden

Stickstoffvorräte im Holzkörper eingelagert, welche den Grundbaustein für den nächstjährigen Austrieb bilden (Müller 2019). Rund 800 g/ha/Tag werden maximal an N-Zunahme im zweiten Aufnahmezeitraum zwischen Traubenreife und Lesereife erreicht (durchgehend grüne Linie-Abbildung 5). Unterversorgte Reben zeichnen sich durch Schwachwüchsigkeit und helles Laub aus. Eine Rotfärbung der Blattstiele und Blattadern sind visuelle Merkmale. Zudem ist die Photosyntheseleistung reduziert, weshalb miserable Mostgewichte resultieren. Eine Verwechslung mit Trockenstress liegt oftmals sehr nahe, da sowohl der Stickstoffhaushalt als auch der Wassermangel in Verbindung zueinanderstehen. Als Kontrast bietet eine überversorgte Rebe dunkelgrüne Rebblätter und ein überdurchschnittliches Wachstum. Einjährig verdicktes Holz, Stiellähme und ein erhöhtes Risiko für Pilzkrankungen nehmen zu. Eine zeitlich verzögerte Ausreife der Beeren tritt ein. Ebenfalls sind überhöhte und falsch terminierte N-Zufuhren die Ursachen für eine Nitratbelastung unseres Grundwassers. Vor allem nach der Anwendung von organischen Düngern und Komposten sind Winzer*innen verunsichert, ob den Reben ausreichend Stickstoff zur Verfügung steht. Hier bietet die Bestimmung der Nitratkonzentration in den Blattstielen eine einfache Methode den N-Ernährungsstatus der Reben zu überprüfen.

Die Morphogenese wird primär nicht nur durch endogene Prozesse gesteuert. Innerhalb der genetisch definierten Grenzen wird die Rebenentwicklung durch die in Kapitel 3 beschriebenen Außenfaktoren mitbestimmt. Die Rebe ist außer dem Stoffwechsel und der Entwicklung dadurch gekennzeichnet, dass sie mit ihrer Umgebung interagiert, d. h. Reize aufnimmt und auf diese reagiert. Einwirkende Umgebungsbedingungen wie z. B. Lufttemperatur, Lichtverhältnisse, Niederschlag bzw. die Nährstoffversorgung bestimmen den Entwicklungsstand der Rebe. Ein Element, ohne die das saisonale Pflanzenwachstum nicht stattfinden kann ist das Wasser.

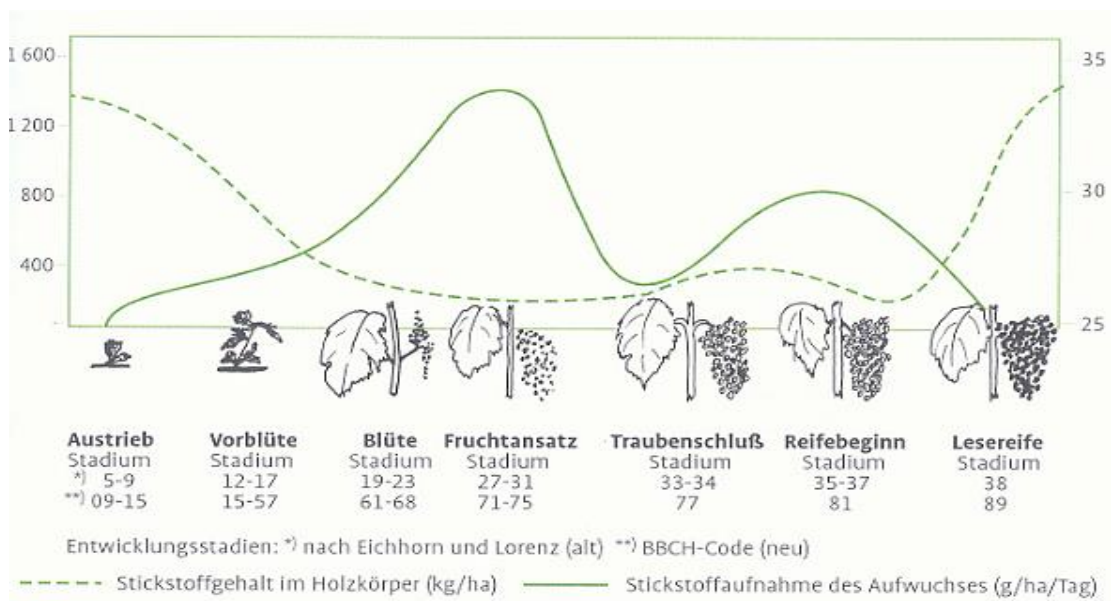


Abbildung 5 Stickstoffaufnahme und -gehalt von Reben im Jahresverlauf, Müller 2019.

Durch ein Fehlen dieses wichtigsten Grundbausteins ist das gesamte System „Rebe“ nicht mehr funktions- und leistungsfähig und die Physiologie der Rebe kommt langfristig zum Erliegen. In Zeiten des Klimawandels wird die Wasserknappheit ein immer bedeutenderes Naturgut. Durch saisonales Anzapfen des Grundwassers, um das Bewässern der Anbau-parzellen zu sichern, wird weiterhin diese prekäre Situation befeuert. Defizite und Anpassungsstrategien der nachhaltigen Wasserspeicherung liegen bis dato nur unzureichend den Winzer*innen vor, um diese im Alltag anwenden zu können. Im nachfolgenden Kapitel 4 werden Themengebiete wie der Versuchsstandort und der gesamte Messgegenstand dieser Freilanduntersuchung dargestellt, welche zur Problemlösung der „nachhaltigen Wassernutzung“ konzipiert wurden.

4 Material und Methode

4.1 Versuchsstandort

Das zweijährige Projekt zur Wasserhaushaltsuntersuchung an Rieslingreben wurde in den Jahren 2021 und 2022 auf einer Weinbergsfläche des Weinbaubetriebs Ihrig in Worms-Pfeddersheim (Rheinhessen – Wonnegau) durchgeführt (Abbildung 7+8). Pfeddersheim ist ein im Westen der Stadt Worms liegender Stadtteil mit rund 7000 Einwohner*innen, Stand 2019 (Nibelungenstadt Worms 2023).



Abbildung 7 Stadtbezirke der kreisfreien Stadt Worms, (Alicke 2009, verändert).

Die ehemalige Reichsstadt Pfeddersheim liegt im rheinhessischen Pfrimmtal, am nördlichen Hang des Flusses „Pfrimm“. Heppenheim, Pfiffligheim, Leiselheim und Abenheim sind unmittelbar angrenzende Nachbarorte (Abbildung 7). Aus infrastruktureller Sicht wird der Wormser Vorort Pfeddersheim durch ein ausgebautes Schienen- und Busnetz, die Bundesstraße B47 bzw. die A 61 definiert.

Die Verzuchsparzelle (49°63'47" N; 8°25'32" O) ist der Großlage „Liebfrauenmorgen“, speziell der Einzellage „Pfeddersheimer Kreuzblick“ in Pfeddersheim zuzuordnen. Im Jahr 2000 wurde diese Weinbauparzelle mit der Rebsorte Riesling auf der Unterlage 5BB⁷ mit einer Zeilenbreite von 1,80 m und einem Stockabstand von 1,05 m (ca. 5259 Reben ha⁻¹) gepflanzt (Abbildung 8). Das Versuchsfeld ist durch einen löß-lehmigen pleistozänen

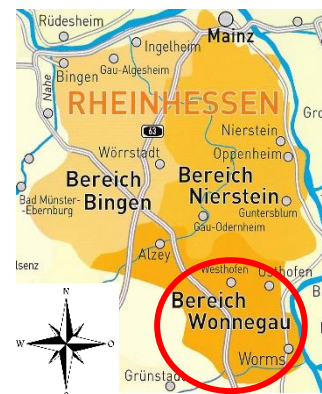


Abbildung 6 Anbauregion Wonnegau, (Deutsches Weininstitut o.A, verändert).

⁷ 1904 erhielt Franz Kober eine Auswahl der besten Unterlagstypen von Teleki und entwickelte hieraus die Klassifizierung 5 BB. Insgesamt vier verschiedene Gruppen mit Buchstabenkennzeichnung A, B, C und D vorgenommen. In diesem Fall definiert der Buchstabe „B“ Reben mit bronzierten Triebspitzen und rötlich glatten Trieben (Tischelmayer 2021).

Terrassenuntergrund, Rigosol-Pararendzina/Schluff (Ut3-Ut4), gekennzeichnet. Die Bewirtschaftung dieser Weinbauparzelle findet in einem Rhythmus „Begrünung-offene Gasse“ statt. Alle Versuchsvarianten wurden im Vorfeld mittels Unterstockrollhacke bearbeitet. Während der gesamten Vegetationsperiode wird diese Bearbeitungsmethode, je nach Intensität des Unkrautbewuchs, drei- bis fünfmal pro Saison eingesetzt. Tabelle 1 fasst nochmals alle vorherig genannten Standortmerkmale zusammen.

Tabelle 1 Charakterisierung der Projektfläche [Eigene Darstellung 2021].

Standortbedingungen	Details
Koordinaten	N 49°63'47'' O 8°25'32''
Lage	Liebfrauenmorgen; Kreuzblick Pfeddersheim
Höhe	115 m über N.N. 120
Großlage	Liebfrauenmorgen
Einzellage	Kreuzblick
Boden	Löß-lehmiger pleistozäne Terras- sensedimente (Tonschluff LU)
Unterlage	5 BB
Rebsorte	Riesling
Pflanzjahr	2000
Zeilenbreite	1,80 m
Erziehungsart	Halbbogen

Die in der linken unteren Teilabbildung rote Kennzeichnung grenzt das Untersuchungsgebiet von umliegenden Rebflächen ab. Eine entsprechende Kennzeichnung mittels Forschungsschild wurde vollzogen (rechte Teilabbildung 8).



Abbildung 8 Eingrenzung der Versuchspartizelle (rot) – Luftbildaufnahme – Pfeddersheimer Kreuzblick; [Eigene Darstellung 2021].

Die Weinbaupartizelle wurde in insgesamt vier Versuchsvarianten unterteilt (MB = moderate Bewässerung; HH = Holzhäcksel Unterstock; HH+ = flächendeckend Holzhäcksel; OB = ohne Bedeckung, Kontrolle). Darüber hinaus wurde zwischen langer (1,40 m) und verkürzter Laubwand (0,70 m) differenziert. Die nun folgende Grafik 9 verdeutlicht die Variantengliederung. Sie soll einen tiefgründigeren Überblick hinsichtlich der Versuchspartizelle, wie bereits Abbildung 8 aufzeigt, vermitteln.

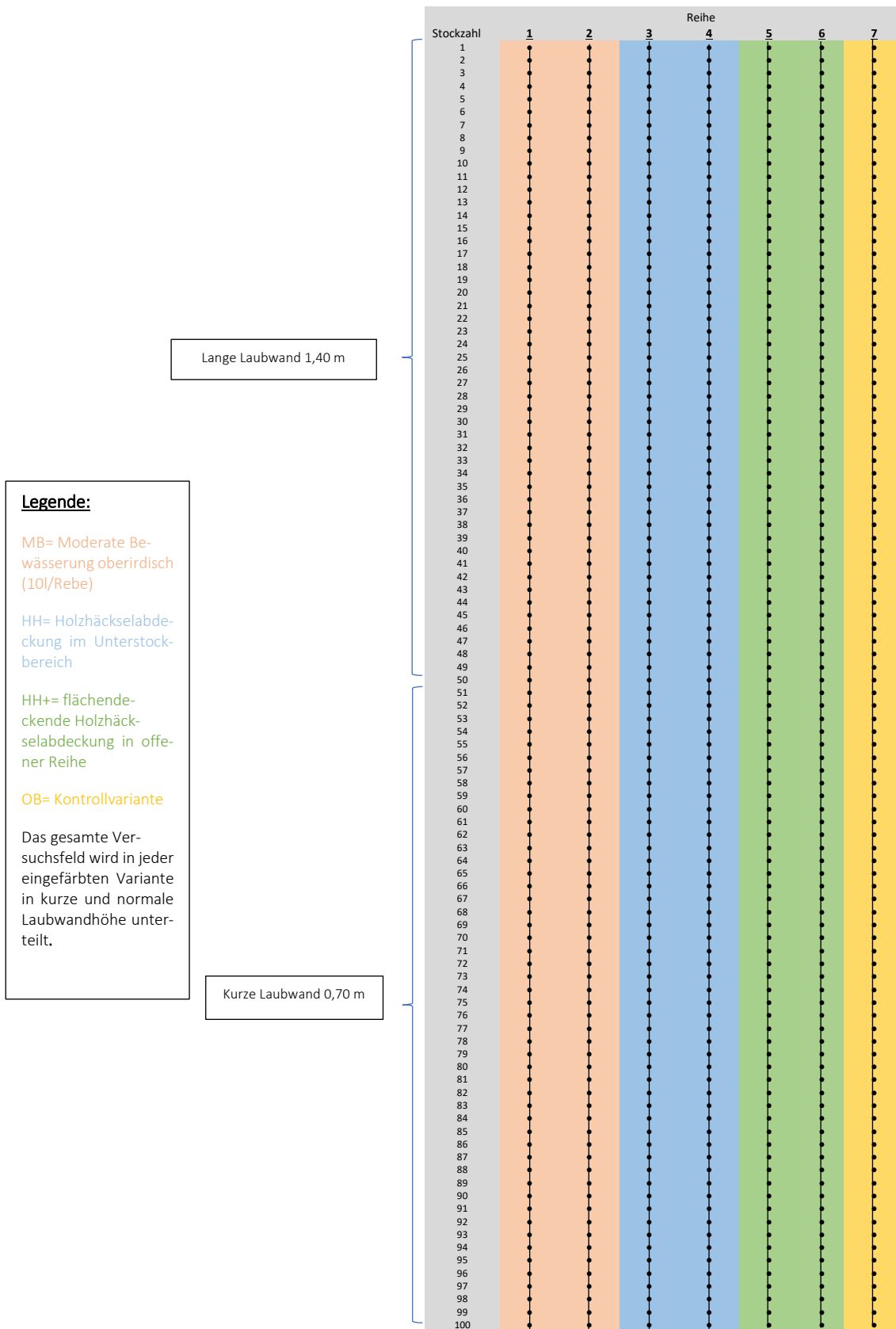


Abbildung 9 Pfeddersheimer-Kreuzblick, Versuchspartizelle für 2021 und 2022 der Rebsorte Riesling; [Eigene Darstellung 2021].

Aufbauend zur vorherigen Abbildung 9 liefern die unteren Teilabbildungen einen detaillierten Einblick bezüglich der Ausbringung von Holzhäckseln und der Einkürzung der Laubwände, wie die Varianten HH (Unterstockbedeckung V1) aus zwei unterschiedlichen Perspektiven, HH+ (flächendeckende Bedeckung V2) und OB (ohne Bedeckung-Kontrolle V3) verdeutlichen.



V1



V1



V2



V3

Abbildung 10

Versuchsvarianten V 1-3: Unterstockabdeckung, flächendeckende Abdeckung und Kontrollvariante, Pfeddersheim 2021-2022; [Eigene Darstellung 2021].

Die oberirdisch installierte Tropfbewässerung (MB = moderate Bewässerung, V4) ist aus der linken Teilabbildung 11 zu entnehmen. Die vorgenommenen Differenzierungen der Laubwandlängen in jeder Versuchsform wird in der rechten Hälfte von Abbildung 11 verdeutlicht.



V4



Eingekürzte und lange Laubwand

Abbildung 11

Versuchsvariante V4: moderate Tropfbewässerung; Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand; [Eigene Darstellung 2021].

Vor Beginn der Messkampagne 2021 wurde eine Weinbergsbodentextur in einer Tiefe von 1 m durchgeführt. Die untere Tabelle 2 liefert einen Aufschluss über die vorherrschende Korngrößenverteilung in verschiedenartigen Bodenhorizonten. Feinbodenarten wie Sand Schluff und Ton wurden unterschieden.

Tabelle 2 Weinbergsbodentextur des Versuchsstandortes "Pfeddersheimer Kreuzblick" von 0 - 100 cm Tiefe, in Gew.- %. Analyseergebnisse durch Herrn Harke; verändert 2021.

Tiefe (cm)	Korngröße in Gew.- %						
	Ton	Schluff			Sand		
	<0,002 mm	0,002- 0,006 mm	0,006- 0,02 mm	0,002- 0,06 mm	0,06- 0,2mm	0,2- 0,6 mm	0,6- 2 mm
0-30	23,8	4,4	23,3	36,9	5,4	5,4	0,8
30-40	19,7	8,2	22,7	44,6	3,8	0,8	0,2
45-100+	15,1	5,7	26,6	47,0	4,7	0,9	0,0

Boden- und Laubwandmanagement

Das vorzufindende Management des Bodens in der Versuchsparzelle beruht auf einer mechanischen Offenhaltung und jeder zweiten Fahrgasse mittels angelegter Dauerbegrünung. Nach den saisonalen Lesearbeiten wurde in jeder offenen Zeilengasse eine Auflockerung der hinterlassenen Spurverdichtungen, welche durch den Einsatz des Schmalspurschleppers aber auch durch den des Traubenvollernters verursacht wurden, mittels Einsaat einer Winterbegrünung (Rocken-Wickenmischung) vorgenommen. Im folgenden Frühjahr wurde diese oberflächlich im Boden eingearbeitet. Insgesamt 30 Rebstöcke je Versuchsvariante wurden als Untersuchungsreben ausgewählt, welche einen annähernd gleichmäßigen Wuchs im vergangenen Jahr vorgewiesen hatten. Alle anfallenden saisonalen Weinbergsarbeiten wie Boden-/Laubwand- und Pflanzenschutzarbeiten wurden betriebsüblich vollzogen. Zur Zeit des Dreiblatt-Stadiums (BBCH 13) wurden in jedem Versuchsjahr alle Versuchsrebstöcke je Variante zum bestmöglichen Vergleich auf 4 Augen * m⁻² eingestellt. Bei jeder Erhebungsvariante MB = Moderate Bewässerung, OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel wurde zusätzlich die betriebsübliche Laubwandhöhe von 1,40 m mit einer stark verkürzten Laubwand (0,70 m) verglichen (vgl. Abbildung 11). Das erste Einkürzen der Laubwandfronten erfolgte simultan mit Beginn des ersten Laubschnittes aller Erhebungsvarianten.

4.2 Messgegenstand

Zur Untersuchung der Trockenstressreaktionen der Rieslingrebe durch eine Holzhäcksels-Unterstockbedeckung wurden verschiedenartige Messparameter ausgewählt und zu einem aufschlussreichen Messkonzept entwickelt. Im nun folgenden Verlauf werden alle Messgegenstände vorgestellt und kritisch reflektiert.

4.2.1 Messprinzip Scholander-Druckkammer

In einer transpirierenden Pflanze steht das hydraulische Kontinuum (Wasserfaden) im Xylem unter Spannung (negativer Druck). Hierbei wird ein mit der Rasierklinge abgeschnittenes Rebenblatt samt Blattstiel in die versiegelte Kammer gesteckt, so dass die Schnittstelle nach außen ragt und mit einer Lupe wahrzunehmen ist. Komprimierter Stickstoff wird schrittweise in die Kammer per Hahn zugeführt und erhöht. Mit Fortschreiten der Zeit tritt das Xylem des Rebenblattes am abgeschnittenen Stielende hervor. Es wird folglich der gleiche Zustand wie vor dem Abtrennen des Rebenblattes erzeugt. Das Wasserpotential wird anhand des Drucks abgelesen, welcher erforderlich ist, um den Xylemsaft aus den Mesophylzellen zu treiben. Je größer der erforderliche Druck ist, damit der Blattstiel den Xylemsaft absondert, desto negativer ist das Blattwasserpotential. Der hierfür notwendige Außendruck gleicht daher dem im ursprünglichen Xylemsaft herrschenden (negativen) Innendruck (Schopfer 1976). Diese Methode eignet sich gleichermaßen für den Labor- und den Freiland Einsatz. Die Scholander-Druckkammer funktioniert ohne elektronische Bauteile und ist deshalb wenig stör anfällig.

4.2.2 Aufbau der Druckkammer

Die Druckkammer nach Scholander besteht aus Aluminium und Stahl. Dieses Druckgefäß kann Überdrücken bis zu 10 MPa und mehr standhalten. Alle Scholander-Druckkammer-Varianten sind prinzipiell nach dem gleichen Schema aufgebaut (Abbildung 12). Zur Erzeugung des notwendigen Überdruckes wird Stickstoff oder Druckluft aus Druckflaschen eingesetzt. Durch ein Reduzierventil kann der Flaschendruck herabgesetzt werden. Das Feinventil, mit dem der Gasdruck in der Druckkammer exakt reguliert werden kann, ist oft durch einen Zweiweghahn geschützt. Zur Messung des angelegten Druckes dient ein hochauflösendes Manometer (Abbildung 13). Der Verschlussdeckel der Kammer wird mit einem Bajonettverschluss auf dem Gefäß verriegelt. Im einfachsten Fall wird in eine Vertiefung im durchbohrten Deckel ein aufgeschnittener Gummistopfen gesetzt (Abbildung 12a). Das durchgeführte Projekt wurde mithilfe des zweiten Typverschlusses (b) erprobt. Diese hat den Vorteil, dass unterschiedliche Pflanzenbestände mit verschiedenartigen Stieldicken eingespannt werden können.

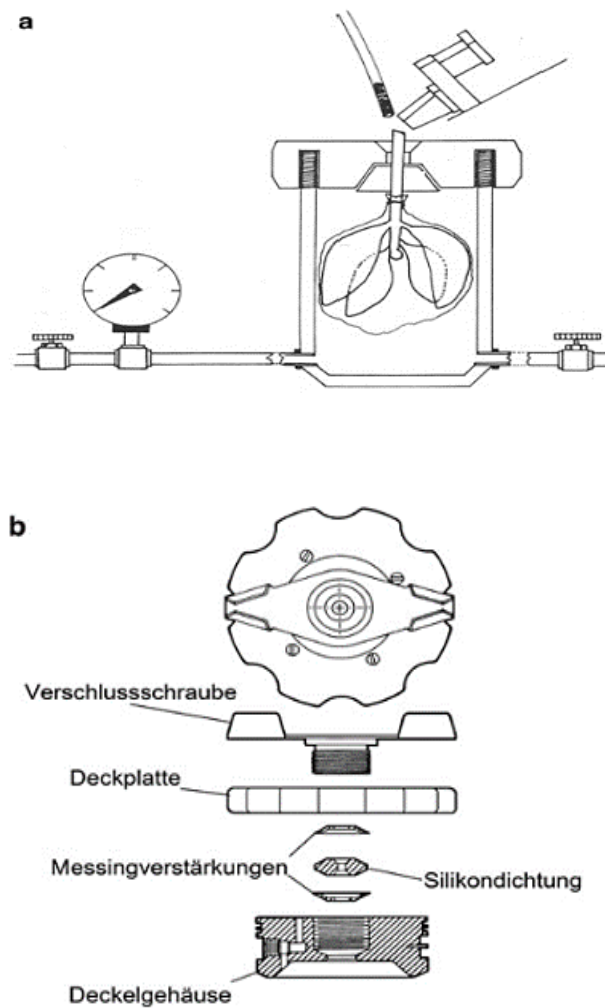


Abbildung 12 Schematischer Aufbau einer Scholander-Druckkammer (Matyssek & Herppich 2017, verändert).

Zur exakten Beobachtung des Xylemaustritts wird eine Handlupe verwendet. Empfehlenswert ist das Tragen einer Schutzbrille, da bei höheren Drücken es vorkommen kann, dass ein Blattstiel gequetscht und explosionsartig durch die Dichtung „geschossen“ wird. Eine Scholander-Druckkammer sollte nie mit Öl gereinigt und gesäubert werden, da sonst bei Druckerhöhungen die Gefahr einer Explosion besteht.

Abbildung 13 liefert einen tiefgründigeren Einblick hinsichtlich des verwendeten Messapparates „Scholander-Druckkammer“ wie er bereits im schematischen Aufbau zuvor vorgestellt wurde. Der Absperrhahn ermöglicht den Zufluss von der Stickstoffflasche zur Blattkammer. Mithilfe des roten Reduzierventils kann der exakte Zufluss von Stickstoff gesteuert und gestoppt werden. Für die präzise Bestimmung des Wasseraustritts am Stielende des Blattes dient ein Handlupe, um eine weitere Stickstofferhöhung inmitten der Blattkammer zu verhindern. Das auf der folgenden Seite gezeigte Messinstrument wurde 2021 und 2022 innerhalb dieses Messkonzeptes verwendet.

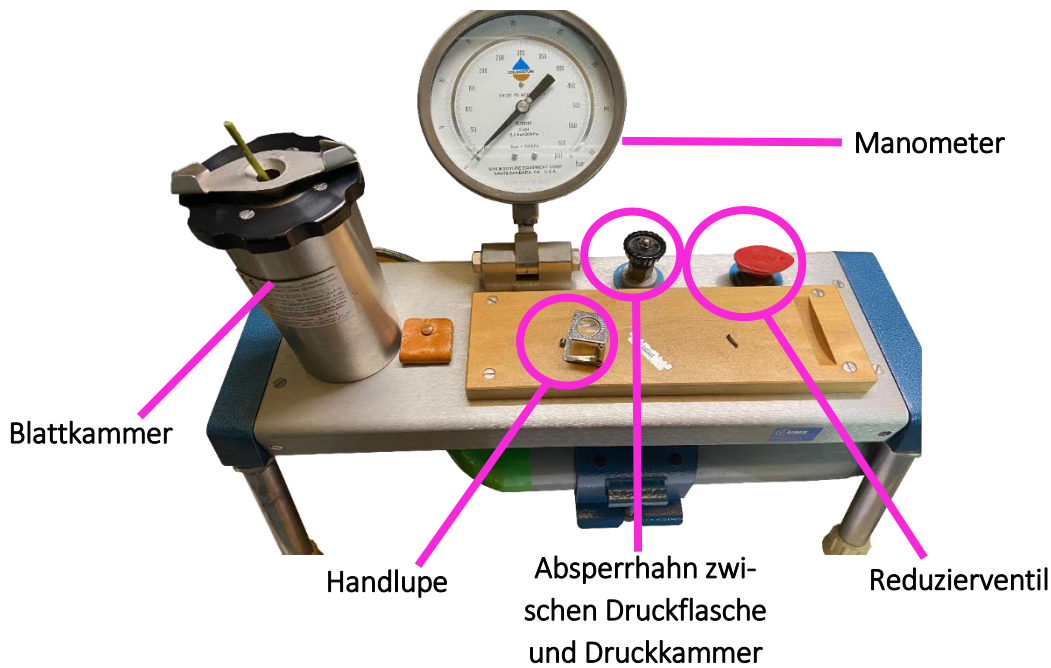


Abbildung 13

Scholander-Druckkammer – Armatur, Pfeddersheim; [Eigene Darstellung 2021].

Auftretende Schwierigkeiten und Problematiken, welche bei Blattwasserpotentialmessungen vorherrschen können, werden im folgenden Kapitel 4.2.3 beleuchtet.

4.2.3 Fehlermöglichkeiten und Probleme bei Blattwasserpotentialmessungen

Blattwasserpotentialmessungen mittels Scholander-Druckkammer sind bei Beachtung der Anleitungsschritte einfach zu handhaben. Jedoch zeigt eine Vielzahl älterer Untersuchungen bemerkenswerte Ergebnisse. Bei zunehmend negativem Wasserpotenzial wird die Wasserspannung im Xylem oftmals geringer als Vergleichsergebnisse von Psychrometer gemessen. Über die Gründe hierfür kann man nur spekulieren. Eine mögliche Erklärung ist, dass sich nach Anlegen des Kammerdruckes das Wasser im Gewebe anders verteilt als dies vor dem Abschneiden der Fall war. Dann ist auch ein höherer Kammerdruck nötig, um dieses zusätzliche Wasservolumen aus dem Symplasten bereitzustellen - unabhängig davon, ob sich das Gewebe inner- oder außerhalb der Druckkammer befindet. Von daher ist es sinnvoll, den Blattstiel kurz zu halten, um die genannten Fehlermöglichkeiten ausschließen zu können. Die Schnittfläche muss auf jeden Fall ersichtlich sein. Der eingebaute Blattstiel darf mechanisch nicht zu stark beansprucht werden. Wird er trotz vorsichtigen Arbeitens beim Einbau abgequetscht, sollte eine neue Probe vollzogen werden. Ein Behandeln und Nachschneiden können die Messergebnisse verfälschen. Der gemessene Gleichgewichtsdruck ist letztlich meist kleiner und das Blattwasserpotential damit überschätzt. Ein schonendes Abtrennen des Rebenblattes mittels scharfer Klingen wie z. B. Rasierklingen ist ratsam. Findet nach dem Abschneiden des Blattes eine Transpiration statt, so verringert sich dessen symplastischer Wassergehalt irreversibel, da keine Aufnahme von Wasser mehr möglich ist; Folgeerscheinung ist das Absinken des Blattwasserpotentials. In Bezug auf das Ψ_{stem} ist die Regulierung der Transpiration von hoher Wichtigkeit. Mittels Einpacken (PVC-Tüten) des Blattes wird ein Umgebungsraum um das

Blatt erzeugt, der sich rasch mit Wasserdampf sättigt und einen gesteigerten Grenzschichtwiderstand erzeugt. Eine ausreichende Größe der PVC-Tüten sollte gewählt sein, um dadurch keine Beschädigung des Blattes zu erhalten.

Ein weiterer wichtiger Aspekt, welcher die Genauigkeit der Messergebnisse beeinflussen und verfälschen kann, ist die Intensität, mit der der Kammerdruck erhöht wird. Diese sollte idealerweise kleinschrittig vorgenommen werden und je nach Material $0,02 - 0,002 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ nicht überschreiten. Dies ist aus zwei Gründen ratsam:

1. Eine zu schnelle Druckerhöhung führt zu einem deutlichen Lufttemperaturanstieg innerhalb der Druckkammer. Da sich das osmotische Potenzial, wie die Van-'t-Hoff-Gleichung⁸ verdeutlicht, sich mit der Lufttemperatur ändert, sollte unter isothermischen Bedingungen gearbeitet werden.
2. Eine Temperaturänderung der Luft tritt auch dann auf, wenn der Druck in der Kammer wieder reduziert wird. Bei sehr hohen Raten kann es zu einer deutlichen Abkühlung auf Lufttemperaturen weit unter $0 \text{ }^\circ\text{C}$ kommen. Das Problem ist vernachlässigbar, wenn die Probe nach Beendigung der Messung verworfen wird.

4.2.4 Wasserpotentialmessung

Zur Wasserpotentialmessung an Reben in den Versuchsjahren 2021 bis 2022 wurde die traditionelle, pflanzenbasierende Messmethode der Scholander-Druckkammer verwendet. Dabei wurden sowohl das Blatt- als auch das Stammwasserpotential bestimmt, um schlussendlich deren Wasserstatus bzw. den Trockenstress zu ermitteln, in welchem sich die Rieslingreben befinden (van Leeuwen et al. 2009; Centeno et al. 2010). Da die überwiegende Mehrheit der Pflanzen im Boden wurzeln und in den Luftraum wächst, ist der Wasserfluss vom Boden durch die Pflanze in die Atmosphäre bestimmt. Deshalb wird hierbei vom hydraulischen Boden-Pflanze-Atmosphäre Kontinuum gesprochen (Soil-plant-atmosphere-continuum). Messungen des Pflanzenwasserpotentials durch das Scholander-Druckkammer-System werden nach der Vorgehensweise und Grundlage des SPAC durchgeführt. Das Bodenwasser wird durch die Weinrebe in die Atmosphäre transportiert. Wird der Wasserstrom im Xylem durch das Trennen eines Rebenblattes und das Abschneiden dessen Stielendes unterbrochen, wird ein Zurückziehen der Wasserfäden an der entsprechenden Schnittstelle unter mikroskopischer Untersuchung ersichtlich; eine Unterbrechung der Wasserspannung ist das Resultat. Durch den vorherrschenden künstlichen Druck inmitten der Scholander-Kammer wird die vorherige Spannung wiederhergestellt und das Wasser aus dem abgetrennten Stielende gepresst. Der aufgebrachte Druck ist dem Wasserpotential der Rebe gleichzusetzen (Waring 1970). Es wurden grundsätzlich zwei Varianten der Wasserpotentialmessung durchgeführt:

- Fröhorgendliches Blattwasserpotential (04:00 – 06:00 Uhr)

⁸ Die Van't-Hoff-Gleichung ist der Thermodynamik zuzuordnen und ist nach dem Chemiker Jacobus van't Hoff benannt. Sie stellt die Verbindung zwischen der Temperatur bei gleichbleibendem Druck und der Lage des Gleichgewichtes einer stattfindenden chemischen Reaktion dar (Atkins und Paula 2012).

- Mittägliches Stammwasserpotential (Abdeckung der Rebblätter durch PVC-Tüten: 11:30-14:00 Uhr)

Beide Verfahrensweisen sind mit dem Vorteil verbunden, dass eine direkte Ermittlung der Messwerte an der Weinrebe erhoben werden kann. Durch diese Untersuchungs- methode kann das gesamte für die Weinrebe erreichbare Wasser identifiziert werden, ohne jegliche Wurzelverteilung- und dichte in Erfahrung gebracht zu haben. Prior (2005), Jones (2004) und Geyrhofer (2011) untermauern dies, indem sie aufzeigen, dass diese Methode aufgrund ihrer Messgenauigkeit das momentane Erhebungsinstrument ist, welches eine Beurteilung im gesamten Wurzelbereich der Rebe erlaubt.

Frühmorgendliches Blattwasserpotential

Die Erhebung des Ψ_{pd} wurde kurz vor Sonnenaufgang (04:00 bis 06:00 Uhr) ab dem Acht- blattstadium (BBCH⁹ 10 bis 19) bis zur Lese (BBCH 89) im 2- bzw. 3-Tagesrhythmus an Rebenblättern realisiert, um somit vor Einsetzen der Sonnenstrahlung in den Morgen- stunden das Öffnen der Blattschließzellen und dementsprechend eine Transpiration an den Rebenblättern zu vermeiden. 2021 fand die Messung im 3-Tagesrhythmus statt. 2022 wurde aufgrund der vorgenommenen Bewässerungen am Folgetag eine Blattwas- serpotentialmessung durchgeführt, um eine mögliche Linderung des Trockenstressses zu erfassen. Dies geschah an sechs intakten Rebenblättern pro Versuchsvariante. Da in der Nacht geringfügig bis keine Transpiration stattfindet, aber noch Wasser zu den Reborga- nen nachströmt, gleichen sich allmählich die Potenzialwerte der Blätter dem Bodenwas- serpotential an (Schultz und Steinberg 2002b). Somit kann kurz vor Sonnenaufgang indi- rekt an den Blättern die Saugspannung gemessen werden, mit denen die Wurzeln das Wasser dem Boden entziehen (Choné et al. 2001a). Ein wichtiger Faktor, welcher nicht in Vergessenheit geraten soll, ist die über Nacht mögliche Wiederbefeuchtung (Rehydra- tion) der Blätter, was einen negativen Effekt der zu messenden Ψ_{pd} mit sich bringt (Ameglio et al. 1999). Innerhalb unbeständiger Witterungsphasen, gekennzeichnet durch Regentage, konnten keine Bestimmung der Ψ_{pd} –Werte vorgenommen werden.

Mittägliches Stammwasserpotential

Das mittäglich ermittelte Stammwasserpotential stellt die gleiche Messmethode bezüg- lich des Blattwasserpotentials der Rieslingrebe dar. Die Messung fand zur Mittagszeit zwi- schen 11:30 und 14:00 Uhr statt. Hierzu wurden pro Variante sechs intakte und vollent- faltete Blätter zwei Stunden vor Messbeginn in undurchlässige Plastikbeutel (PVC-Tüten) eingepackt, um somit die Transpiration der Blätter zu eliminieren (Begg und Turner 1970). Aufgrund der Anpassung bzw. Annäherung des Wasserpotential innerhalb des Blattes und dem des Stamms wurde sich bewusst nach Empfehlungen von Williams und Araujo (2002) auf eine Abdeckzeit von zwei bis zweieinhalb Stunden bezogen, da inner- halb dieser Zeitspanne sich ein Gleichgewicht zwischen Wasserpotential des Blattes und

⁹ Diese Abkürzung beschreibt die phänologische Rebenentwicklung nach der BBCH-Skala. Die Abkürzung definiert sich durch: Bun- desanstalt-Bundessortenamt-Chemische Industrie. 1994 wurde diese Skala veröffentlicht (Lorenz et al. 1994).

dem des Xylems einstellt (van Leeuwen et al. 2009). Aufgrund dessen, das Wasserpotentialmessungen an mehreren Blättern derselben Rebe einen niedrigeren Variationskoeffizienten bei Ψ_{stem} aufweisen als im Vergleich zu jenem des Ψ_{pd} und diese bei gleichen Witterungsbedingungen durchgeführt werden sollen, um einen Vergleich der Bodenwasserverfügbarkeit zwischen unterschiedlichen Messterminen zu ermöglichen, wurde unter anderem eine Korrelation mit dem VPD der Luft herangezogen (Heßdörfer 2015).

An drei strahlungsfreien Tagen der beiden Ermittlungsjahre wurde das Ψ_{stem} im Tagesverlauf mithilfe der Scholander-Druckkammer festgestellt. Der Messzeitraum lag zwischen 04:00 und 22:00 Uhr und wurde im Zweistundenrhythmus wiederholt.

4.2.5 Bodenwassergehaltsmessung

Der Wassergehalt des Bodens wurde mithilfe der Bodenfeuchtesonde PasPort Soil Moisture nach der FDR-Methode ermittelt. Bei dieser Vorgehensweise wird der volumetrische Wassergehalt des Bodens bestimmt. Dieser Ansatz bietet Informationen zum absoluten Wassergehalt einer Volumeneinheit des Bodens, allerdings kann keine Wertung zur Saugspannung des Bodenwassers getroffen werden. Hierzu wird eine Tiefenbohrung in Rebennähe, Abstand zur Rebe ca. 0,30 m, (1 x wöchentlich) durchgeführt. In der Untersuchung wird sich auf das örtliche Hauptwurzelwerk (0,10 m - 1,00 m) bezogen – Messung je 0,20 m.

4.2.6 Rebenbewässerung

Die Bewässerung der Rieslingreben wurde mittels drucksensitiven Premiumtropfrohren (Tropfabstand 0,5 m; Flussrate 1,6 l/h) realisiert. Diese befinden sich in einem Abstand zum Boden von 0,5 m. Zu jedem Bewässerungstermin wurden 10 l/Rebe ausgebracht. Dabei orientierten sich die wöchentlichen Wassergaben an dem kontinuierlich ermittelnden frühmorgendlichen Wasserpotentialmessungen. Als Schwellenwert dient der von Schultz definierte Richtwert von circa -0,30 MPa (Schultz und Matthews 1997).

Anzumerken ist, dass aufgrund zahlreicher Regenereignisse für das Versuchsjahr 2021 keine moderate Bewässerung (MB) durchgeführt werden konnte. 2022 konnte diese Erhebungsform aufgegriffen werden und wurde in den entsprechenden Abbildungen integriert.

4.2.7 Feldmethode Blattstiel-Nitrat-Test

Der Nitratgehalt der Reben wurde mit dem sogenannten Blattstiel-Nitrat-Test durchgeführt. Mittels dieses Schnelltests kann der Stickstoff-Versorgungszustand der Rebe bestimmt werden, was Rückschlüsse auf den Trockenstress, N-Düngung oder die Bodenpflege zulässt. Die Durchführung erfolgte ab dem Austrieb (BBCH 09-15) bis zur Lese (BBCH 38-89). Innerhalb dieses Zeitraums werden aus dem oberen Bereich der Haupttriebe, 0,40 m bis 0,50 m unterhalb der Triebspitze der langen Laubwand, 0,20 m - 0,30 m in den verkürzten Laubwänden, 15 Blätter aus der zu prüfenden Anlage entnommen. Anschließend werden die Blattstiele von der Blattspreite getrennt und die Stiele in Stücke zerschnitten. Danach wird aus den Stielstücken der Saft mit einer Knoblauchpresse ausgepresst. Der Stielsaft wird anschließend auf den Nitrat-Teststreifen (*Ariana Industrie*)

gegeben mit einer Wartezeit von einer Minute, bis sich der Streifen nicht mehr verfärbt. Der Verfärbungsgrad gibt die Konzentration an Nitrat NO_3^- an. Aufgrund der breiten Nitrateinstufung seitens Ariana Industrie wurde eine kleinteiligere Nitrat Abstufung vorgenommen. Hierzu wurde zuerst mittels Color Assist-App die jeweiligen RGB-Farbspektren, welche von der Firma Ariana Industrie zur entsprechenden Nitratkonzentration vorgegeben wurde, analysiert. Somit konnten die jeweiligen RGB-Bereiche festgestellt werden. Darauf aufbauend wurden die RGB-Farbspektren mithilfe der App von den sich verfärbten Nitratstäbchen ermittelt. Im nächsten Schritt wurde dieser Wert mit dem der Nitrateinteilung von Ariana Industrie verglichen. Abschließend wurde der RGB-Wert der Stäbchen auf den von Ariana-Industrie hochgerechnet, um eine kleinteilige Nitratangabe zu erhalten.

Die Durchführung erfolgte im 3-Tages-Rhythmus, simultan zu den Wasserpotentialmessungen. Zu Beginn dieser Teilmessungen wurden jährliche Bodenanalysen im Labor „Diakonie Werkstätten“ in Bad Sobernheim durchgeführt. Die organische Substanz von Humus (%) befand sich mit 2,85 % im Gleichgewicht. Der nach LUFA-Stufe C anzustrebender Wert beläuft sich für diese Bodenart zwischen 2,5 und 3 % organischem Humus.

4.2.8 CO_2 - und Lichtmessung

2022 wurden CO_2 - und Lichtmessungen im 2- bzw. 3-Tages-Rhythmus (gleicher Messtag wie Wasserpotentialmessungen) zwischen 12:00 und 14:00 Uhr durchgeführt. Für diese Erhebung wurde in eine lichtdurchlässige wiederverschließbare Plastiktüte mit den Maßen 0,40 m x 0,50 m ein CO_2 -Sensor (*Pasco Smart Gas-Sensor*) samt UV-Sensor mit einem am Rebstock wachsenden Rebenblatt in die Plastiktüte gepackt. Aufgrund des Zippverschlusses konnte eine Luftundurchlässigkeit gewährleistet werden. Für ein optimales Abdichten an der Eindringstelle des Blattstieles in die Tüte wurde eine plastische Dichtungsmasse (*Fermit Plastic-Dichtungsmasse*) verwendet. Mittels zwei beweglicher Metallhalterungen, welche oberhalb sowohl links als auch rechts an der Tüte durch zwei Foldback-Klammern angebracht wurden, konnte die Vorrichtung in den Drahtrahmen der Rebzeile eingehakt werden. Eine Messdauer von 5 Minuten pro Variante mit einer Messwiederholung von $n = 4$ wurde vollzogen.

4.2.9 Blattflächenberechnung

2021 wurde eine Blattflächenmessungen vorgenommen. Ein intakt-ausgewachsenes Rebenblatt weist eine Blattfläche zwischen 230 bis 250 cm^2 der Sorte Riesling auf. Damit für alle Erhebungen gesunde Blätter mit einer nahezu gleichen Fläche aus der Versuchspartizelle entnommen werden konnten, wurde eine exakte Flächenberechnung des Weinblatts mit anschließendem 3D-Druck vollzogen. Diese diente im Anschluss als Schablone, welche für alle Blattmessungen eingesetzt wurde. Ein vollentfaltetes Rebenblatt wurde auf einem weißen Untergrund mittels Maßstab (Lineal) eingescannt. Das gescannte PNG-Bild wurde mit der Software ADOBE Photoshop bearbeitet. Der DPI-Wert, welcher den Wert der Bildpunkte pro Zoll angibt, wurde beim Erstellen der Photo-shop-Datei auf 300 eingestellt. Anschließend wurde der Maßstab auf 1:1 skaliert (1 cm Maßstab = 1 cm in Photoshop). Mithilfe der Zentimeterskala wurde das digitale Lineal eingeblendet.

Hilfslinien sorgten für Orientierungen, wodurch die Skalierung erstellt wurde. Ein resultierendes Hilfsgitter, mit dem Abstand von 1 cm half bei der weiteren Skalierung des Bildes. Der Transformationsmodus skalierte das gescannte Blatt, bis 1 cm Maßstab mit dem Abstand der 1 cm- Hilfslinien miteinander übereinstimmten (1:1 Maßstab). Im zweiten Schritt wurden Vorbereitungen für die exakte Messung im Photoshop getroffen. Bei einem DPI-Wert von 300 entspricht 1 cm 118,11 Pixeln. Um dieses Verhältnis zu erhalten, musste der Zeilenabstand angegeben werden. Hierzu waren Grundeinstellungen wie zum Beispiel Längeneinheit und Pixellänge von Nöten, um eine exakte Pixelanzahl pro Zentimeter vorzugeben. Die erhaltene Pixelfläche ließ sich somit präzise angeben und ein 3D-Druck wurde ermöglicht.

4.2.10 Tagesmessungen

Innerhalb der Tagesmessungen (24 h Messung) wurden Oberflächentemperaturen und Transpirationsraten jeder Variante durch Mobilmessungen identifiziert. Zur Erfassung der Oberflächentemperaturen, welche sich durch Boden-, Beeren- und Blattemperatur definieren lassen, wurde die Wärmebildkamera Testo 885 verwendet. Der Standort der zu untersuchenden Blätter wurde vorab mit farblichen Bodenmarkierung gekennzeichnet, um ein rasches Ansteuern der Blattmessungen zu ermöglichen (vorherig ausgewählte Blätter durch 3D-Schablone). Diese Blattflächengröße wurde ausgewählt, da vollständig entwickelte Laubblätter dieser Größenordnung aussagekräftige Daten liefern.

Für das Lokalisieren der TR wurde mittels Rasierklinge das Rebenblatt (samt Stiellänge von 0,02 m) vom restlichen Stielgerüst abgetrennt. Sowohl das Stielende an der Rebe als auch das abgetrennte Stielende wurden mit einem vaselineartigen Verschluss ummantelt, um ein Austreten von Flüssigkeiten der Saftflussbahnen zu erlegen. Augenblicklich wurde mithilfe einer Milligrammwaage (*Firma Oriá*), welche von einem Plastikkasten umgeben war, um Lufteinflüsse zu verhindern, gewogen. Nach Ermittlung des Momentan-gewichtes wurde das Rebenblatt an den vorherigen Stiel per durchsichtigem Klebeband und Klammern befestigt, um eine Regulierung der Blatttranspiration von 5 Minuten zu gewährleisten. Ein Sonnenschirm oberhalb des Messtisches diente als Schutz vor der direkten Besonnung. Eine zweite Wägung erfolgte. Das zuvor erfasste „Startgewicht“ und das resultierende „Endgewicht“ wurden voneinander subtrahiert, um eine Gewichts-differenz zu erhalten. Bei der Anbringung der Rebenblätter ist außerdem stets darauf zu achten, dass der abgetrennte Stiel identisch an den vorhandenen Stielansatz angesetzt wird, um gleiche zelluläre Transportmöglichkeit der Leitbündel wie zum Beispiel von Xylem und Phloem zu ermöglichen. Sprossstrukturen dienten in diesem Falle als visuelle Unterstützung.

2022 wurde zusätzlich die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR), speziell die photosynthetische Photonenstromdichte (PPFD), im Unterstockbereich durch eine mobile Datenerhebung erfasst. Hierzu wurde ein UV-Lichtsensor (*Pasco wireless light*) zuerst am Boden montiert, um so die einfallende Globalstrahlung samt PAR im Unterstockbereich zu ermitteln. Nach einer Datenerfassung von einer Minute wurde der Sensor mit der Lichtempfangsseite für eine Minute in Bodenrichtung befestigt (0,70 m ü. Gr.), um so die rückgestrahlte Strahlung, welche in den Beeren- und Laubwandbereich zurückgeworfen

wird, zu prüfen. Diese Teilmessung fand im gleichen Zeitsektor wie die Erhebung aller Oberflächentemperaturen statt.

4.2.11 Reifebeobachtung/Reifeverlauf

Der Reifeverlauf jeder Variante wurde in den Versuchsjahren 2021 und 2022 jeweils ab August wöchentlich beobachtet und ermittelt. Hierfür wurden 100 Beeren randomisiert je Feldwiederholung entnommen. Nach Entnahme der Proben wurden diese zuerst mithilfe einer digitalen Milligrammwaage (*Firma Oria*) gewogen, per Hand eingemaischt und der Saft mit einem Sieb ausgepresst. Zur Erfassung des Mostgewichtes diente ein Refraktometer (*Kern Ora-E-Serie*), die Gesamtsäure wurde mittels der potentiometrischen Titration mit 1/3 N Kalilauge auf dem Endpunkt pH 7.0 ermittelt.

4.2.12 Traubenertrag

Alle Varianten wurden getrennt geerntet und das Gewicht des Erntegutes mittels Tonnenwaage bestimmt. Eine gleichzeitige Mostbestimmung wurde mittels Refraktometer (*Kern Ora-E-Serie*) vollzogen. Sowohl Ertrag als auch °Oechsle wurden auf einen Hektar aufgerechnet.

4.2.13 Schnittholzgewicht

Das vegetative Wachstum der Rieslingreben wurde durch das Schnittholzgewicht bestimmt. Dazu wurde die Bestimmung des Frischholzgewichtes während des Rebschnittes im Winter an jeweils 30 Reben jeder Variante und Feldwiederholung durch das einjährige Rebholz bis auf eine Rute zurückgeschnitten und gewogen.

4.2.14 Erfassung der Witterungsdaten

Die benötigten Klimadaten wurden mittels einer festinstallierten Wetterstation (Eigentum Ihrig) der Marke Davis Vantage Pro2 erhoben. Um mögliche Messungenauigkeiten zu berücksichtigen, wurden innerhalb von fünf Messeinheiten mittels einer Wetterstation des Forschungsinstituts TU Kaiserslautern der Marke Infralog WXT5000 Vergleichsmessungen durchgeführt, welche eine gegenseitige Abweichung von 1,9 % ergab. Somit konnte dieser Wert in den späteren Daten eingepflegt werden. Darüber hinaus wurden Daten der Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz im Nachbarort Leiselheim aufgezeichnet und herangezogen. Die ermittelnden Daten wurden im fünfminütigen Intervall gemittelt oder summiert wiedergegeben. Folgende Klimadaten wurden erfasst:

- Lufttemperatur (0,2 m u. 2 m ü. Gr.)
- Niederschlag (Σ) (2 m ü. Gr.)
- Luftfeuchte (Min./Max.) (2 m ü. Gr.)
- Verdunstung (2 m ü. Gr.)
- Globalstrahlung (Min./Max.) (2 m ü. Gr.)

Das VPD der umgebenden Luft wurde mithilfe der von Bucks (1981) herausgestellten Formel berechnet.

4.2.15 Verifizierung und statistische Auswertung

Sowohl für die erhobenen Ψ_{pd} -/ θ_v -Werte, die Ψ_{stem} -/ VPD-, Globalstrahlungs- und Lufttemperaturwerte, die TR-/ Oberflächentemperaturen als auch für Mostinhaltsstoffe wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Die Unterschiede im vegetativen und generativen Wuchs wurden mittels einer einfaktoriellen Varianzanalyse und anschließendem Scheffé-post-hoc-Test¹⁰ berechnet. Hierzu wurden die Ergebnisse gemittelt und anschließend mit einer zweifaktoriellen Varianzanalyse und darauffolgendem Scheffé post-hoc-Test verrechnet. Die statistische Auswertung der Daten sowie die Erstellung der Grafiken, Tabellen bzw. das Anfertigen des Textes wurde mithilfe der Programme „Excel“ und „Word“ (Microsoft, USA) geleistet.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Analyse der Blattwasserpotentialmessungen, welche durch eine hohe Taktung von Messtagen einen Aufschluss über die jeweiligen Wasservorräte der Versuchsvarianten liefern soll. Tagesmessungen (24 h) sollen darüber hinaus Informationen über Blatttranspiration und Oberflächentemperaturen für OB, HH, HH+ und MB darstellen. Teilmessungen wie CO₂-Aktivität der Rebenblätter oder gar der Nitratgehalt im Blattstiel stehen unmittelbar in Verbindung zum örtlich vorherrschenden Wasserhaushalt, welcher durch wöchentliche Bodenfeuchtemessungen ermittelt wird. Reifeparameter wie Traubenertrag, Oechsle und Säure werden peripher erhoben. In den Wintermonaten wird zu guter Letzt das Schnittholzgewicht der jeweiligen Erhebungsvarianten ermittelt. Diese umfangreiche, komplexe und individuell konzipierte Messmethode unter Berücksichtigung der gegliederten Versuchsformen wird in dieser Arbeit erstmalig durchgeführt.

Im Folgenden sollen die Untersuchungsergebnisse (Kapitel 5), die dieser Arbeit zu Grunde liegen, dargelegt werden. Saisonale Witterungs- und Phänologieverläufe werden in Kapitel 5.1 dargestellt, gefolgt von den örtlichen Bodenfeuchtekenntnissen (Kap. 5.2). Im dritten Ergebniskapitel wird Bezug zur Stickstoffversorgung im Blattstiel genommen. Im Kapitel 5.4 soll betrachtet werden, ob das mittägliche Stammwasserpotential in unmittelbarem Zusammenhang zu meteorologischen Parametern wie Globalstrahlung, Lufttemperatur und dem VPD steht. Anschließend wird auf die CO₂-Aufnahme unter variierenden frühmorgendlichen Blattwasserpotentialen eingegangen (Kap. 5.5). Die Fülle an Datenmaterial der Tagesmessungen ermöglichten einen tiefgründigen Einblick der Oberflächentemperaturen, der photosynthetisch aktiven Strahlung im Unterstockbereich, sowie der inneren Lufttemperatur der Laubwand (Kap. 5.6 - 5.8). Blatttranspiration, generative und vegetative Wuchsleistungen runden das Ergebniskapitel ab (Kap. 5.9 - 5.11).

¹⁰ Der Scheffé-Post-hoc-Test setzt gemeinsame Vergleiche gleichzeitig für jede mögliche paarweise Kombinationen der Mittelwerte durch. Es wird die F-Stichprobenverteilung verwendet. Dieser Test kann verwendet werden, um einerseits paarweise Vergleiche durchzuführen, aber auch mögliche lineare Kombinationen von Gruppenmittelwerten zu prüfen. Der Scheffé-Test verlangt die Varianzhomogenität in den Gruppen, jedoch ist er gegen die Verletzung dieser Voraussetzung unempfindlich (Tamhane 1977).

5 Ergebnisse

Die Witterungsangaben der Versuchsjahre 2021 und 2022 beziehen sich auf die Wetterstation Davis Vantage Pro2 innerhalb der Versuchsparzelle „Pfeddersheimer-Kreuzblick“ (Abbildung 9) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1991-2020) der Wetterstation Agrarmeteorologie RLP für Leiselheim.

5.1 Witterung und Phänologie

Versuchsjahr 2021

Mit einer Erhöhung der Lufttemperaturmittelwerten von 0,5 K in beiden Neujahrsmonaten Januar und Februar als der vieljährige Mittelwert von 1991-2020 wurde in das Jahr 2021 gestartet. Trotz eines deutlichen Pluses an Sonnenscheinstunden und eines gleichbleibenden Lufttemperaturverlaufs im Vergleich zum langjährigen Mittel konnte im März keine Verfrühung der Vegetation ermittelt werden. Durch verhältnismäßig niedrige Lufttemperaturen und zugleich eine überdurchschnittlich hohe Anzahl der Sonnenscheinstunden in den Monaten April und Mai (12c) wurde ein Austrieb der Reben (BBCH 09) am 05. Mai registriert. Im Vergleich zum langjährigen Mittel 1991-2020 der Austriebstermine wurde der Austrieb im Jahr 2020 auf den 16. April datiert. Das vergangene Jahrzehnt war mit Ausnahme des Jahres 2013 von einer immer früheren Rebentwicklung geprägt. Zum Vergleich, 2008 lag der Austriebstermin am 11. Mai, gefolgt von einem minimal verfrühten Blühtermin am 10. Juni. 2013 war der Austrieb am 03. Mai, die Blüte jedoch erst am 25. Juni zu verzeichnen. Die Rieslingslese wurde in beiden Jahren Mitte Oktober vollzogen. Mit dem Fokus auf das vergangene Jahrtausend weist das Jahr 1996 ein Spiegelbild der Entwicklung zu 2021 auf. In den Monaten März bis Mai des Jahres 2021 konnte ein im Vergleich zum langjährigen Mittel deutliches Niederschlagsdefizit festgestellt werden (Abbildung 14b). Eine einsetzende Regenperiode führte in den Sommermonaten Juni (241 % des langj. Mittel) und Juli (113 %) zu emporschnellenden Niederschlagssummen und demzufolge zu ansteigenden Bodenfeuchtwerten (Abbildung 14b).

Aufgrund der beiden kühl geprägten Monate April und Mai erzielte der Sommermonat Juni eine überdurchschnittliche Lufttemperatur (Abbildung 14a). Der Blütebeginn (BBCH 63) ließ sich am 17. Juni feststellen, was eine Verschiebung von ca. 12 Tagen hinter dem Jahr 2020 und sechs bis sieben Tage hinter dem langjährigen Mittel seit 2000 bedeutet. Nach einer im Juni kurzzeitig aufgetretenen Hitzeperiode, gefolgt von Niederschlägen (152 mm), war ungeschütztes Blattwerk (Fungizidbehandlung) dem Befall des Peronosporas ausgesetzt. Trotz der kühleren Witterung im Sommermonat Juli und einer ausreichenden Wasserversorgung schritt die Beerenreife sehr energiegeladener voran, weshalb der Zeitpunkt der Veraison¹¹ um den 23. August erreicht wurde. Eine im September und Oktober über dem Durchschnitt sich befindende Sonnenscheindauer bzw. Lufttemperatur konnten die Ertragsminderung nicht kompensieren. Grund hierfür waren die im Juni bis Oktober auftretenden Regenereignisse, welche ein Abtrocknen des Blattwerkes und der

¹¹ Reifebeginn im Weinbau. Sie stellt die Verfärbung der Beeren dar (Robinson 2015).

Beeren kaum bis gar nicht ermöglichte (Abbildung 14b). Als Folgeerscheinung mussten Winzer*innen mit unzähligen Fungizidbehandlungen die heimtückischen Pilze wie *Peronospora* oder *Botrytis* bekämpfen. Überschneidungen von Regenereignissen und Spritzabfolgen reduzierten die Fungizidresistenz, was den diesjährigen Ertrag in der Versuchsparzelle zu 2019 um bis zu 10 % minderte.

Versuchsjahr 2022

Mit Beginn des neuen Jahres 2022 fielen im Januar nahezu gleiche Niederschlagssummen wie das langjährige Mittel aufzeigt. Im Februar und März lag die Summe der Monatsniederschläge deutlich unter dem Durchschnitt von 1991-2020. Bis Ende April waren die kumulierten Niederschläge ähnlich hoch wie im regenreichen Vorjahr 2021. Die Monatsdurchschnittslufttemperaturen befanden sich von Januar bis März über dem langjährigen Durchschnitt. Dies gilt speziell für den Februar, der um ca. 3 K zu warm war. Der April war um knapp 1 K zu kalt, weshalb der Austrieb trotz der warmen Vormonate nur etwa im langjährigen Mittel in der letzten Aprildekade, dem 25. April, lag. Überdurchschnittliche Sonnenscheinzeiten bis Ende April untermauerten dies. Die Sommermonate Mai bis August zeichneten sich durch stark erhöhte Monatsmittellufttemperaturen, führend war hierbei der August mit 3,9 K über dem langjährigen Mittel, aus. Tageslufttemperaturen kletterten auf 40 °C innerhalb der Versuchsparzelle. In Bezug auf vorherrschende Niederschlagsereignisse zwischen Mai und August lag lediglich der Sommermonat Juni mit 16,5 mm über dem langjährigen Durchschnitt (Abbildung 14b). Mai, Juli und August waren extrem trocken, was eine gravierende Trockenstressphase mit sich brachte. Eine verknappende Wasserverfügbarkeit führte zu einer teilweisen Beeinträchtigung des vegetativen Wachstums. Die diesjährige Blüte erfolgte rund 11 Tage früher als im Vorjahr, dem 6. Juni. Die Reife wurde innerhalb der Versuchsparzelle am 3. August festgestellt. Versuchsvarianten mit einer reduzierteren Wasserverfügbarkeit ließen bis dato erste Reifeverzögerungen ermittelt, aufgrund nicht vorhandenem Wasser. Der durch reichlich Niederschlag geprägte September charakterisierte sich durch in der Norm befindlichen Lufttemperaturen. Darüber hinaus reduzierte sich das Intervall der Sonnenscheindauer im langjährigen Mittel (1991-2020) und das der saisonalen Sonnenscheindauer in 2022 (Abbildung 14cc). Verglichen mit dem Vorjahr waren die Mostgewichte zum Erntebeginn höher und die Säure wesentlich stärker abgebaut. Kühlere Lufttemperaturen und ergiebigere Niederschläge hatten bis dato den Mostgewichtanstieg und den Säureabbau marginal ausgebremst. Alle langen Laubwände wurden am 26. September geerntet. Die Lese aller verkürzten Laubwandvarianten wurden verzögert am 13. Oktober eingefahren.

2022 wurden insgesamt sechs Bewässerungstermine zwischen dem 17. Juli und dem 28. August innerhalb der langen Laubwand in MB durchgeführt.

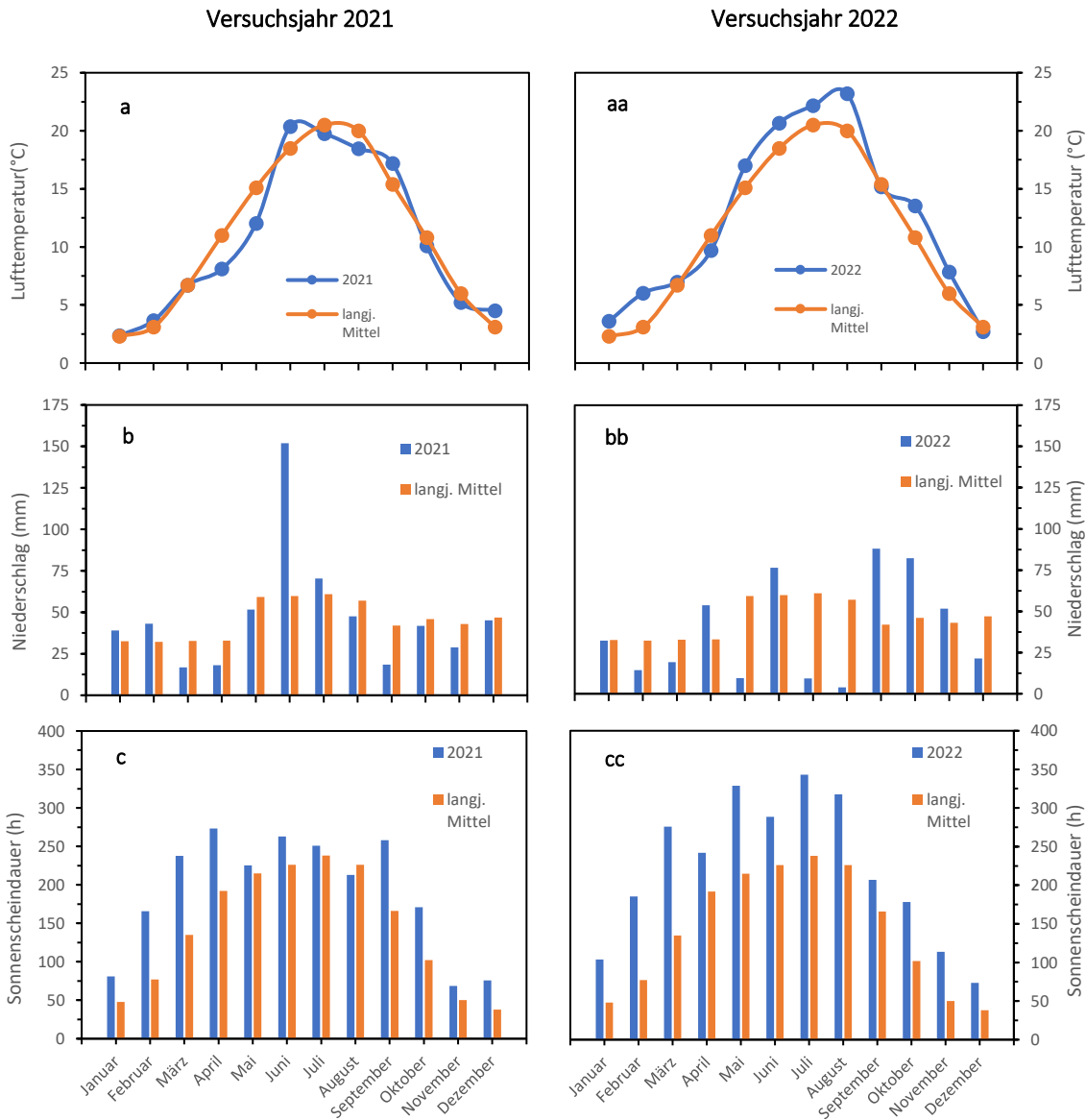


Abbildung 14 Monatsmitteltemperatur (a+aa), Niederschlagssummen (b+bb) und Sonnenscheinstunden (c+cc) der Versuchsjahre 2021 und 2022 der Agrarmeteorologie RLP-Station Worms-Leiselheim (ca. 3 km zum Versuchsstandort entfernt) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1991-2020), Deutscher Wetterdienst, (DWD).

5.2 Bodenfeuchte

5.2.1 Verlauf der Bodenfeuchte unterschiedlicher Bodentiefen

Innerhalb der Vegetationsperioden wurden mittels wöchentlicher Tiefenmessungen die Bodenfeuchte (θ_v) aller Versuchsvarianten in einer Tiefe von 0,10-1,00 m bestimmt. Zusätzlich wurde zwischen herkömmlicher Laubwandlänge von 1,40 m und reduzierter Laubwand von 0,70 m differenziert. Abbildung 15+16a-e zeigen die Verläufe für die Varianten der 1,40 m hohen Rebzeilen innerhalb der Kontrollvariante (OB), Holzhäcksel Unterstock (HH), Holzhäcksel flächendeckend (HH+) und moderaten Bewässerung (MB). Abbildung 15+16aa-ee bilden hingegen den Bodenfeuchteverlauf der reduzierten Laubwand ab. 2022 wurde eine weitere Erhebungsform, die der moderaten Bewässerung (MB) aufgegriffen. Aufgrund des zu Beginn einer Messperiode gleichen Blattwerkes innerhalb der später zu differenzierenden Laubwandlängen wurden zu Beginn 2021 und 2022 gleiche Wassergehalte ermittelt. Aus diesem Grund wurden die ersten beiden Erhebungswochen „gebleicht“ dargestellt, ehe mit dem ersten Laubschnitt sich im Laufe der Saison individuelle Feuchtwerte feststellen ließen. Aufgrund der verzögerten Reife innerhalb der kurzen Laubwand stellt die schwarze Säulenmarkierung (Abbildung 15+16aa-ee) den Zeitpunkt der Lese der langen Laubwand dar und daraus resultierend die verlängerte Reife für 0,70 m- Laubfronten.

Versuchsjahr 2021

Durchweg wurde für jede Bodentiefe in OB die geringfügigste Bodenfeuchte erfasst. Erhebungsform HH und HH+ stellten sich durch verbesserte Wassergehalte als deutliche Gewinner dar. Mit zunehmender Bodentiefe konnte für alle drei Varianten (OB, HH, HH+) eine ansteigende Bodenfeuchte erfasst werden.

Mit Beginn der Messreihe fielen ausreichend Niederschläge, was sich in einer Niederschlagssumme von 172 mm bis zum 13. Juli beziffern lässt (Abbildung 15). Zeitgleich stieg die Bodenfeuchte für alle Bodenabschnitte innerhalb jeder Erhebungsform erheblich an, was sich bis zum 14. Juli in 1,00 m Tiefe mit folgenden Zahlen bestätigen lässt: OB (23,6 %), HH (26,6 %), HH+ (26,8 %), Abbildung 15e. Dieses Feuchteniveau konnte aufgrund verminderter Niederschläge ab diesem Zeitpunkt nicht mehr gehalten werden, was durch herabgesetzte Wassergehalte bis zur Beendigung der Messungen zum Ausdruck gebracht werden konnte: OB (22,1%), HH (24,6 %), HH+ (25 %). Innerhalb des ersten Bodenabschnittes (0,10 m) wurden vereinzelt überschneidende Feuchtwerte zwischen HH und HH+ lokalisiert. Der Wassergehalt in den oberen drei Bereichen (0,10 m, 0,30 m, 0,50 m) reagierte im Vergleich zu tieferen Bodenbereichen (0,80 m und 1,00 m) am stärksten auf Niederschläge und zeigte somit die größten Schwankungen. Auffällig ist, dass Ende Juli ein Annähern der Varianten in 0,30 m, 0,50 m und 0,80 m zu erkennen ist (grüne Markierung), was sich auf ein langsames „Einstellen“ der Feuchte in tieferen Bodenschichten zurückführen lässt. In 1,00 m Bodentiefe ist lediglich zu diesem Moment ein Angleichen zwischen OB und HH erfasst worden. Mithilfe der Unterstockvariante (HH) konnte für 2021 der langen Laubseiten gezeigt werden, dass diese mit einer flächendeckenden Abdeckung (HH+) in puncto Bodenfeuchte konkurriert und sich zeitgleich von

der Kontrollvariante positiv abhebt. Als mögliches Beispiel lässt sich dies inmitten des 0,10 m -Bodenabschnittes aufzeigen, in welchem sowohl HH als auch HH+ eine Art Schutz vor vorherrschenden Klimafaktoren wie z.B. Wind und Globalstrahlung darbieten, was ein mögliches Verwehen und Austrocknen der Feuchte sichert.

Auf eine ausführliche Beschreibung der Feuchtekenwerte für das verkürzte Laubwerk kann hier verzichtet werden, da sich ein nahezu übereinstimmender Verlauf für alle Bodentiefen ergab. Jede Erhebungsvariante der kurzen Laubfront bildet in allen Bodentiefen verbesserte Bodenfeuchtwerte als die der 1,40 m-Fronten ab. Individuelle Unterschiede zwischen OB, HH und HH+ sind wie bereits in allen langen Varianten vorzufinden. Der volumetrische Wassergehalt liegt durchschnittlich um $1,1 \theta_v$ (%v/v) höher als innerhalb aller langen Laubvarianten (Abbildung 15aa-ee). Das verbesserte Feuchteaufkommen des kurzen Blattwerkes lässt sich mit dem reduzierten Blattaufkommen begründen. Weniger Blätter pro Rebstock bedeuten eine reduziertere Beanspruchung der örtlichen Wassergehalte im Boden.

Versuchsjahr 2021

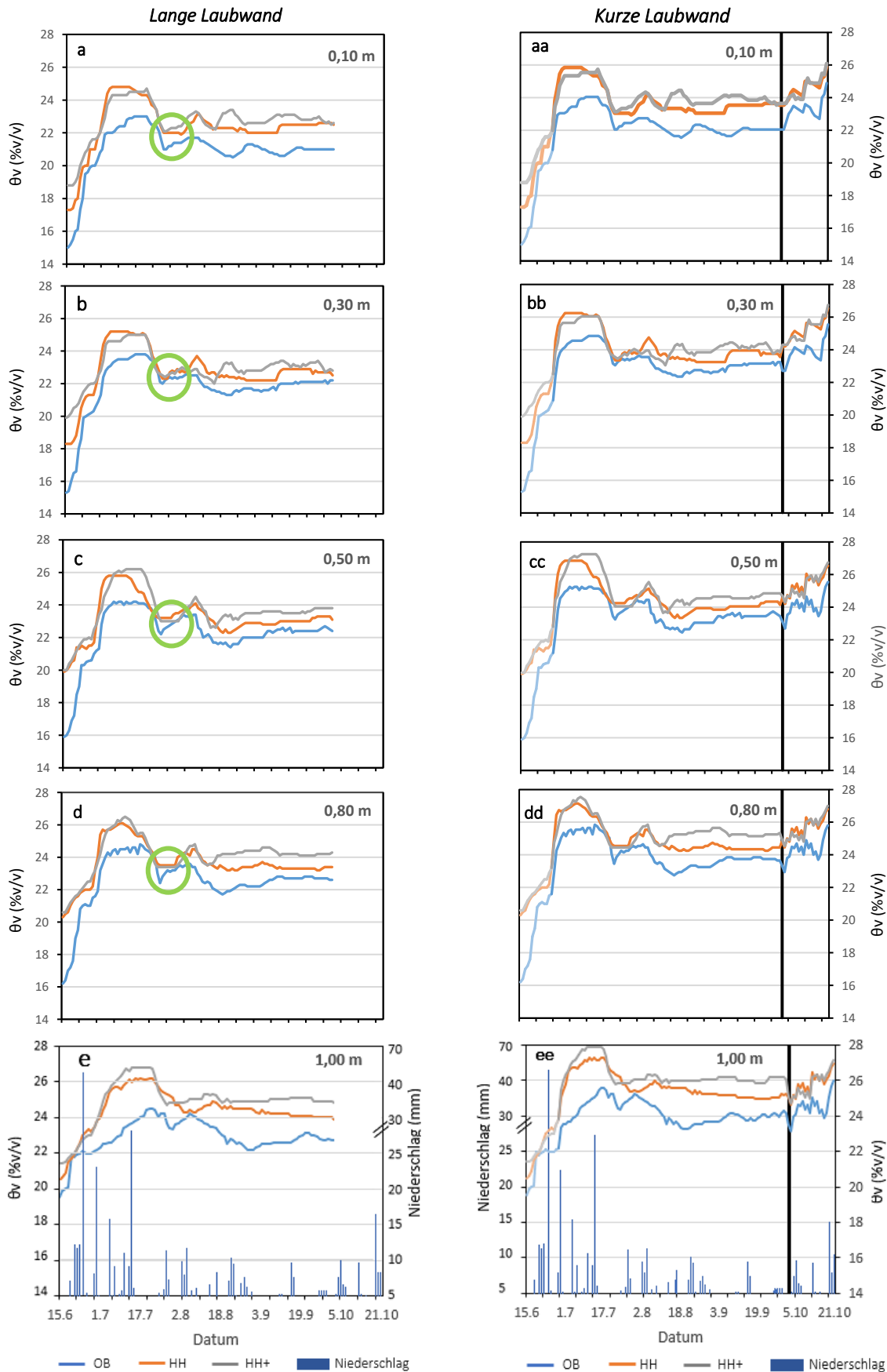


Abbildung 15 Verlauf der Bodenfeuchte θ_v (%v/v) von 0,10 m bis 1,00 m Bodentiefe und Verlauf der täglichen Niederschlagssummen (mm) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) zwischen Juni und Oktober des Versuchsjahr 2021 (a-ee). Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand. θ_v entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

2022 konnte aufgrund der Trockenheit die Variante „MB = moderrate Bewässerung“ im Versuchsaufbau implementiert werden.

OB zeigt in Abbildung 16a-e die niedrigste Bodenfeuchte auf. Sowohl beide Holzhäckselvarianten als auch die durchgeführte moderate Bewässerungsform wiesen positivere Wassergehalte auf. Bereits zu Messbeginn waren Niederschläge sehr rar, was sich während den ersten vier Erhebungswochen mit rund 68 mm bis zum 01. Juli fortführte (Abbildung 16e+ee). Ein Ansteigen der Bodenfeuchte aller Messtiefen inmitten jeder Erhebungsvariante resultierte, wie zum Beispiel am 30. Juni in 1,00 m Tiefe: OB (21,5 %), HH (24,55 %), HH+ (24,15 %), MB (21,55 %). Mit Erreichen dieses Höhepunktes sanken alle Wassergehalte rapide ab, was sich durch die gesamte Vegetationsperiode zog. In jedem Bodenabschnitt wurden einerseits für beide Holzhäckselvarianten andererseits für nicht-bedeckte Varianten überschneidende Feuchtwerte ermittelt (Abbildung 16a-e). Aus den erhobenen Daten wird deutlich, dass mit Beginn der moderaten Bewässerung am 17. Juli ein verbesserter Wasserhaushalt gewährleistet werden kann. Die größten Feuchte-schwankungen sind hierbei in einer Tiefe von 0,10 m ersichtlich, was sich auf einwirkende Klimafaktoren, wie z. B. Sonne und Wind, zurückführen lässt (Abbildung 16). Rund vier Bewässerungsmaßnahmen mit 10 l/Rebe (rosa Säulenmarkierung) mussten vollzogen werden, bis sich ein Angleichen der Bodenfeuchte von MB und HH/HH+ am 15. August in 1,00 m Tiefe ergab. Minimalste Niederschläge von > 5 mm konnten das stetig voranschreitende Austrocknen der Bodenschichten nicht verhindern, ehe am 06. September der niedrigste Wassergehalt in 1,00 m Tiefe erfasst wurde: OB (13,25 %), HH (14,55 %), HH+ (14,48 %), MB (15,05 %). Ab diesem Zeitpunkt fielen bis zum Messende ca. 143 mm Niederschlag, was einen rapiden Anstieg aller Feuchtwerte jeder Bodenschicht und zugleich das Maximum jeder Erhebungsform für 2022 in 1,00 m Tiefe bedeutete: OB (24,25 %), HH (26,25 %), HH+ (26,15), MB (26 %). MB konnte nach einer Bewässerungsmaßnahme bereits verbesserte Wassergehalte als eine HH bzw. HH+ aufzeigen. Allerdings ist ein starkes Abfallen der Feuchte-kennwerte unmittelbar nach der Bewässerungsmaßnahme resultierend, was sich auf eine fehlende Schutzschicht wie die der Holzschnitzel zurückführen lässt und demzufolge eine verstärkte Evaporation stattfindet.

Ein stark ähnelnder Feuchteverläufe wie bereits im langen Blattwerk konnte innerhalb der kurzen Laubfront für jede Erhebungsform erfasst werden, allerdings befanden sich die jeweiligen Kennwerte um $1,02 \theta_v$ (%v/v) höher (Abbildung 16aa-ee). Niederschlagsereignisse ließen die Wassergehalte ansteigen, wohingegen mit einsetzender Trockenperiode ein Absinken der Bodenfeuchte einherging. Eine moderate Bewässerung musste allerdings für das verkürzte Blattwerk nicht angewendet werden, wodurch diese Variante der Kontrollvariante (OB) gleichgesetzt werden kann. Darüber hinaus lässt sich herausstellen, dass Rebengassen mittels Abdeckungsmaterial einen verbesserten Wasserhaushalt aufweisen als herkömmliche nicht-bedeckte Rebengassen.

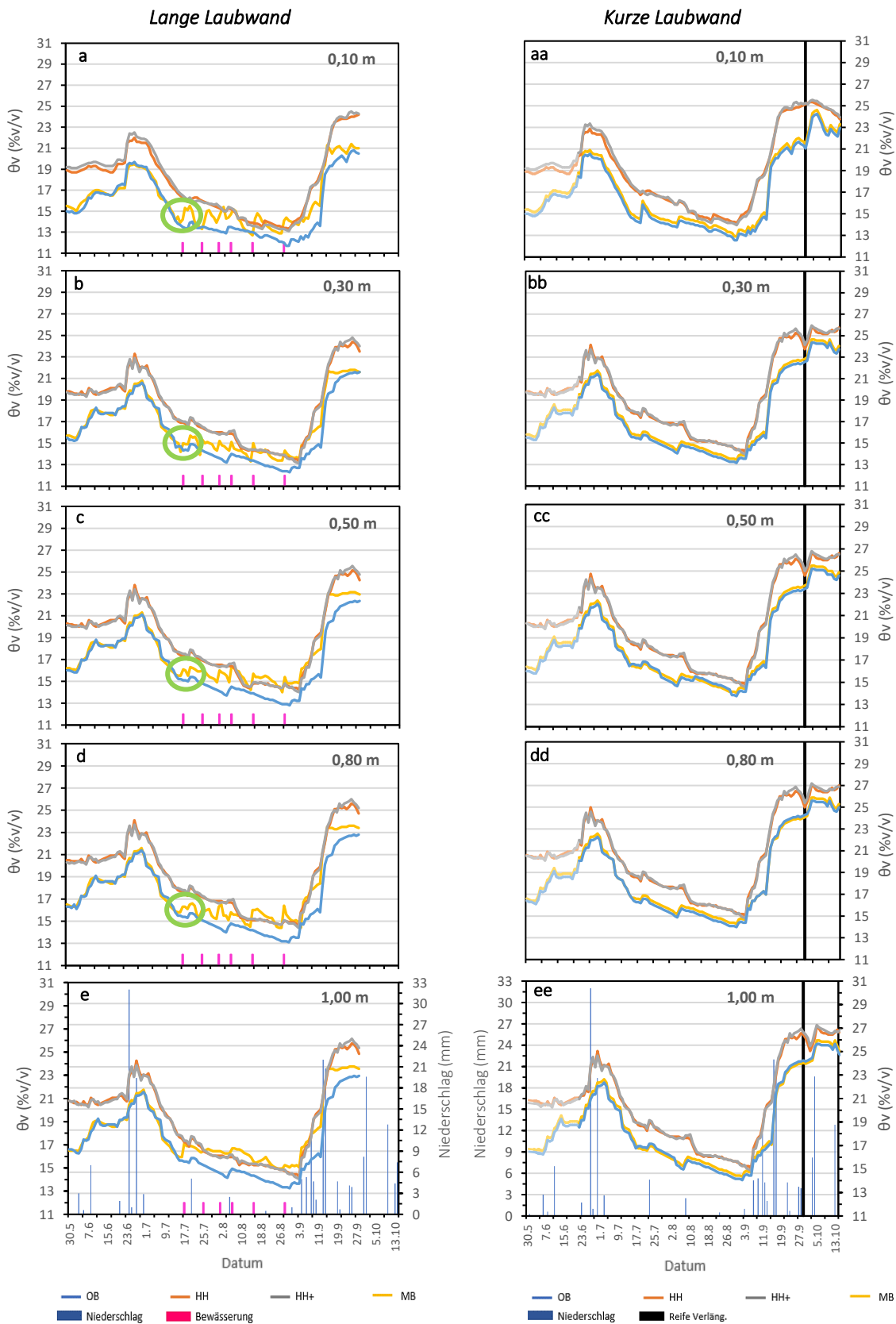


Abbildung 16 Verlauf der Bodenfeuchte θ_v (%v/v) von 0,10 m bis 1,00 m Bodentiefe und Verlauf der täglichen Niederschlagssummen (mm) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderater Bewässerung (MB) zwischen Mai und Oktober des Versuchsjahr 2022 (a-ee). Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand. θ_v entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

Die untere Abbildung gewährt einen Einblick in die Bodenfeuchtemessungen innerhalb der örtlichen Rebengassen. Hier zu sehen ist die Feuchtigkeitsmessung inmitten der Variante HH. Zur Bestimmung der entsprechenden Bodentiefen wurde ein Zollstock herangezogen.



Abbildung 17 *Einblick: Bodenfeuchtemessung in der Variante Unterstockabdeckung (HH), Pfeddersheim 2022, [Eigene Darstellung 2022].*

2021 zeichnete sich durch unzählige Niederschlagsereignisse aus, wodurch sich während der Vegetationsperiode ein nahezu individuell konstanter Wassergehalt innerhalb jeder Erhebungsform einstellte, ohne, dass es zum Austrocknen der Bodenschichten kam. Dagegen waren Niederschläge vor bzw. im vegetativen Wachstum minimalst bis gar nicht vorhanden.

Eine gezielte Bewässerung sorgte hingegen 2022 für punktuell die besten Wassergehalte. Eine Unterstockabdeckung konnte zu Beginn, allerdings gegen Ende des Messzeitraums 2022 nicht das gleichwertige Feuchteniveau wie eine moderate Bewässerung leisten. Ein Austrocknen wie es innerhalb der Kontrollvariante vorzufinden war, konnte mittels der Unterstockabdeckung deutlich verhindert werden.

5.2.2 Verlauf der Bodenfeuchte und der frühmorgendlichen Wasserpotentiale

Im folgenden Abschnitt werden die Verläufe der Bodenfeuchtwerte (θ_v), die vor Sonnenaufgang ermittelnden Blattwasserpotentiale (Ψ_{pd}) sowie Niederschlagsverteilungen während der phänologischen Phasen (Blüte, Veraison, Ernte) für die Varianten der Kontrolle (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderater Bewässerung (MB) für 2021 und 2022 aufgezeigt. Eine zusätzliche Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand der jeweiligen Versuchsvarianten wurde vollzogen.

Versuchsjahr 2021

Während der Vegetationsperiode wurde am Pfeddersheimer-Kreuzblick im Jahr 2021 aufgrund ausreichender Regenfälle auf eine moderate Tropfbewässerung (MB) verzichtet, weshalb diese im folgenden Multiplotdiagramm nicht aufgeführt ist. Sowohl Austrieb als auch die Blütephasen waren von übermäßigen Niederschlägen geprägt. Im Versuchsfeld wurden in der Variante OB-lang und -kurz bereits zu Messstart bis zum 18. Juni signifikant tiefere Ψ_{pd} -Werte bis zum 18. Juni gegenüber der Abdeckungsvarianten HH und HH+ gemessen. Unzählige Niederschlagsereignisse folgten. Seit Messbeginn wurde bis zum 14. Juli eine Niederschlagssumme von rund 172 mm ermittelt, was den rapiden Anstieg aller Bodenfeuchten erklärt (Tabelle 3):

Tabelle 3 Zusammenfassung der Bodenfeuchtwerte bis zum 14. Juli 2021.

Feuchte in 1,00 Meter Tiefe	Lange Laubwand	Kurze Laubwand
Kontrollvariante (OB)	> 24,0 % θ_v	> 26,0 % θ_v
Unterstockabdeckung (HH)	> 26,6 % θ_v	> 28,0 % θ_v
Flächendeckende Abdeckung (HH+)	> 26,8 % θ_v	> 29,0 % θ_v

Bis zu diesem Zeitpunkt wurden verringerte Blattwasserpotentiale aller Varianten erfasst. In den Versuchvarianten HH und HH+ fielen innerhalb der langen Laubfront Wasserpotentiale auf bis zu -0,03 MPa und innerhalb der kurzen Rebzeilen auf bis zu 0,00 MPa. Der 24. Juni war mit etwa 63 mm der regenreichste Tag. Alle Abbildungen der Bodenfeuchten lassen sich durch einen stufenartigen Linienverlauf festhalten, welche mit Fortschreiten der Messperiode durch kleinteilige Hoch- und Tiefphasen bestimmt war (Abbildung 18a+aa). Ab dem 14. Juli konnte ein Absenken der Bodenwassergehalte bis Ende Juli in den Bodentiefen 0,10 bis 1,00 m verzeichnet werden, was durch fehlende Niederschläge forciert wurde.

Nahezu zeitgleich wurden tiefere Blattwasserpotentiale in langer (OB = -0,24 MPa, HH = -0,19 MPa, HH+ = -0,17 MPa) und kurzer Laubwand (OB = -0,20 MPa, HH = -0,15 MPa, HH+ = -0,15 MPa) erhoben. Eine zweite Anstiegsphase der Bodenfeuchte begann zu Beginn des Augusts (Niederschlag: 18,7 mm), welche ab dem 7. August stagnierte. Bis zum 14. August sanken alle Wassergehalte in jeder Versuchsvariante. Tiefere Ψ_{pd} der langen Reblaubwand (OB = -0,23 MPa, HH = -0,18 MPa, HH+ = -0,17 MPa) und kurzen Laubwandvariante (OB = -0,19 MPa, HH = -0,14 MPa, HH+ = -0,14 MPa) folgten. Als Gegensatz fielen

bis zum 29. August sukzessiv minimale Niederschläge, was zudem einen verminderten Anstieg der Bodenfeuchtwerte mit sich brachte. Im Zeitfenster vom 31. August bis zum 14. September bewirkte eine niederschlagsfreie Phase nochmals ein Absinken der Blattwasserpotentiale in den langen (OB = -0,26 MPa, HH = -0,19 MPa, HH+ = -0,19 MPa) und kurzen Laubfronten (OB = -0,22 MPa, HH = -0,17 MPa, HH+ = -0,16 MPa), so Abbildung 18b+bb. Durch vereinzelte Niederschläge (August bis Ende September: 34,04 mm) konnte kein Abfallen aller Bodenfeuchtwerte gemessen werden.

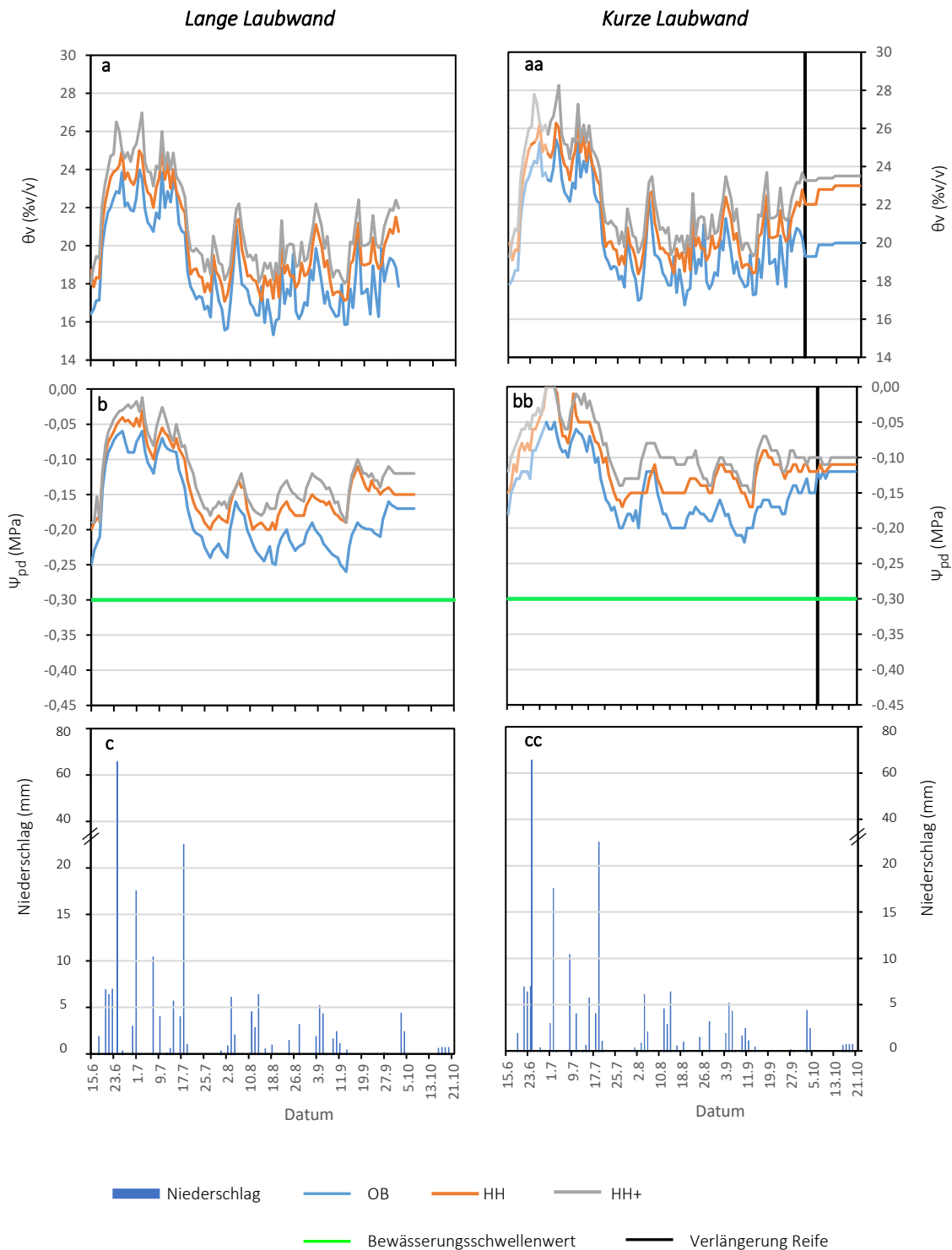


Abbildung 18 Verlauf der Bodenfeuchte (θ_v , a+aa) bis 1,00 m Bodentiefe, Verlauf des Blattwasserpotentials (Ψ_{pd} , b+bb) und der Niederschlagsverläufe (c+cc) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und einer flächendeckenden Abdeckung (HH+) im Zeitraum 15. Juni bis 01. Oktober. Kurze (0,70 m) und lange (1,40 m) Laubwand. θ_v gleicht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten, Ψ_{pd} setzt sich aus dem Durchschnittswert von $n = 4$ Messwerten zusammen.

Niederschlagsereignisse blieben 2022 auch in den Phänologiephasen Austrieb und Blüte aus. OB und MB zeigten zu Messbeginn bis zum 17. Juli die signifikant niedrigsten Wassergehalte im Vergleich zu HH und HH+ auf. Bis zum 30. Juni resultierten lediglich zwei kurzweilige „Regenperioden“ mit 10,6 l und 57,2 l Niederschlag, was die Bodenfeuchte ansteigen ließ:

Tabelle 4 Zusammenfassung der Bodenfeuchtwerte bis zum 30. Juni 2022.

Feuchte in 1,00 Meter Tiefe	Lange Laubwand	Kurze Laubwand
Kontrollvariante (OB)	> 22,4 % θ_v	> 23,7 % θ_v
Moderate Bewässerung (MB)	> 23,0 % θ_v	> 24,0 % θ_v
Unterstockabdeckung (HH)	> 24,4 % θ_v	> 25,5 % θ_v
Flächendeckende Abdeckung (HH+)	> 25 % θ_v	> 25,8 % θ_v

Da am 22. Juni der erste Laubschnitt vollzogen und zugleich die Einkürzung der Laubwandhöhe auf 0,70 m vorgenommen werden konnte, wurden bis zu den letzten Niederschlagsereignissen am 30. Juni nur geringfügige Unterschiede hinsichtlich der Wassergehalte zwischen langer und kurzer Laubwand ermittelt. Im Laufe der Vegetationsperiode konnten allerdings deutliche Divergenzen herausgestellt werden. Bis zum 30. Juni verringerten sich für alle vier Erhebungsformen das Blattwasserpotential, was sich am deutlichsten in HH und HH+ in der langen Laubfront mit -0,07 MPa bzw. in der kurzen Laubwand mit -0,06 MPa niederschlug. Mit Beginn des Monats Juli begann eine Hitzeperiode, welche es seit Wetteraufzeichnung, annäherungsweise wie 2003 und 2018, bis dato kaum gab. Ein stetig ansteigendes Austrocknen der Bodentiefen brachte zeitgleich tiefere Blattwasserpotentiale in langer (OB = -0,32 MPa, MB = -0,31 MPa, HH = -0,11 MPa, HH+ = -0,10 MPa) und kurzer Laubwand (OB = -0,16 MPa, MB = -0,16 MPa, HH = -0,10 MPa, HH+ = -0,09 MPa) hervor, wodurch am 17. Juli der Beginn des ersten Bewässerungsmaßnahme vollzogen wurde. Als Bewässerungsschwellenwert diente hierbei -0,30 MPa (grüne horizontale Markierung, Abbildung 17b und bb).

Zwei Niederschlagsereignisse < 5 l, am 20. Juli und 05. August konnten ein Absinken der Wassergehalte nicht verhindern, wohingegen in HH, HH+ und OB alle Blattwasserpotentiale bis zum 31. August abfielen. Mithilfe der zeitlich punktuellen Bewässerungsmaßnahme konnte bei einem Erreichen von > -0,30 MPa die Bewässerung noch am gleichen Messtag am Abend vollzogen werden. Es wurde sich bewusst für eine nächtliche Bewässerung entschieden, damit eine geringfügigere Verdunstung als am Tage gewährleistet werden kann. Am darauffolgenden Tag konnten bereits verbesserte Blattwasserpotentiale innerhalb der bewässerten Form erhoben werden. Die Zufuhr von Wasser hielt allerdings nur kurzweilig der Trockenheit stand, wodurch die individuellen Bodenschichten bis 1 m- Tiefe in Kürze austrockneten. Insgesamt wurden sechs Bewässerungsmaßnahmen in der langen Laubwand durchgeführt. Inmitten des kurzen Blattwerkes musste nicht bewässert werden, aufgrund des verbesserten Wasserstatus. Mit Beginn der ersten Tropfbewässerung (MB) sanken in beiden Abdeckungsvarianten sowohl Wassergehalte als auch Blattwasserpotentiale drastisch ab. Ab der vierten bis zur letzten durchgeführten

Bewässerung am 28. August konnte HH mittels seiner Unterstockabdeckung den Vorteil einer natürlich verbesserten Wasserspeicherung nicht mehr ausspielen, was die entsprechenden Wasserpotentiale widerspiegelten: (OB = -0,41 MPa, HH = -0,29 MPa, HH+ = -0,28 MPa, MB = -0,24 MPa). Abbildung 19bb zeigt innerhalb der kurzen Laubfronten zwar zeitgleich ein mit der Vegetationsperiode verschlechtertes Blattwasserpotential, allerdings kein über den Bewässerungsschwellenwert hinaustretende Wasserpotentiale und Wassergehalte auf (OB = -0,28 MPa, HH = -0,24 MPa, HH+ = -0,23 MPa, MB = -0,29 MPa).

Insgesamt sorgten seit September kontinuierliche Niederschläge mit ca. 140 l bis zur Ernte (lange Laubwand: 29. September; kurze Laubwand: 14. Oktober) für das Auffüllen der Wasserspeicher aller Bodenschichten. Die größten Wassergehaltsmessungen wurden in langer Laubwand in HH und HH+ mit 26,9 % bzw. 27,4 % und für verringerte Laubwände mit 28 % bzw. 27,9 % ermittelt (Abbildung 19a+aa).

2022 konnte innerhalb der Boden- und Blattwasserpotentialmessungen sowohl vor als auch nach der Reifphase HH/HH+ verbesserte Ψ_{pd} - und θ_v - Werte aufzeigen als MB und OB. Mit einsetzender Bewässerung konnte MB positivere Ergebnisse erzielen als eine Unterstockabdeckung. Angesichts beider Laubwandlängen ergaben alle verkürzten Laubfronten sowohl gesteigerte Feuchte- als auch Wasserpotentialwerte. Variante HH lässt sich hierbei als Versuchsform mit den am geringfügig gestressten Reben herausstellen (Abbildung 19aa-cc).

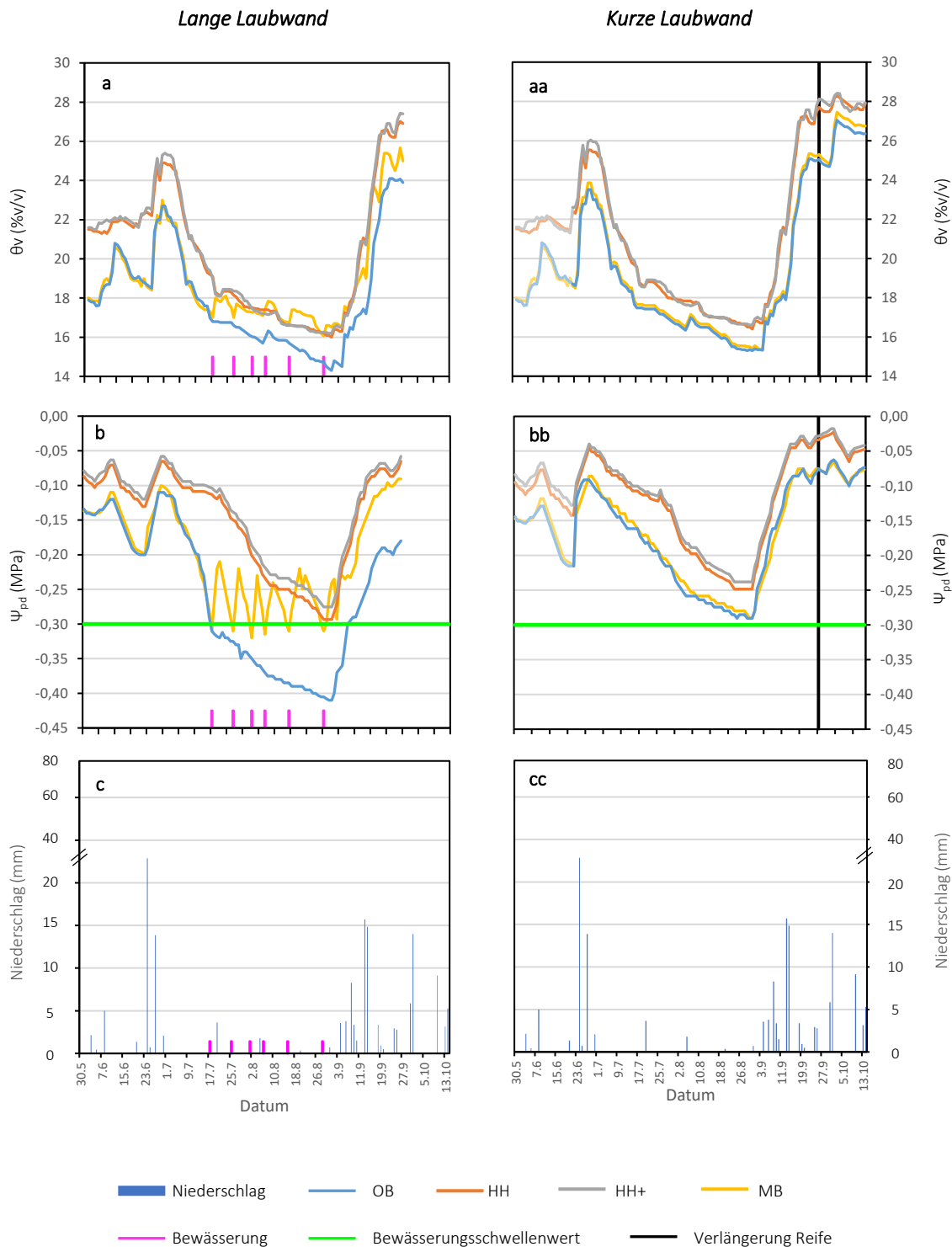


Abbildung 19 Verlauf der Bodenfeuchte (θ_v , a und aa) bis 1,00 m Bodentiefe, Verlauf des Blattwasserpotentials (Ψ_{pd} , b und bb) und der Niederschlagsverläufe (c und cc) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckenden Abdeckung (HH+) und der moderaten Bewässerung (MB) im Zeitraum 30. Mai bis 14. Oktober. Unterscheidung zwischen kurzer (0,70 m) und langer (1,40 m) Laubwand. θ_v gleicht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten, Ψ_{pd} setzt sich aus dem Durchschnittswert von $n = 4$ Messwerten zusammen.

5.2.3 Zusammenhang der Bodenfeuchte und des frühmorgendlichen Blattwasserpotentials

Um einen tiefgründigeren Einblick zwischen dem Verhältnis θ_v versus Ψ_{pd} zu erhalten, wurden die in den Jahren 2021 und 2022 ermittelten Daten in Abbildung 20 miteinander korreliert. 2021 wurden die Varianten OB, HH, HH+ herangezogen, 2022 konnte aufgrund der Bewässerung die Erhebungsform MB mitaufgenommen werden.

Versuchsjahr 2021 und 2022

Auf der folgenden Seite wurden in der dargestellten Grafik die gemessenen Ψ_{pd} - und θ_v -Daten der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckende Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB) in langer und kurzer Laubwand miteinander korreliert. Die Abhängigkeit der Bodenfeuchte zum morgendlichen Blattwasserpotential konnte primär durch einen direkten Vergleich überprüft werden. Die Korrelation beider Messreihen umfasst den jährlichen Messstart bis einschließlich zur Ernte. Für das Versuchsjahr 2021 und 2022 wurde sowohl in OB, HH, HH+ als auch MB ein signifikant polynomischer Zusammenhang¹² in langer und kurzer Laubwand ermittelt. Für alle langen Laubwände ergaben sich folgende Regressionskoeffizienten: OB ($R^2 = 0,730$); HH ($R^2 = 0,866$); HH+ ($R^2 = 0,858$) und MB ($R^2 = 0,754$). Kurze Laubwände lassen sich mit folgenden Werten repräsentieren: OB ($R^2 = 0,846$); HH: ($R^2 = 0,856$); HH+ ($R^2 = 0,869$) und MB ($R^2 = 0,913$), vgl. Abbildung 20. Steigende Wassergehalte konnten in jeder Erhebungsvariante ein Ansteigen der Ψ_{pd} mit sich bringen. Ein Absinken der Bodenwasservorräte, welche die Rebe in starken Trockenstress versetzt ($> -0,30$ MPa), wurden in OB und MB ermittelt. Ein punktuelltes Bewässern in 2022 ermöglichte einen verbesserten Wasserhaushalt, was sich letzten Endes positiv auf das Blattwasserpotential auswirkte. Abbildung 20a zeigt auf, dass mit zunehmender Austrocknung der Bodenwasservorräte der langen Laubwände ein exponentielles Abfallen der Ψ_{pd} -Werte einher geht. Abbildung 20b zeigt hingegen einen verbesserten Wasserhaushalt des Bodens mit zugleich verbesserten Ψ_{pd} -Werten. Die höchsten Ψ_{pd} - und θ_v -Werte wurden in beiden Abdeckungsvarianten ermittelt.

¹² Ist ein Test statistisch signifikant, so ist der p-Wert kleiner als Alpha ($p < \alpha$). Oftmals wird ein α -Wert von 0,05 bzw. 0,01 angenommen. Liegt ein α -Wert von $\alpha = 0,01$ vor, so ist das Testergebnis statistisch hochsignifikant. Eine polynomische Trendlinie ist eine gekrümmte Linie, bei welcher die Daten fluktuiert wurden. Im Allgemeinen hat diese Trendlinie nur einen Berg oder ein Tal (Microsoft 2023).

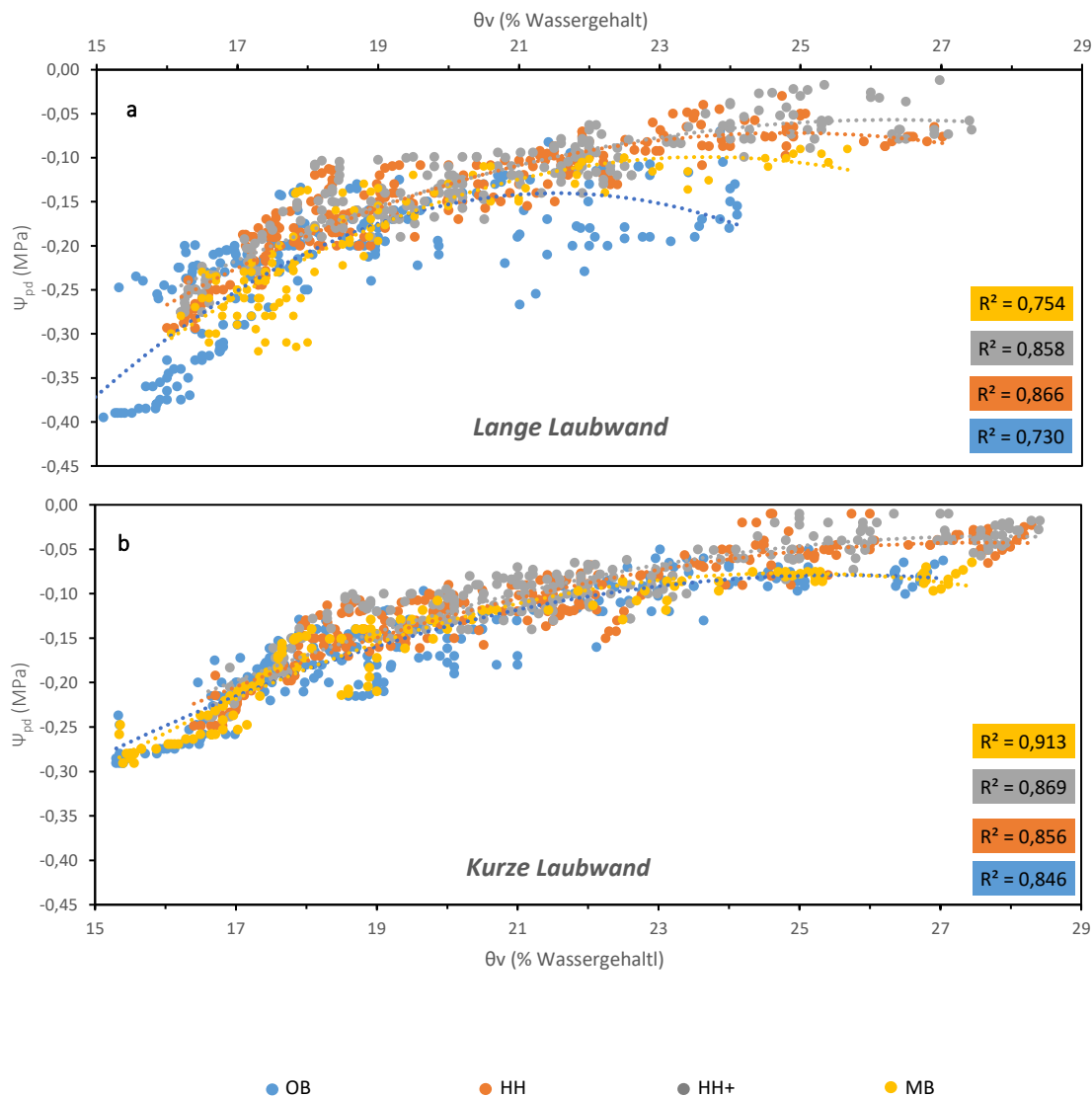


Abbildung 20 Zusammenhang zwischen dem frühmorgendlichen Wasserpotential (Ψ_{pd}) und dem Bodenwasser-
gehalt (ϑ_v) bis 1,00 m Bodentiefe in 2021 und 2022. ϑ_v und Ψ_{pd} entsprechen dem Durchschnittswert
von $n = 4$ Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang.

Eine Unterstockabdeckung konnte in beiden Erhebungsjahren einen verbesserten Wasserhaushalt und schlussendlich positivere Blattwasserpotentiale als in der Kontrollvariante vorweisen. Aufgrund der vorhandenen Holzschnittel ist es möglich, eine frühzeitig optimierte Wasserspeicherung zu gewährleisten. Wie im Hitzejahr 2022 zu sehen war (vgl. Kap. 5.2.2), hätte eine Unterstockabdeckung einen längeren Zeitraum bezüglich Wasserbereitstellung der Reben ohne die einsetzenden Niederschläge ab September nicht mehr bereitstellen können.

Bodenfeuchte- und frühmorgendliche Blattwasserpotentiale sanken bis Ende August unmittelbar auf den Grenzwert von $-0,30$ MPa ab, was darüber hinaus eine Bewässerung nach sich gezogen hätte. Dies zeigt auf, dass auch eine Unterstockabdeckung als Speichermedium limitiert ist.

5.3 Gezielte Stickstoffversorgung im Blattstiel

Eine ausreichende Stickstoffversorgung, welche sich unter anderem durch den organischen Humus definiert, kann die Rebe positiv beeinflussen. So dient Stickstoff, speziell in der Umwandlung zu Nitrat zum Erhalt des Fotosyntheseprozesses. Wassermangelsituationen hemmen den Wasserstromfluss innerhalb der Rebleitbahnen, wodurch eine verringerte Nährstoffzufuhr zu den Blättern gewährleistet ist. 2022 wurde mittels des Nitrat-Blattstiel-Tests der N-Ernährungsstatus der Reben überprüft. Ziel war es einen Aufschluss über mögliche Zusammenhänge zwischen der Blattstielnitratkonzentration und der örtlichen Wasserversorgung herzustellen. Die erste Aufnahmeperiode umfasst 22 Messtage, der zweite Aufnahmezyklus erstreckte sich über 42 Tage. Für diese Teilmessung wurden OB, HH und MB berücksichtigt.

5.3.1 Phasenverlauf Nitratkonzentration

Abbildung 21a und b stellt den Nitratverlauf in 2022 sowohl innerhalb der ersten als auch der zweiten Aufnahmeperiode im langen als auch kurzen Blattwerk dar. Zu Beginn der ersten Aufnahmeperiode zeigte HH, gefolgt von MB und OB die schnellstmöglich ansteigenden Nitratkonzentrationen, ehe alle Varianten am 6. Juni jeweils ihren Maximalwert an NO_3 (mg NO_3/L) leisteten. Das Erreichen von maximal 200 mg NO_3/L spiegelt bei Blattstiel-Nitrattests in der ersten Aufnahmeperiode bei ausreichendem organischem Humus im Boden und simultan genügendem Wasservorrat die absolute Konzentration an NO_3 wider. HH konnte seinen verbesserten Wasserhaushalt im ersten Aufnahmeintervall ausspielen, mittels zügigerer N-Aufnahme, was sich auf eine gesteigerte Nährstoffzufuhr, begünstigt durch einen angetriebenen Massenfluss im Xylem, zurückführen lässt. Ab dem 13. Juni wird ersichtlich, dass die NO_3 -Konzentration in den Blattstielen nicht aufrecht gehalten werden konnte und bis zum 04. Juli rapide abnahm. Dies lässt sich allerdings mit der einsetzenden phänologischen Phase „Fruchtansatz“ belegen, was zudem das erste N-Aufnahmeintervall abrundet (Abbildung 21a).

Mit Beginn des Sommermonats Juli nahm in allen Versuchsformen die Aufnahme an Nitrat Fahrt auf, welche zugleich den Beginn der zweiten Aufnahmeperiode charakterisiert. Generell ist anzumerken, dass im zweiten Aufnahmezyklus die NO_3 -Konzentration gegenüber dem vorherigen Zyklus um fast die Hälfte verringert (ca. 100 mg NO_3/L) möglich ist, als zuvor. Mit fortschreitenden Hitzetagen konnte HH seinen natürlich gespeicherten Wasserhaushalt nicht mehr zu Nutzen machen, was sich bis zum Reifebeginn, also dem gleichzeitigen Ende der zweiten N-Phase, bemerkbar machte (\emptyset 80 mg NO_3/L). Durch gezielte Bewässerungsmaßnahmen in MB wurden Spitzenwerte der N-Aufnahme von 90 mg NO_3/L erzielt. Nach jedem Bewässerungstermin wird allerdings sehr deutlich, dass mit ansteigendem Austrocknen des Bodens in MB eine verringerte N-Konzentration in den Blattstielen resultierte. Anhand der zweiten NO_3 -Phase kann darüber hinaus aufgezeigt werden, dass MB immer kurz vor einsetzender Bewässerung die Aufnahme an Nitrat aufgrund des Wassermangels auf das Nitratniveau im Blattstiel von OB (\emptyset 70 mg NO_3/L) verminderte. Am 14. August setzte die Reife ein und folglich nahm trotz zwei weiteren Bewässerungsterminen die NO_3 -Konzentration in MB ab, was letzten Endes die Beendigung der weiteren N-Aufnahme herausstellt. Stark gestresste Reben wie in OB stellten

innerhalb der langen Laubwand als erste Variante die Aufnahme an N am schnellsten ein, was den prekären Wassermangel wiederum verdeutlicht. Rund zwei Wochen verzögert folgte HH, MB benötigte weiterhin 14 Tage, um eine Nitratkonzentration von 0 (mg NO₃/L) zu erreichen.

Für das kurze Blattwerk wurde in der ersten NO₃-Phase ein Maximum in HH (210 mg NO₃/L), gefolgt von MB (200 mg NO₃/L) und OB (200 mg NO₃/L) erreicht. Wie bereits zuvor in der langen Laubwand endete am 13. Juni die erste NO₃-Aufnahmephase. Über den gesamten zweiten N-Zeitraum (20. Juli bis zum 15. August) befanden sich alle Blattstielvarianten nahezu auf einem NO₃-Niveau: HH (100 mg NO₃/L), MB (90 mg NO₃/L) und OB (90 mg NO₃/L), Abbildung 21b. Alle Varianten regulierten ihre aktive Aufnahme von Nitrat bis zum 29. September im Gleichschritt herunter. Erwähnenswert ist, dass HH eine minimal erhöhte NO₃-Konzentration aufweist, was sich wiederum auf die Bedeckung mit Holzhäcksel und dem dadurch verbesserten Wasserstatus begründen lässt. Durchzuführende Bewässerungsmaßnahmen, wie es im langen Blattwerk vorzufinden ist, wurden aufgrund des gesteigerten Wasserhaushaltes in MB nicht realisiert.

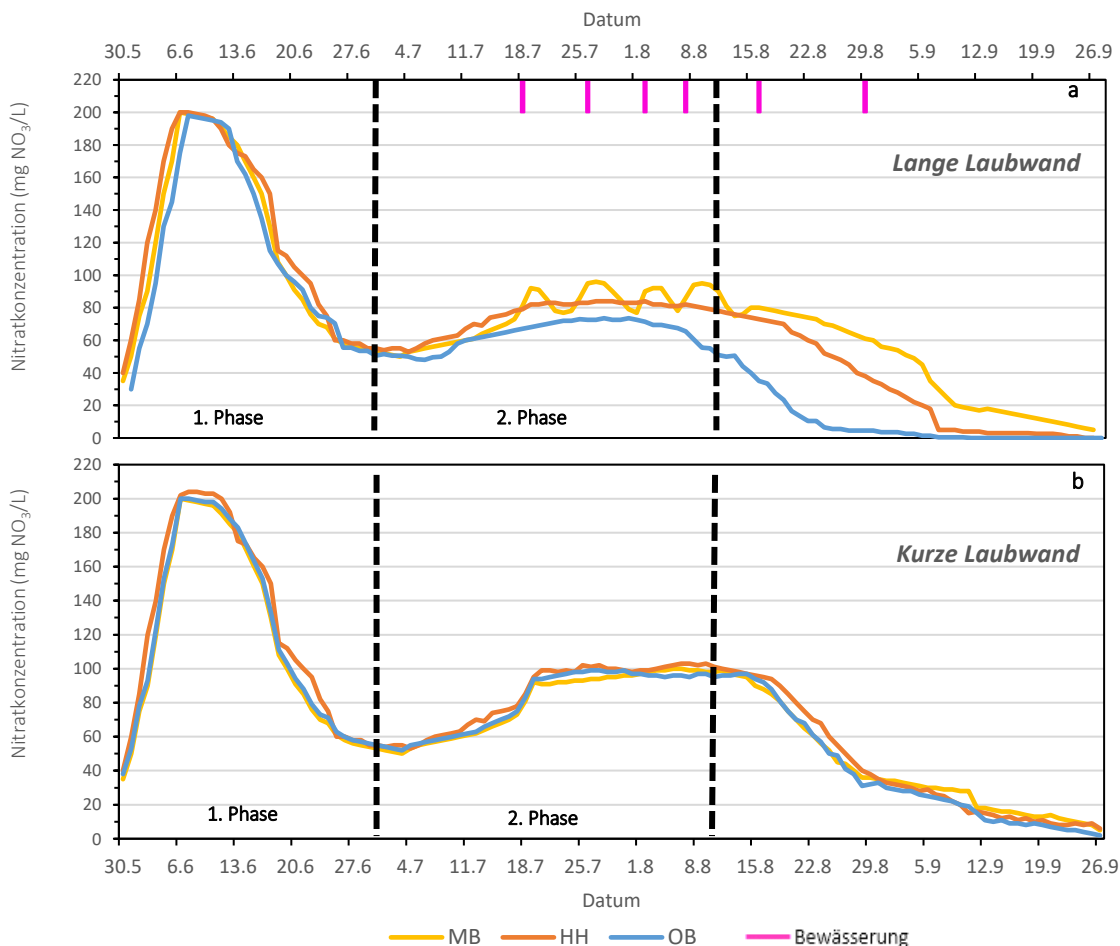


Abbildung 21 Blattstiel-Nitratkonzentrationsverlauf für 2022. Erste Nitrataufnahmephase (Blüte bis Fruchtansatz), zweite Nitrataufnahmephase (Traubenschluss bis Reifebeginn), MB = moderate Bewässerung, HH = Unterstock Holzhäcksel, OB = ohne Bedeckung.

5.3.2 Zusammenhang Nitratkonzentration und Blattwasserpotential

Um das Verhältnis zwischen der Nitratkonzentration ($\text{mg NO}_3/\text{L}$) und der Bestimmung des Ψ_{pd} im Versuchsfeld darzustellen, wurden die in 2022 ermittelten Werte in Abbildung 22 miteinander korreliert.

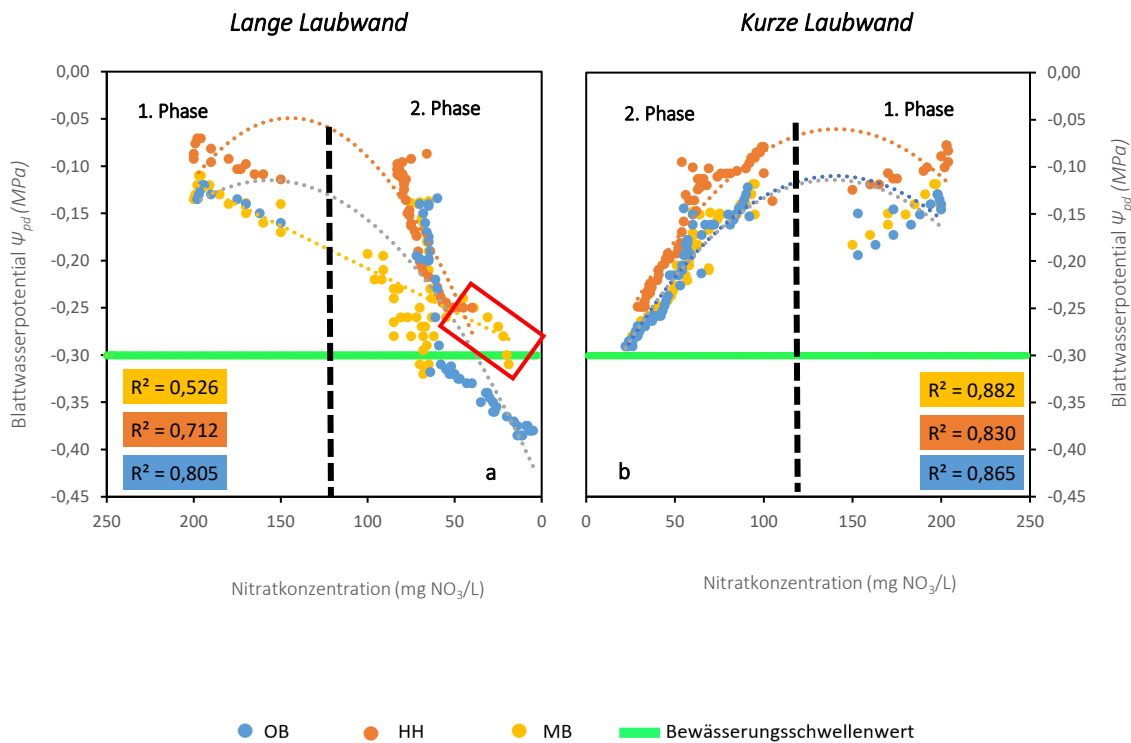


Abbildung 22 Zusammenhang zwischen der Blattstielnitratkonzentration ($\text{mg NO}_3/\text{L}$) und dem frühmorgendlichen Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) des Versuchsjahr 2022 im Versuchsfeld "Pfeddersheimer Kreuzblick". mgNO_3/L entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 15$ Messwerten, Ψ_{pd} entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

In Abbildung 22 sind die gemessenen Nitratkonzentrationswerte und die erhobenen Ψ_{pd} -Werte der Kontroll-, Unterstock- und bewässerten Varianten für sowohl das lange als auch das kurze Blattwerk miteinander korreliert. Vorab lässt sich festhalten, dass mit ansteigendem Wasserstress die Blattstielnitratkonzentration abnimmt.

Zu Beginn des Messstartes in der ersten NO_3 -Aufnahmephase bei maximaler Konzentration von 200 $\text{mg NO}_3/\text{L}$ wurde der geringste Wasserstress in HH (-0,08 MPa), gefolgt von MB (-0,13 MPa) und OB (-0,135 MPa) gemessen. Für HH ($R^2 = 0,712$), OB ($R^2 = 0,805$) wurden polynomisch hoch signifikante Zusammenhänge herausgearbeitet. MB zeigt hierbei $R^2 = 0,526$ auf. Grund hierfür sind die am Ende der zweiten Aufnahmephase durchgeführten Bewässerungstermine (fünf und sechs), welche keinen Einfluss mehr auf die NO_3 -Konzentration ausübte. Mit verringertem Blattwasserpotential nahm die Aufnahme an Nitrat im Blattstiel kontinuierlich ab. Bei genauerem Betrachten von Abbildung 22a der rechten Hälfte wird deutlich, dass MB und OB bei einer Nitratkonzentration von ca. 50 $\text{mg NO}_3/\text{L}$ den exakten Korrelationsverlauf aufweisen. Erst ab einem Absenken des Blattwasserpotentials unter -0,30 MPa lassen sich Disparitäten aufzeigen. Grund hierfür ist die in MB stattfindende Bewässerung, welche eine Linderung des Wasserstress und der daraus resultierend verbesserten N-Aufnahme gewährleistete. HH konnte mit ca. 80 mg

NO₃/L und OB mit 68 mg NO₃/L ihren individuellen Höchstwerten bei geringstem Wasserstress aufweisen. Wie in dem vorherigen Teilkapitel dargestellt wurde, erbrachten die fünfte und sechste Bewässerungsmaßnahme in MB keinen weiteren Effekten in Sachen Aufrechterhaltung des Zuflusses an Nährstoffen innerhalb der Rebe, da schlichtweg die Aufnahmephase mit Beginn der Reife beendet war. Folglich kann der in Abbildung 22a innerhalb der zweiten Phase für MB vorzufindende Korrelationsverlauf auf die fünfte und sechste Bewässerungsmaßnahme < 45 mg NO₃/L zurückgeführt werden (rote Markierung). Diese linderten den Wasserstress auf bis zu -0,25 MPa, allerdings brachte dies keinen weiteren Nutzen mit einsetzendem Reifebeginn.

In Abbildung 22b wird ersichtlich, dass alle drei Varianten die maximal aufzunehmende NO₃-Konzentration sowohl in erster (ca. 200 mg NO₃/L) als auch zweiter Phase (ca. 100 mg NO₃/L) realisieren. Mit zunehmend absinkendem Wasserpotential nahm in beiden N=3-Zyklen die Nitratkonzentration ab (Abbildung 22b). HH zeigt sich mit dem am konstant geringsten Wasserstress bei größtmöglicher NO₃-Konzentration, gefolgt von MB und OB. Für das gesamte kurze Blattwerk wurden deutlich signifikante Zusammenhänge ($R^2 = 0,830$ bis $0,882$) in allen Erhebungsformen ermittelt.

Aufgrund der Nitratmessungen in 2022 kann bestätigt werden, dass im gesamten Messbereich ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen der direkten Nitratkonzentration-Messung im Blattstiel (mgNO₃/L) und der direkten Pflanzenwasserstatus-Messung Ψ_{pd} besteht. Mit zunehmender Austrocknung der Bodenwasservorräte fällt die Nitratkonzentrationen polynomisch steil ab, was auf die gehemmte Wasserstromzufuhr innerhalb des Kontinuums Boden-Reben zurückzuführen ist. Demzufolge gelangen weniger Nährstoffe wie Nitrat zum Blatt, was sich wiederum durch eine herabgesetzte Fotosynthese und dem Schließen der Stomata begründen lässt. Demgegenüber kann eine gezielte Bewässerung die Nährstoffzufuhr in Trockenstresssituationen, wie es in der zweiten Nitrataufnahmephase vorzufinden ist, aufrechterhalten. Eine Unterstockbedeckung konnte ein Absinken des Wasserstatus unterhalb des Bewässerungsschwellenwert verhindern, was sich allerdings bei anhaltenden fehlenden Niederschlägen nicht hätte länger bewähren können.

5.4 Mittägliche Stammwasserpotential

Das mittägliche Stammwasserpotential wurde 2021 und 2022 dem VPD, dem Niederschlag, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit gegenübergestellt und auf deren Zusammenhänge für eine Unterstockabdeckung untersucht.

5.4.1 Verlauf des mittäglichen Stammwasserpotentials

Versuchsjahr 2021

Abbildung 23a und b bildet die Tagesverläufe des mittäglichen Stammwasserpotentials (Ψ_{stem}) der Versuchsvarianten ohne Bedeckung (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckenden Abdeckung (HH+) im Zeitraum vom 15. Juni bis zum 21. Oktober 2021 ab. Darüber hinaus sind in dieser Grafik die vorherrschenden Witterungsbedingungen wie das VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit), Niederschlag, Lufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit dargestellt. Weiterhin wurde eine Unterscheidung der langen und kurzen Laubwand vorgenommen. Stammwasserpotentialmessungen wurden in allen verkürzten Laubfronten erst mit dem ersten saisonalen Laubschnitt, d.h. im dreiwöchigen Verzug im Vergleich zur herkömmlichen Laubwand, begonnen. Mit Beginn der Messungen bis zum 19. Juni wurden linear ansteigende Lufttemperaturen mit höchsten Tageslufttemperaturen und hohen VPD-Werten erreicht - insbesondere am 17. Juni mit 35,1 °C und 12,1 hPa sowie am 19. Juni mit 36,3 °C und 13,1 hPa (Abbildung 23d und e). Innerhalb dieser Zeitspanne wurden die tiefsten Ψ_{stem} -Werte bei langer Laubwand für alle Versuchsvarianten gemessen, wie zum Beispiel OB = -1,07 MPa, HH = -0,94 MPa und HH+ = -0,92 MPa (Abbildung 23a). Im direkten Vergleich wurden in der kurzen Laubwand in OB = -0,80 MPa, HH = -0,71 MPa, HH+ = -0,68 MPa erfasst (Abbildung 23b). Ab dem 20. Juni folgte ein Witterungsumschwung, welcher bis zum 14. Juli anhielt. Innerhalb dieses Zeitintervalls wurden erheblich niedrigere Tageshöchsttemperaturen von ca. 16,3 °C und schließlich niedrigere VPD-Höchstwerte von 0,3 bis 7,9 hPa bestimmt. Zeitgleich fallende Niederschläge füllten den Wasserspeicher mit insgesamt 172 mm bis zum 14. Juli auf. Innerhalb dieser Wetterperiode stiegen alle Ψ_{stem} -Werte sowohl in der langen (OB = -0,28 MPa, HH = -0,19 MPa, HH+ = -0,21 MPa) als auch in kurzen Laubwänden (OB = -0,21 MPa, HH = -0,13 MPa, HH+ = -0,15 MPa) auf ein verbessertes Wasserpotential an. Niederschlagsfreie Tage ereigneten sich vom 14. Juli bis 24. Juli, in welchen die Tageshöchsttemperatur der Luft auf 23,7 °C und VPD-Werte auf maximal 10,8 hPa kletterten.

Der anschließende Witterungsverlauf bis zum 7. August gestaltete sich abwechslungsreich, allerdings wurden die zuvor erwähnten Mittelwerte der Tageshöchsttemperaturen nicht überschritten. Ab dem 08. bis zum 14. August konnte mit zunehmenden Tagesmitteltemperaturen und steigenden VPD-Tageshöchstwerten tiefere Ψ_{stem} -Werte erfasst werden, die sich bis zum 25. August annähernd in jeder Versuchsvariante stabilisierten. Ein Absenken der Ψ_{stem} -Werte in langen Laubwänden auf OB = -0,50 MPa, HH = -0,40 MPa, HH+ = -0,42 MPa, und kurzen Laubwänden auf OB = -0,40 MPa, HH = -0,32 MPa, HH+ = -0,33 MPa waren die Folge.

Innerhalb der „zweiten Niederschlagsphase“, welche von 27. Juli bis zum 30. August stattfand, fielen lediglich 57,32 mm Niederschlag, wodurch geringere Wasserpotentiale

erfasst wurden. Bis zum 29. August fielen, mit Ausnahme am 21. August (21,8 °C), Tageshöchsttemperaturen der Luft auf 15,44 °C und VPD-Werte auf 0,9 hPa ab, ehe diese bis zum 06. September mit 21 °C und 9 hPa nochmals anstiegen. Infolge dessen wurden tiefere Ψ_{stem} -Werte ermittelt, welche jedoch die Wasserpotentialmesswerte vom 15. bis zum 19. Juni (Abbildung 23a und b) nicht erreichten. Bis zum 22. September sanken die durchschnittlichen Tageshöchsttemperaturen der Luft auf 12,7 °C, VPD-Werte auf 3,5 hPa ab, was reduziertere Wasserpotentiale in allen Versuchsvarianten mit sich brachte.

Trotz des ab 23. September bis zum Ende der Messreihe durchwachsenen Wetters, mit Ausnahme vom 25. bis 27. September mit Tageshöchsttemperaturen von 18,1 °C, wurden durch Niederschläge ein Absinken der VPD-Werte auf 1 hPa bzw. ein Abflachen der Wasserpotentiale (Lange Laubwand: OB = -0,38, HH = -0,41 MPa, HH+ = -0,52 MPa; kurze Laubwand: OB = -0,34 MPa, HH = -0,36 MPa, HH+ = -0,40 MPa) gemessen (Abbildung 23a und b).

Versuchsjahr 2021

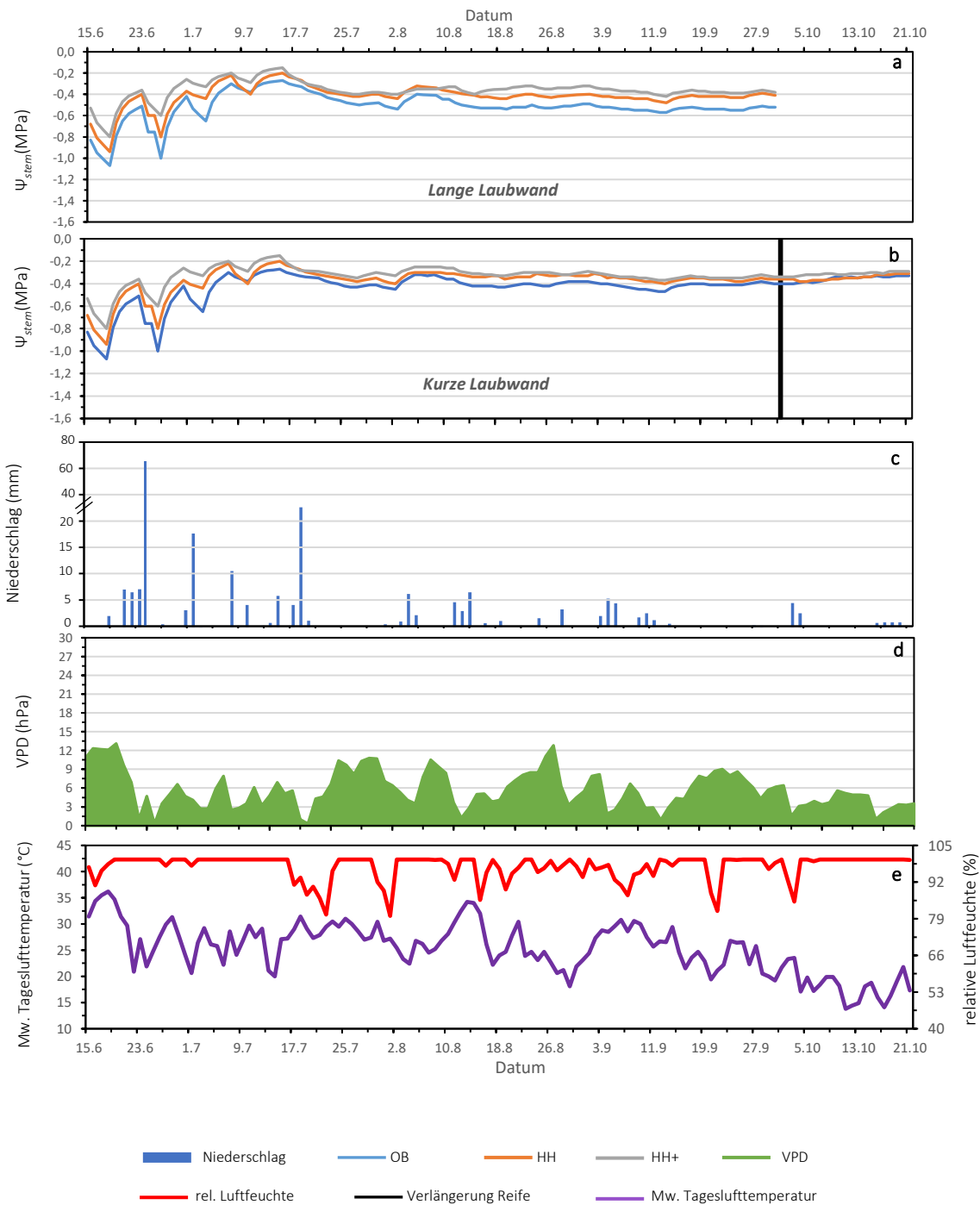


Abbildung 23 Tagesgänge von Stammwasserpotentialmessungen: Lange u. kurze Laubwand (Ψ_{stem} , a+b), Niederschlag (c), VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit, d), Mw. Tageslufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (e) vom 15. Juni bis zum 01. Oktober 2021 (15-minütige Werte als gemittelte Tageswerte). Ψ_{stem} entspricht dem Mittelwert aus $n = 4$ Messwerten.

Wie bereits im Vorjahr 2021 wurden zunächst mit Beginn der Messreihe keine Differenzierung zwischen langer und kurzer Laubwand vorgenommen. Erst mit Beginn des ersten saisonalen Laubschnittes am 22. Juni konnte eine Unterscheidung zwischen beiden Laubwandlängen vorgenommen werden. Mit Start der Messreihe am 30. Mai wurden bis zum 19. Juni anwachsende Lufttemperaturen und Tageshöchsttemperaturen von 39,8 °C bzw. VPD-Kennwerten von 25,7 hPa gemessen (Abbildung 24d+e). Fehlende Niederschläge sorgten innerhalb dieses Zeitraums für ein Absinken der Ψ_{stem} -Werte. Sowohl für das lange als auch das kurze Blattwerk wurden bis zu diesem Zeitpunkt die gleichen Werte der jeweiligen Varianten gemessen (OB = -0,62 MPa, HH = -0,50 MPa und HH+ = -0,41 MPa, MB = -0,60 MPa). Mit der Durchführung des ersten Laubschnitts und der simultanen Laubwandeinkürzung wurden ab dem 22. Juni eine Linderung des sich absinkenden Ψ_{stem} für 0,70m- Laubwände erfasst (grüne Markierung, Abbildung 24b). Ab diesem Zeitpunkt sorgten Niederschläge mit rund 56 l bis zum 29. Juni für eine Stagnation der Stammwasserpotentiale in langer und kurzer Laubwand, ehe die Hitzeperiode 2022 begann. Aneinanderreihende relative Luftfeuchtwerte von bis zu 90 %, Tageshöchsttemperaturen der Luft von 38 °C bzw. 14 hPa befeuerten das Absinken des Ψ_{stem} bis zum 16. Juli, ehe am 17. Juli der Bewässerungsschwellenwert von ca. -1,2 MPa des mittäglichen Stammwasserpentials erreicht wurde, wodurch die erste Bewässerung für das lange Blattwerk durchgeführt wurde:

Lange LW: OB = -1,24 MPa, HH = -0,84 MPa, HH+ = -0,81 MPa, MB = -1,25 MPa

Kurze LW: OB = -0,87 MPa, HH = -0,67 MPa, HH+ = -0,64 MPa, MB = -0,85 MPa

Eine Bewässerung brachte ein verbessertes Ψ_{stem} von maximal 0,25 MPa hervor, wodurch eine wöchentliche Bewässerung von Nöten war. Mit jedem weiteren Sommertag sanken in allen Versuchsvarianten das Ψ_{stem} in langer und kurzer Laubfront ab. Zeitgleich der vierten durchgeführten Bewässerungsmaßnahme am 06. August wurde erstmals ein Schnittpunkt zwischen MB und HH/HH+ erreicht, in welchem MB deutlich positivere Ψ_{stem} -Werte nach einer Bewässerung aufzeigte, als beide Abdeckungsvarianten (OB = -1,4 MPa, HH = -1,23 MPa, HH+ = -1,18 MPa, MB = -0,96 MPa). Ab diesem Momentum konnte eine Unterstockabdeckung einer punktuell gezielten Bewässerung nicht mehr standhalten. Innerhalb der Kontrollvariante sank das Ψ_{stem} stetig ab. Alle kurzen Erhebungsvarianten, so zum Beispiel MB und OB, befanden sich zu diesem Zeitpunkt an der unteren Grenze des moderaten Trockenstresses (-1,00 MPa bis -1,20 MPa). In HH und HH+ wurden zeitgleich Kennwerte unterhalb von -1,00 MPa und demzufolge in einem verbesserten Ψ_{stem} -Bereich erhoben (Abbildung 24a + b).

Seit Ende Juni zogen sich niederschlagsarme/-freie Tage bis zum 03. September fort, wodurch minimalste Mengen an Niederschlag von ca. 9,1 l keine Trockenstresslinderung der Reben herbeiführte. Bis zu diesem Augenblick zeigten alle Erhebungsformen folgende Ψ_{stem} auf:

Lange LW: OB = -1,46 MPa, HH = -1,25 MPa, HH+ = -1,23 MPa, MB = -0,99 MPa

Kurze LW: OB = -1,14 MPa, HH = -1,06 MPa, HH+ = -1,05 MPa, MB = -1,15 MPa

Mit Einsetzen der Regenphase ab dem 04. September vollzog der Weinberg eine Vitalisierung und gewann an „Farbe“, was sich auf auffüllende Wasserspeicher zurückführen

lässt. Ein parallel lineares Abflachen des VPD bzw. eine Verringerung der Tageshöchsttemperaturen erstreckten sich bis zum 26. September, der Tag des Lesestartes der langen Laubwände, bzw. bis zum Lesetermin der kurzen Laubwand am 14. Oktober. Aus Abbildung 24a lässt sich deutlich erkennen, dass mit Einsetzen der Niederschläge, Septemberbeginn, ein schnelles Angleichen der Wasserpotentiale zwischen MB und beiden Abdeckungsformen initiiert wurde, was für HH und HH+ spricht. Dies lässt wie bereits 2021 auf eine verbesserte und nachhaltige Speicherung von Niederschlägen in HH und HH+ schließen. Darüber hinaus dient eine solche Abdeckung als Schutzdecke vor einwirkenden Witterungseinflüssen.

Versuchsjahr 2022

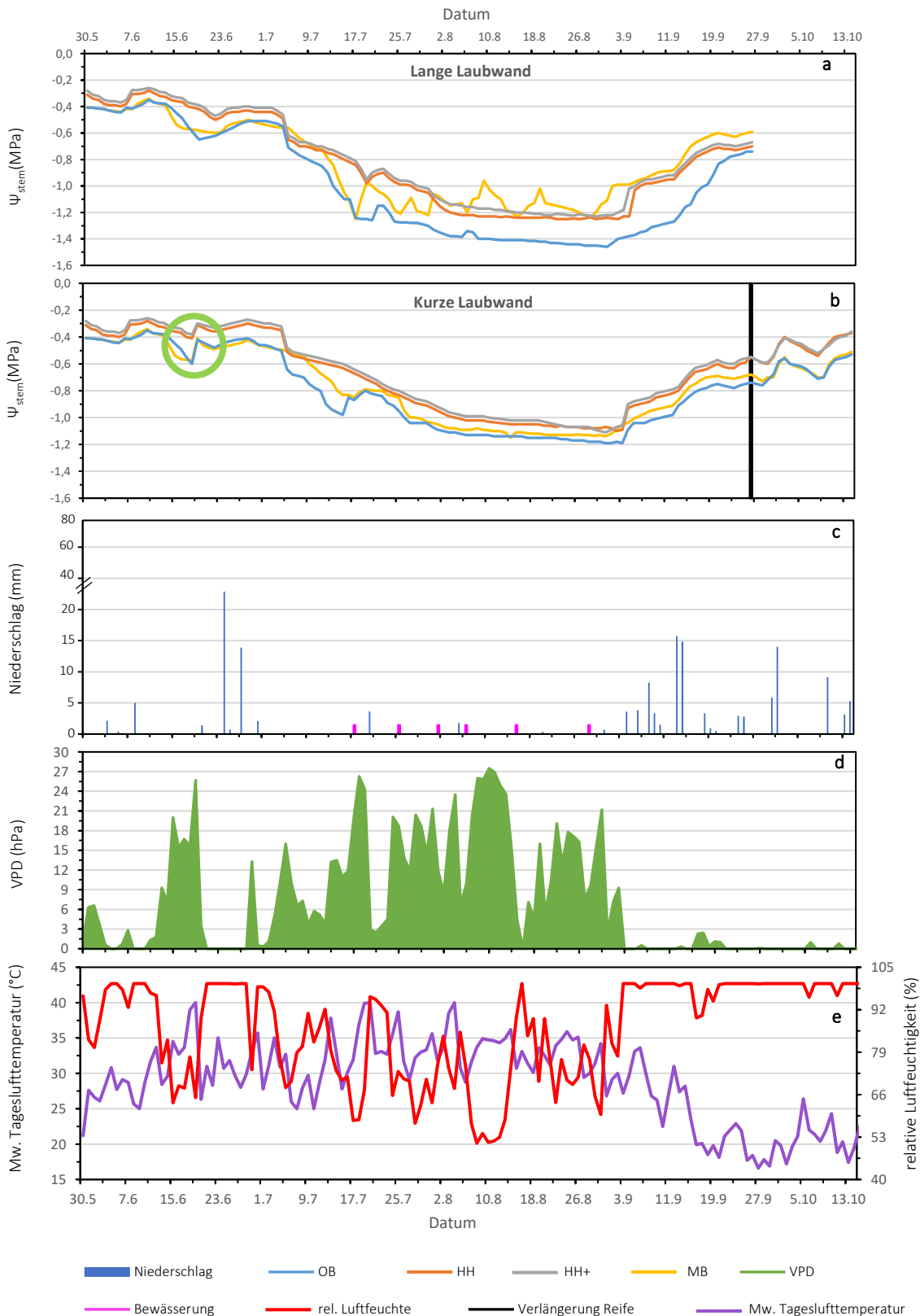


Abbildung 24 Tagesgänge von Stammwasserpotentialmessungen: Lange u. kurze Laubwand (Ψ_{stem} , a+b), Niederschlag (c), VPD (Wasserdampf-sättigungsdefizit, d), Mw. Tageslufttemperatur und relative Luftfeuchtigkeit (e) vom 30. Mai bis zum 14. Oktober 2022 (15-minütige Werte als gemittelte Tageswerte). Ψ_{stem} entspricht dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten.

5.4.2 Zusammenhang zwischen meteorologischen Parameter auf das mittägliche Stammwasserpotential

Um den Einfluss verschiedener meteorologischer Parameter wie z.B. Lufttemperatur, VPD und Globalstrahlung auf das Stammwasserpotential zu untersuchen, wurde an drei aufeinander folgenden Hochdrucktagen (17. bis 19. Juni 2021; 23. bis 25. August 2022) das Stammwasserpotential ermittelt. Die erhobenen Ψ_{stem} -Daten wurden für OB, HH, HH+ und MB erfasst. Zusätzlich wurde zwischen langer und kurzer Laubwand unterschieden. Eine moderate Bewässerung (MB) fand lediglich 2022 statt. Zusätzlich wurde der Potentialgradient (vgl. Gleichung 5), welcher für die Aufrechterhaltung des Transpirationsflusses dient, herangezogen.

5.4.2.1 Verhältnis zwischen der Lufttemperatur und dem Stammwasserpotential

In allen Varianten der langen Laubwände (OB, HH und HH+, MB) wurde ein Zusammenhang im Bereich von $R^2 = 0,816$ bis $0,965$ zwischen Lufttemperatur und Ψ_{stem} erhoben (Abbildung 25a). Die tiefsten Stammwasserpotentiale wurden in OB (-1,44 MPa), gefolgt von HH (-1,25 MPa), HH+ (-1,24 MPa) und MB (-1,18 MPa) ermittelt. HH, HH+ und MB zeigen bei Lufttemperaturen > 34 °C die positivsten Ψ_{stem} -Werte auf, allerdings auch ein intern steiles Sinken des Ψ_{stem} (Abbildung 25a). MB konnte bei hiesigen Lufttemperaturwerten die besten Ψ_{stem} -Kennwerte aufweisen. OB hingegen verzeichnete ein lineares Absinken des Ψ_{stem} bei ansteigenden Lufttemperaturen. Alle Erhebungsvarianten zeichnen sich durch ein stufenartiges Vermindern des Ψ_{stem} bei Lufttemperaturen > 34 °C aus.

Eingekürzte Laubwandvarianten brachten deutlich die höchsten Stammwasserpotentiale bei Tageshöchsttemperaturen der Luft von $36,3$ °C hervor, was sich in OB (-1,19 MPa), HH (-1,1 MPa), HH+ (-1,07 MPa) und MB (-1,17 MPa) bemerkbar machte. Ein Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und dem Ψ_{stem} der kurzen Laubwandvarianten lag bei $R^2 = 0,863$ bis $0,949$. In Abbildung 25aa wird die Differenzierung zwischen bedecktem und unbedecktem Boden innerhalb der Regressionsgraphen verdeutlicht. Im Vergleich zur langen Laubwand musste aufgrund des verbesserten Wasserhaushaltes in MB nicht bewässert werden, weshalb diese Versuchsvariante OB gleicht. Beide Graphen zeigen auf, dass ein enger Zusammenhang zwischen den örtlichen Witterungsbedingungen wie der Lufttemperatur und dem Ψ_{stem} besteht. Des Weiteren ist ersichtlich, dass eine Holzhäckselabdeckung bzw. Bewässerung die höchsten Ψ_{stem} -Werte aller Untersuchungsmodelle sowohl in langer als auch kurzer Laubwand aufweisen.

Für den Erhalt des Transpirationsflusses dient der Potentialgradient ($\Delta\Psi$). Hierzu wurden in Abbildung 25b-bb der Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}} = \Psi_{\text{pd}} - \Psi_{\text{stem}}$) und der Lufttemperatur näher untersucht. Für beide Messzeiträume in 2021 und 2022 wurde ein deutlicher Zusammenhang in $1,40$ m hohen Fronten von $R^2 = 0,841$ bis $0,965$ bzw. in $0,70$ m hohen Fronten von $R^2 = 0,803$ - $0,931$ festgestellt. Ebenfalls wie in Abbildung 25a-b wurde ermittelt, dass ab Lufttemperaturen > 33 °C eine intensive Zunahme des $\Delta\Psi_{\text{stem}}$ erfasst werden konnte.

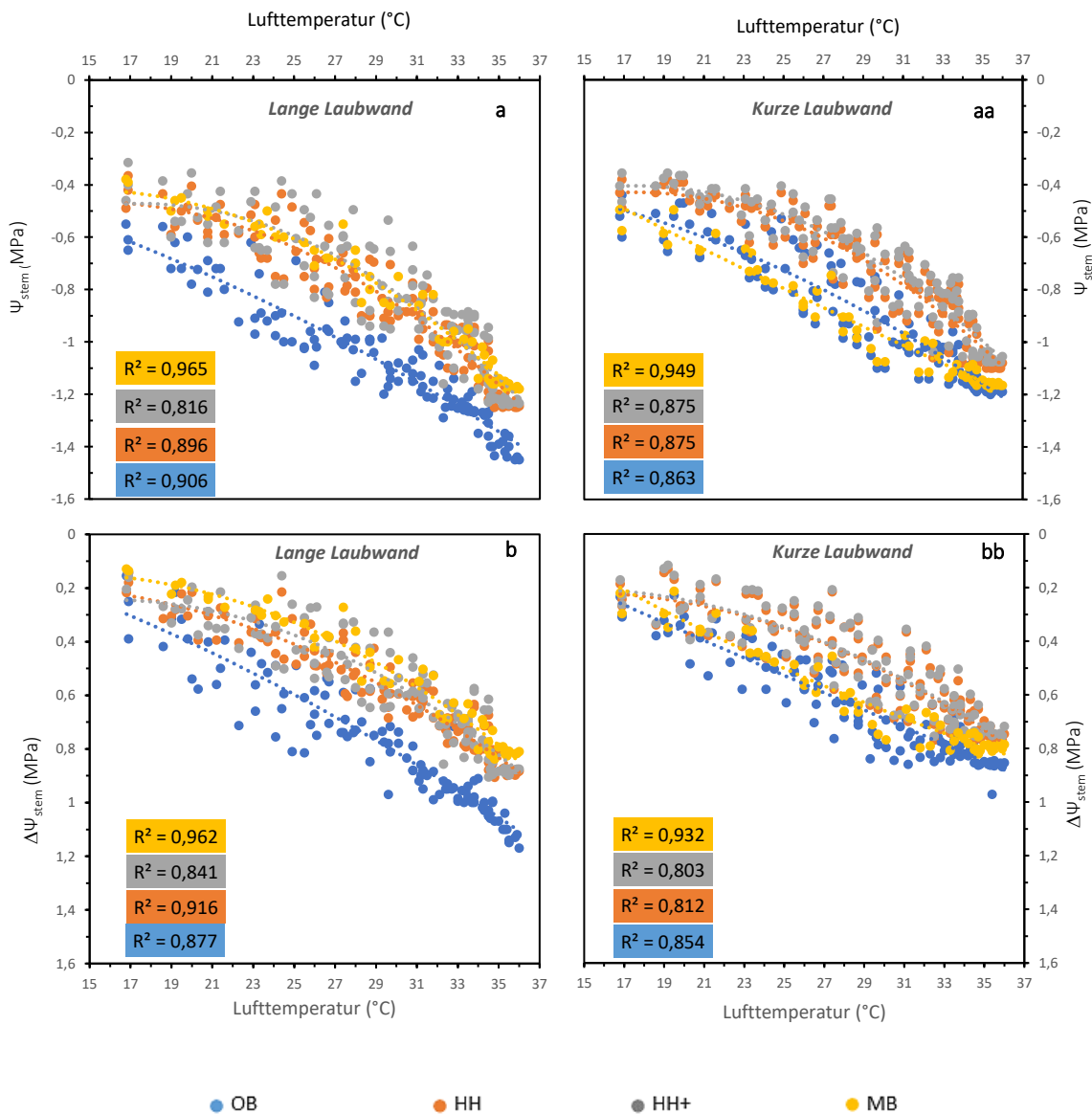


Abbildung 25 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und der Lufttemperatur 2 m ü. Gr. vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04:00 und 22:00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen (a-bb). Regressionsgleichung s. Anhang.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben, zeigt Abbildung 26 nochmals die Ermittlung des Ψ_{stem} an vollentfaltete und intakte Rebblätter mittels einer lichtundurchlässigen PVC-Tüte auf. Durch den Einsatz dieser speziell ausgewählten Tüten ist es möglich, die Transpiration der Blätter auszuschalten. Damit eine Verwechslung bei späterer Blattwasserpotentialmessungen mittels Scholander-Druckkammer zwischen kurzen und langen Laubwandblättern verhindert werden konnte, wurden alle PVC-Tüten der verkürzten Laubwandformen mit einer Markierung versehen (s. Abbildung 26). Die Auswahl der Rebblätter wurde zu jeder Messung in Nähe der Beerenzone entnommen.



Abbildung 26 Stammwasserpotentialmessung: Rebenblatt in lichtundurchlässiger PVC-Tüte, hier: HH – kurze Laubwand, Pfeddersheim 2021, [Eigene Darstellung 2022].

5.4.2.2 Verhältnis zwischen dem VPD und dem Stammwasserpotential

Die im unteren Verlauf aufgezeigte Abbildung 27 stellt den Einfluss des VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit) der Luft auf die ermittelten Ψ_{stem} -Werte zwischen OB, HH, HH+ und MB in langer und kurzer Laubwand dar.

Es ist ersichtlich, dass die tiefsten Ψ_{stem} -Werte innerhalb der Phase mit den höchsten VPD-Beträgen gemessen wurden (Abbildung 27a-aa). Aus Abbildung 27a geht für OB hervor, dass anwachsende VPD-Werte bis circa 20 hPa einen rapiden Abfall der Ψ_{stem} -Werte auslösten. Höhere VPD-Werte > 20 hPa konstatierten sich zu einem Abflachen der Regressionsgeraden und folglich zu einer minimierten Abnahme von Ψ_{stem} . Der mögliche Auslöser ist auf die Schließung der Stomata der Rebenblätter zurückzuführen, um die Transpiration unter erhöhter Evaporation zu kompensieren.

HH, HH+ und MB zeigen hingegen in der langen Laubwand einen linearen Verlauf an, was demzufolge auf eine ausreichende Wasserversorgung schließen lässt. Ein gleichmäßiges Absinken von Ψ_{stem} ist in beiden Abdeckungsvarianten zu verzeichnen. Im direkten Vergleich von HH und HH+/MB ist erstere die „Gestressteste“. Es wird innerhalb der Messreihe ein nichtlinearer Zusammenhang in OB ($R^2 = 0,890$) und ein linearer Zusammenhang in HH ($R^2 = 0,942$), HH+ ($R^2 = 0,893$) und MB ($R^2 = 0,948$) zwischen den erhobenen Ψ_{stem} -Werten und dem VPD gemessen. VPD-Kennwerte > 35 hPa in HH, HH+ und MB führten zur Verflachung der Regressionslinie. Dies ist Ψ_{stem} -Werten von -1,3 MPa und zugleich des zu bewässernden Schwellenwertes zuzuordnen.

Abbildung 27aa zeigt zusätzlich für alle vier Versuchsvarianten in kurzen Laubwänden das Verhältnis Ψ_{stem} und VPD. Die tiefsten Ψ_{stem} -Werte ließ OB messen, gefolgt von einem positiveren Verlauf in HH, HH+ und MB. Innerhalb dieser Messreihe wurde in jeder kurzen Laubwandvariante ein linearer Zusammenhang (OB: $R^2 = 0,910$; HH: $R^2 = 0,897$; HH+: $R^2 = 0,902$; MB: $R^2 = 0,955$) ermittelt. Ab einem VPD-Wert von > 42 hPa wurde eine geringfügigere Zunahme des Ψ_{stem} ermittelt, was sich auf den Beginn der Stomataschließung zurückführen lässt.

In beiden unteren Teilgrafiken von Abbildung 27b-bb wird der Einfluss des VPD der Luft auf das $\Delta\Psi_{\text{stem}}$ dargestellt. Ein individuelles Ansteigen der VPD-Werte jeder Varianten erzeugen in langer Laubwand ein Stomatenschluss und folglich eine Regulierung des $\Delta\Psi_{\text{stem}}$. Alle verkürzten Laubwände zeigten ein Abflachen der Regressionslinien bei deutlich höheren VPD-Werten auf, wie zuvor in Abbildung 27aa. Für den gesamten Messzeitraum wurden zwischen dem Stammwasserpotentialgradienten und dem VPD der Luft repräsentative Zusammenhänge in beiden Laubwandlängen im Bereich von $R^2 = 0,667$ bis $0,945$ erhoben.

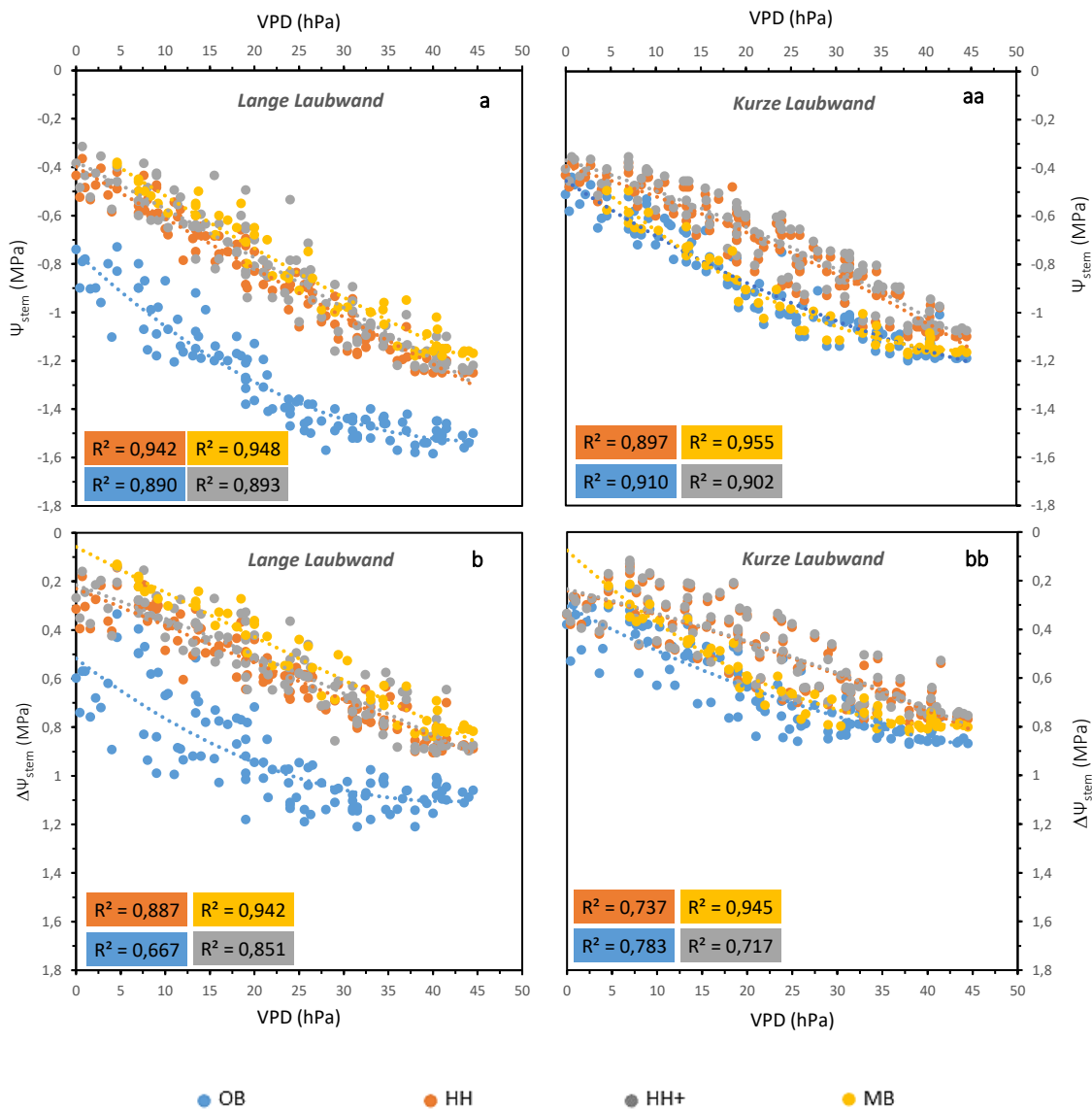


Abbildung 27 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und dem VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit) vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04:00 und 22:00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen (a-bb). Regressionsgleichung s. Anhang.

5.4.2.3 Verhältnis zwischen der Globalstrahlung und dem Stammwasserpotential

Eine weitere meteorologische Komponente stellt die Globalstrahlung dar, weshalb diese als Einflussgröße dem Ψ_{stem} gegenübergestellt wurde. Innerhalb dieses Messausschnittes wurde ein geringer Zusammenhang zwischen Globalstrahlung und den simultan erfassten Ψ_{stem} -Werten für alle Varianten der langen und kurzen Laubwände errechnet.

Alle Regressionslinien in Abbildung 28a-aa resultieren in einem leichten Abflachen bei einer Globalstrahlung $> 700 \text{ Wh/m}^2$. Lediglich OB lässt einen linearen Verlauf bei ansteigender Globalstrahlung aufzeigen. Ein minimales Reduzieren des Ψ_{stem} bei steigenden Globalstrahlungswerten ($> 500 \text{ Wh/m}^2$) für OB, HH und HH+ ist festzustellen (Abbildung 28a). Es kann daraus geschlossen werden, dass ein Boden mit verbessertem Wasserhaushalt ein verlangsamtes Absinken des Ψ_{stem} bei wachsender Globalstrahlung mit sich bringt. Innerhalb der Messreihe resultiert nur ein sehr geringer Zusammenhang sowohl zwischen der Globalstrahlung und dem Ψ_{stem} -Wert ($R^2 = 0,245$ bis $0,424$), Abbildung 28a und aa.

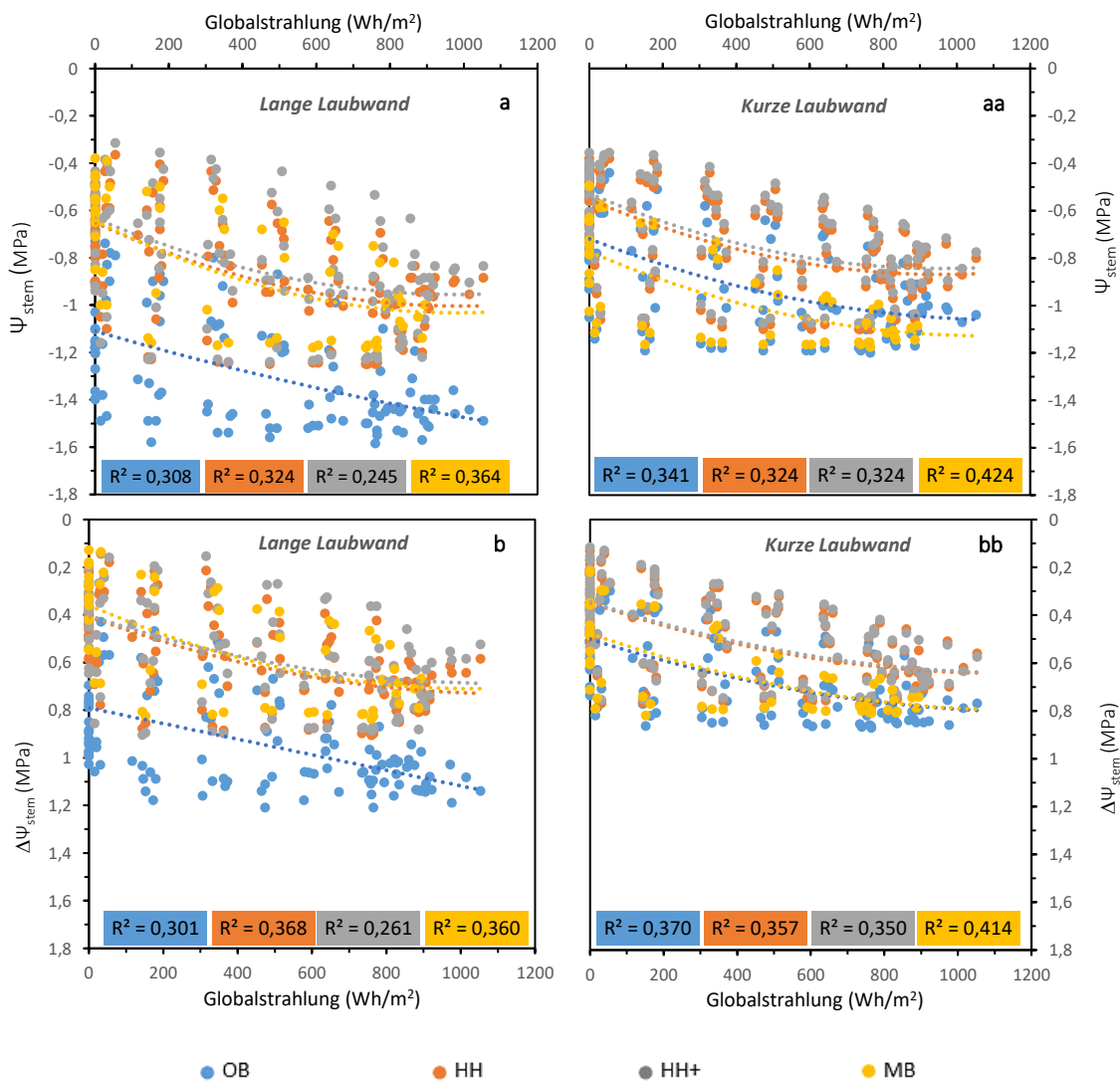


Abbildung 28 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und der Globalstrahlung (Wh/m^2) vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04:00 und 22:00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen (a-bb). Regressionsgleichung s. Anhang.

In Abbildung 28b-bb wird zusätzlich die Einflussnahme der Globalstrahlung auf dem $\Delta\Psi_{\text{stem}}$ verdeutlicht. Zwischen beiden Parametern besteht innerhalb des definierten Erhebungszeitraums in 2021 und 2022 ebenfalls wie in Abbildung 28a-aa eine nur sehr geringe Verbindung ($R^2 = 0,261$ bis $0,414$). Aufgrund der Regressionslinien (Abbildung 28b-bb) lässt sich ein Anstieg des $\Delta\Psi_{\text{stem}}$ bei parallel ansteigender Globalstrahlung widerspiegeln.

Das mittägliche Stammwasserpotential zeigte für die zuvor durchgeführten Untersuchungen geringe Zusammenhänge zwischen der Globalstrahlung und der Ψ_{stem} -Werte auf. Alle Regressionslinien lassen ein leichtes Abflachen des Ψ_{stem} bei anwachsender Globalstrahlung feststellen.

Erhebungsvarianten wie MB, HH und HH+ zeigten im Vergleich zu OB deutlich verbesserte Ψ_{stem} -Werte bei diesem meteorologischen Parameter auf. In allen langen Laubwänden wurden verringerte Stammwasserpotentialwerte als in kurzer Laubwand ermittelt. Dies stellt den verbesserten Wasserhaushalt innerhalb der kurzen Laubfronten heraus, was sich auf die verringerte Anzahl der Blätter und demzufolge eine geringere Beanspruchung des im Boden gespeicherten Wassers zurückführen lässt.

Die vorherrschende Globalstrahlung zeigte wie bereits zuvor bei Ψ_{stem} nur einen geringen Zusammenhang bei ansteigendem $\Delta\Psi_{\text{stem}}$ auf.

5.5 CO₂ -Aufnahme bei unterschiedlichen Blattwasserpotentialen 2022

Bei Wassermangel sinkt die Photosyntheseaktivität mit der Abnahme des Zellvolumens und demzufolge des Turgors ab. Der Einschränkungsbeginn wird durch eine Verengung der Spaltöffnungen verursacht. Die Empfindlichkeit der CO₂- Blattaufnahme gegenüber sich verringernden Blattwasserpotentialen sorgt für zunehmenden Wasserstress. Damit die Rebenblätter weiterhin unter hiesigen Bedingungen CO₂ aufnehmen können, müssen diese Wasser abgeben. Mit der Einsparung von Wasserverlusten wird zugleich der Einstrom von CO₂ herabgesetzt.

5.5.1 CO₂-Aufnahme der Rebenblätter

Um weiterhin individuelle Unterschiede in Sachen Wasserstress jeder Erhebungsform gezielter herausstellen zu können, wurden 2022 CO₂-Messungen an mittäglich besonnten Rebenblättern durchgeführt. Die Messungen fanden immer an Tagen, an welchen die durchgeführten Wasserpotentialmessungen vollzogen wurden, statt. Voraussetzung war ein vorherrschendes Hochdruckgebiet. Zwischen 12:00 und 13:30 Uhr, bei welcher die größtmögliche Lichteinstrahlung, bestehend aus direktem Sonnenlicht und diffuser Himmelstrahlung vorherrschte, wurden die Messeinheiten bei einem PPF¹³ von ca. 2000-2300 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ vorgenommen. Mithilfe dieser Teiluntersuchung sollte die CO₂- Aufnahme der Rebenblätter unter saisonal variierenden Blattwasserpotentialen untersucht werden. Zu welchem Zeitpunkt inmitten der Phänologie ein möglicher CO₂- Aufnahmestopp in den entsprechenden Versuchsformen vorzufinden war, galt es in MB, HH und OB zu ermitteln.

Aus Abbildung 29a und b lässt sich entnehmen, wie zur Mittagszeit (12:00 bis 13:30 Uhr) die CO₂-Aufnahme durch eine raumbegrenzte Plastiktüte über einen Zeitraum von fünf Minuten in der Erhebungsperiode vom 19. Juni bis 04. September absank. Regenereignisse bis zum 30. Juni zeigten eine deutlich verbesserte CO₂- Aufnahme der Rebenblätter bei mittäglich maximaler Bestrahlung. Mit der saisonalen Trockenphase verringerte sich in allen Versuchsvarianten die CO₂-Aufnahmezeiten stetig. Anhaltende Hitzeperioden bestätigen innerhalb der Kontrollvariante der langen Laubwand ein Austrocknen des Bodens. Varianten, welche über einen ausreichenden Wasserhaushalt verfügten (MB, HH bspw. Kapitel 5.2, 5.3), konnten während der mittäglichen Höchstmengen an Lichtstrahlung eine rasche und demzufolge eine kontinuierliche CO₂-Aufnahme gewährleisten.

Für Abbildung 29a geht hervor, dass eine gezielte Bewässerung die Aufnahme an CO₂ und schlussendlich die Fotosynthese sicherstellen kann. Zeitlich maximale CO₂-Aufnahmen innerhalb der Plastiktüten wurden am 02. Juli mit 1,58 ppmv/s erhoben. Bis zum 30. Juli konnte HH der Variante MB in Sachen CO₂-Aufnahme standhalten, ehe bis zum 28. August ein Abflachen zu erkennen ist. Innerhalb OB wurde eine gehemmte CO₂-Aufnahme ab dem 17. Juli ermittelt. Gegen Ende der Vegetationsperiode, dem 28. August, nahm in allen drei Versuchsformen die Aufnahme an CO₂ aufgrund einsetzender Niederschläge

¹³ Anzahl der pro Flächeneinheit auftreffenden Photonen im Spektralbereich von 400 bis 700 nm, Photonenflussdichte in $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\text{s})$, (Miehle-Huang 2009).

zu. Mittels einer Bewässerung in MB konnten selektive Spitzenwerte innerhalb der Trockenphasen von ca. 1,2 ppmv/s gemessen werden. Im Gegensatz hierzu erreichte HH nur noch einen CO₂-Wert von ca. 1,0 ppmv/s, wohingegen sogar eine gehemmte CO₂-Aufnahme von 0,6 ppmv/s bis zum 28. August in OB festzustellen war. Ein stark verändertes Bild mit verbessertem CO₂-Verlauf fand innerhalb der drei aufgezeigten Versuchsformen der kurzen Laubwände statt (Abbildung 29b). Aufgrund des verminderten Blattwerkes wurde weniger Wasser beansprucht, wodurch ein deutlich höheres Niveau an aufzunehmendem CO₂ gemessen wurde. HH vollzog eine CO₂-Aufnahme von 1,2 bis 1,3 ppmv/s wobei MB und OB sich zwischen 1,1 und 1,2 ppmv/s einordnen lassen. Trotz der einsetzenden Hitzeperioden zeigte HH sich über die gesamte Messkampagne als beste Form der maximalen CO₂-Aufnahme. Aufgrund dessen, dass keine Bewässerung innerhalb der kurzen Laubfront in MB stattfand, ist diese OB gleichzusetzen, was sich ebenfalls im CO₂-Verlauf ablesen lässt (Abbildung 29b).

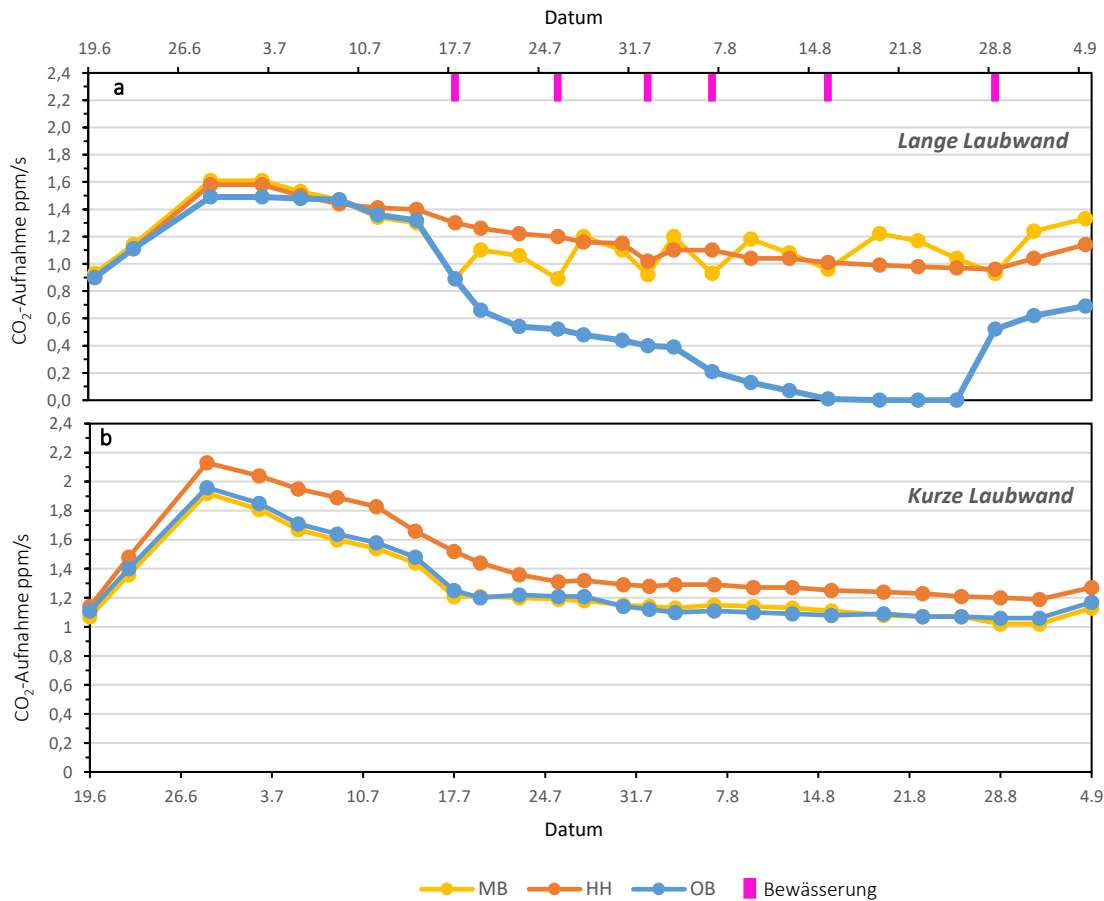


Abbildung 29 CO₂-Aufnahme (ppmv/s) 2022 innerhalb eines Messzeitraumes von 5 Minuten über den gesamten Vegetationsverlauf (a-b). CO₂- und Lichtsensor samt Rebenblatt luftdicht in einer 2 l Plastiktüte verpackt. Messwerte zwischen 12:00 und 13:30 Uhr ermittelt. Kontrollvariante (OB), moderate Bewässerung (MB), Holzhäcksel Unterstock (HH). CO₂-Daten entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.

5.5.2 CO₂-Aufnahme und frühmorgendliches Blattwasserpotential

Um einen tiefgründigeren Aufschluss über die CO₂-Aufnahme zu erhalten, wurde das am gleichen Tag vor Sonnenaufgang ermittelte Blattwasserpotential herangezogen, um mögliche Kennwerte herausarbeiten zu können.

Aufgrund des durch starke Trockenheit geprägten Jahres 2022 kann mithilfe von Abbildung 30a und b dargelegt werden, dass eine moderate Bewässerung bzw. eine Unterstockabdeckung die Aufrechterhaltung der CO₂-Aufnahme garantieren kann. Für beide Teilabbildungen konnten stark signifikante Zusammenhänge zwischen dem frühmorgendlichen Blattwasserpotential und der am Mittag zwischen 12:00 bis 13:30 Uhr ermittelten CO₂-Aufnahmegeschwindigkeiten der Rebenblätter nachgewiesen werden. Ziel war es, durch die am Morgen erhobenen Blattwasserpotentialmessungen ein Erkenntnis über die am Mittag maximal besonnenen Rebenblätter und deren Zellatmung, also der CO₂-Aufnahme, zu erhalten.

Inmitten der Kontrollvariante zeigte die Verringerung des CO₂ aufgrund der Zellatmung innerhalb der Plastiktüte eine verlangsamte Aufnahmegeschwindigkeit und folglich eine gehemmte Aktivität der Stomata, welche ab einem $\Psi_{pd} > -0,35$ MPa auf bis zu 0,0 ppmv/s sank (Abbildung 30a). Diese Reaktion der Rebenblätter ist auf das Schließen der Spaltöffnungen auf der Blattunterseite zurückzuführen, um den Transpirationsprozess zu reduzieren, wodurch verringerte Mengen an Wasser benötigt werden. Nachteile dieses herabgesetzten Prozesses sind die Überhitzung der Reben und schlussendlich ein Welken bzw. Absterben der Blätter und Beeren. Die zuvor in den Morgenstunden geringfügig bis stark gestresste Reben, gemessen am Blattwasserpotential, sind ein Abbild der später erhobenen CO₂-Aufnahmegeschwindigkeiten.

Abbildung 30b zeigt inmitten der kurzen Laubwand auf, dass ebenfalls alle drei Varianten mit ansteigendem Trockenstress eine verlangsamte Zellatmung seitens der Rebenblätter durchführen. HH erweist sich als Variante mit der schnellsten CO₂-Aufnahme für den gemessenen Zeitraum. MB und OB sind wie bereits im vorherigen Kapitel hinsichtlich der Stomataaktivität auf einem CO₂-Aufnahmeniveau angesiedelt. Im direkten Vergleich zum langen Blattwerk in Abbildung 30a wird ersichtlich, dass alle verkürzten Varianten bereits bei geringem Trockenstress eine schnellere Aufnahme an CO₂ mit rund 2,0 ppmv/s als deren benachbarten langen Formen mit ca. 1,8 ppmv/s vorweisen. Als Gemeinsamkeit beider Laubwandlängen lässt sich das nahezu senkrechte Abfallen des Blattwasserpotentials in Zusammenhang mit der Aufnahmegeschwindigkeit an CO₂ bei einem Wert von rund 1,2 ppmv/s feststellen. Das Nichtabsinken der Blattwasserpotentiale unter den Bewässerungsschwellenwert lässt in Abbildung 30b erkennen, dass sie Zellaktivität aufrechtgehalten werden konnte. Ebenfalls wird mithilfe dieser Teiluntersuchung aufgezeigt, dass alle drei Varianten mit ansteigendem Trockenstress eine verlangsamte Zellatmung seitens der Rebenblätter durchführen. HH erweist sich als Variante mit der schnellsten CO₂-Aufnahme für den gemessenen Zeitraum.

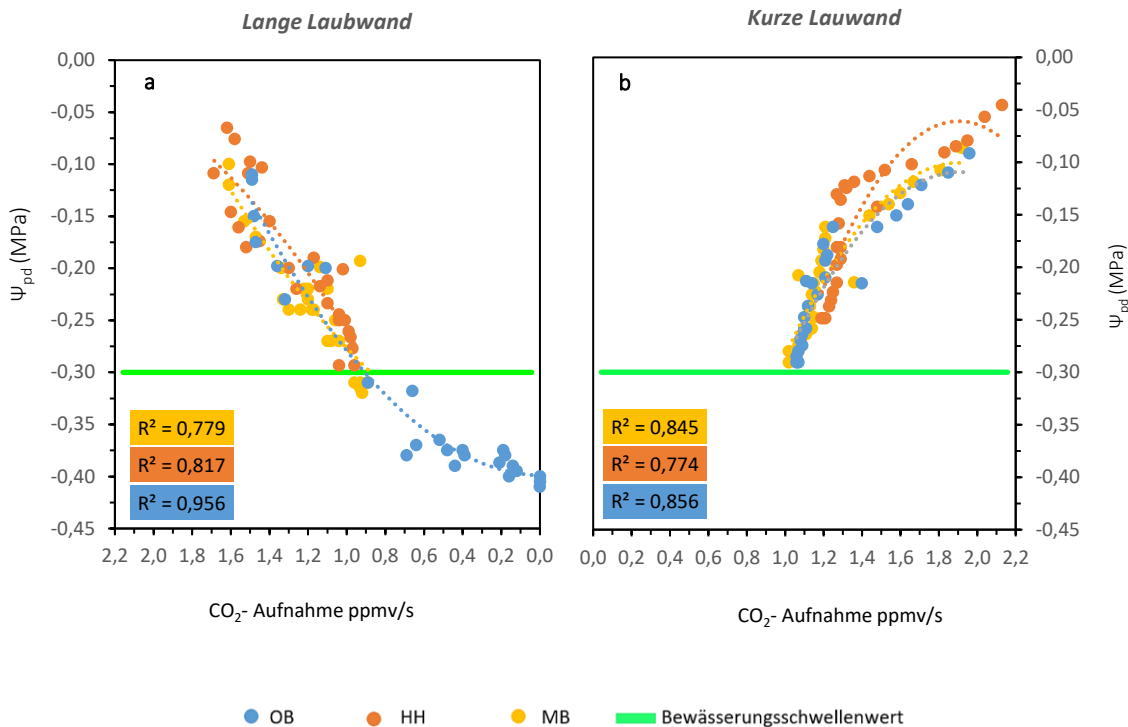


Abbildung 30 Zusammenhang zwischen der CO_2 -Aufnahme (ppmv/s) sowie dem Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) vom 19. Juni bis 04. September 2022 zwischen 12:00 und 13:30 Uhr (a+b). Messung innerhalb lichtdurchlässiger Plastiktüten. Mittelwerte entsprechen $n = 4$ Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang.

Welche Folgen eine verringerte CO_2 -Aufnahme mit sich bringt, zeigt auf der folgenden Seite Abbildung 31 im Hitzejahr 2022 auf. Aufgrund des unzureichenden Wasserhaushaltes, welcher in dieser Arbeit bis zum jetzigen Kapitel durch Blattwasserpotential-, CO_2 -Aufnahme- und Bodenfeuchtemessungen belegt wurde, kam es innerhalb OB zum Eintrocknen der Beeren und Rebenblätter. MB und HH, welche einen ausreichenden Wasserhaushalt vorwiesen, zeigen hingegen minimal bis gar keinen Trockenstress auf. In HH sind lediglich im oberen Laubwandbereich abklappende Blätter ersichtlich, was erste Anzeichen von einsetzendem Trockenstress darstellt (rote Markierung). Zu diesem Zeitpunkt befand sich HH unmittelbar oberhalb der Bewässerungsschwelle von -0,30 MPa. Wären Anfang September nicht die langersehnten Niederschläge gefallen, so wäre HH-Lang sicherlich unterhalb des Bewässerungsschwellenwertes abgerutscht, was sich weiterhin in welken Blättern niedergeschlagen und darüber hinaus zum Ausaustrocknen der Beeren geführt hätte.

OB



MB



HH

Abbildung 31 Trockenstress: Vitalität von Blatt und Beeren für die Varianten der langen Laubwände im Versuchsjahr 2022: OB, MB und HH, Pfeddersheim 27. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].

Die in Kapitel 5.2 und 5.3 dargestellten Teilergebnisse wurden 2022 mithilfe dieser Messkampagne nochmals deutlich bestätigt. Eine Unterstockabdeckung konnte im Vergleich zur eingesetzten Tropfbewässerung über weite Strecken hinweg nahezu auf Augenhöhe in Sachen CO₂- Aufnahme standhalten (vgl. Abbildung 29). Gegen Ende der Vegetationsperiode kam allerdings auch eine solche Abdeckung an ihre Grenzen. In der Kontrollvariante (OB) war ein Schließen der Stomata nicht zu verhindern.

Ein Nicht-Schließen der Stomata für das kurze Blattwerk konnte mittels dieses Teilmessung wiederum bestätigen, dass eine Halbierung der Laubwand einen verbesserten Wasserhaushalt der örtlichen Reben mit sich bringt und folglich bei klimatischen Extrembedingungen, wie sie 2022 stattfanden, ein Stomataschließen verhindern.

5.6 Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf

Mit Hilfe von Infrarotmessungen wurde in vier 24 h Tagesmessungen (21. Juli und 15. August 2021 bzw. 19. Juli und 04. August 2022) der Einfluss einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich auf die Oberflächentemperaturen von Beeren, Blatt und Boden im Tagesverlauf während den Vegetationsperioden untersucht. Folgende Untersuchungsvarianten wurden miteinander verglichen: Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckende Abdeckung (HH+) und moderate Bewässerung (MB). 2021 fand letztere nicht statt, weshalb diese in den folgenden 2021-Grafiken nicht vorzufinden ist.

Aufgrund der vielseitigen Darstellungen werden zum Verständnis für die nun folgenden Kapitel zuerst alle langen Laubwände inklusive Ost- und Westfronten und anschließend in gleichere Reihenfolge alle kurzen Laubfronten gegenübergestellt und beschrieben.

5.6.1 Oberflächentemperatur: Boden

In beiden Erhebungsjahren konnte kein Unterschied hinsichtlich der oberflächigen Bodentemperatur zwischen langer und kurzer Laubwand herausgestellt werden, weshalb im jetzigen Teilkapitel keine Unterscheidung vorgenommen wurde.

Versuchsjahr 2021

21. Juli 2021

Die durchgeführten Messungen der oberflächigen Bodentemperaturen wurden zwischen den jeweiligen Rebstöcken im Unterstockbereich erhoben. Bereits 2021 wurde deutlich, dass die Oberflächentemperatur des Bodens durch ausgebrachte Holzhäcksel stark gesenkt werden. Die jeweils in den frühen Morgenstunden begonnenen Tagesmessungen zeigten fast identisch ansteigende Temperaturwerte bis 05:30 Uhr auf (OB: 12,4 °C; HH: 12,7 °C; HH+: 12,8 °C). Bis 10:00 Uhr am Vormittag kristallisierten sich bereits immer größer werdende Temperaturdifferenzen zwischen HH und OB/HH+ heraus, ehe die Oberflächentemperaturen von OB (39,5 °C), HH+ (34,6 °C) und HH (28,3 °C) bis 12:00 Uhr linear anstiegen. Zwischen 12:00 und 13:00 Uhr erfolgte eine Temperaturminderung, aufgrund der Schattenbildung im Unterstockbereich durch den vorherrschenden Zenitstand der Sonne. An diesem Tag wurden für OB und HH+ maximale Oberflächentemperaturen des Bodens von 45,1 °C bzw. 40,5 °C erfasst. Variante HH erreichte zeitgleich ein niedrigeres Temperaturniveau (HH: 30,4 °C), bevor alle Erhebungsformen einen Temperaturabfall verzeichneten. Ab 19:30 Uhr sanken die Oberflächentemperaturen in OB bis zur Beendigung der Tagesmessung tiefer als die Holzhäckseltemperatur ab (OB: 16 °C; HH: 18,6 °C). Eine rasche Erwärmung und Abkühlung ergeben sich im Unterstockbereich für OB und HH+. HH+ lässt sich als „Bindeglied“ zwischen OB und HH hinsichtlich der Oberflächentemperatur des Bodens darstellen. Ein entsprechender Kühlungseffekt wie in HH konnte die flächendeckende Bedeckung nicht vorweisen.

15. August 2021

Die am 15. August durchgeführten Messungen zeigen die gleichen homogenen Temperatureffekte wie am 21. Juli. Bis 05:15 Uhr wurden nahezu gleiche

Bodenoberflächentemperaturen (OB: 13,3 °C; HH: 13,2 °C; HH+: 13,3 °C) erfasst, bis 09:30 Uhr entwickelten sich annähernd lineare Temperaturanstiege, ehe sich OB und HH+ bis 14:00 Uhr mit Tageshöchsttemperaturen von 44,4 °C bzw. 41,5 °C kontrastierten (Abbildung 32b). Mit Einsetzen des Höchststandes der Sonne stagnierte und nahm die oberflächige Bodentemperatur geringfügig in allen Varianten ab, ehe diese ab 13:00 Uhr anstieg. Während in OB ein rapider Temperatursturz erhoben wurde, konnte in HH+ das Temperaturniveau bis 15:00 Uhr beinahe gehalten werden. 60 Minuten verzögert, gegen 15:00 Uhr, wurde in HH eine extrem verringerte maximale Oberflächentagesbodentemperatur von 27,5 °C ermittelt, ehe diese bis zum Messende auf 13 °C absank. Der hierbei deutlich erzielte Kühlungseffekt der bedeckten gegenüber nichtbedeckten Unterstockvariante von 16,5 °C stellt den Kühlungseffekt deutlich heraus. Am späten Nachmittag, circa 17:00 Uhr, redigierten sich sowohl OB und HH+ mit fast gleichen Bodenoberflächentemperaturen bis zur Beendigung der Messung.

Zur Abendstunde (20:00Uhr) wurde erstmals ein „Schneiden“ der Verlaufslinien zwischen HH und OB/HH+ ersichtlich, wohingegen HH bis 23:00 Uhr auffällig höhere Oberflächen-temperaturen aufweist als OB und HH+. Ab 23:00 Uhr agieren alle Erhebungsvarianten bis 02:00 Uhr nachts fast im Einklang, mit geringfügig erhöhter Bodenoberflächentemperatur in HH.

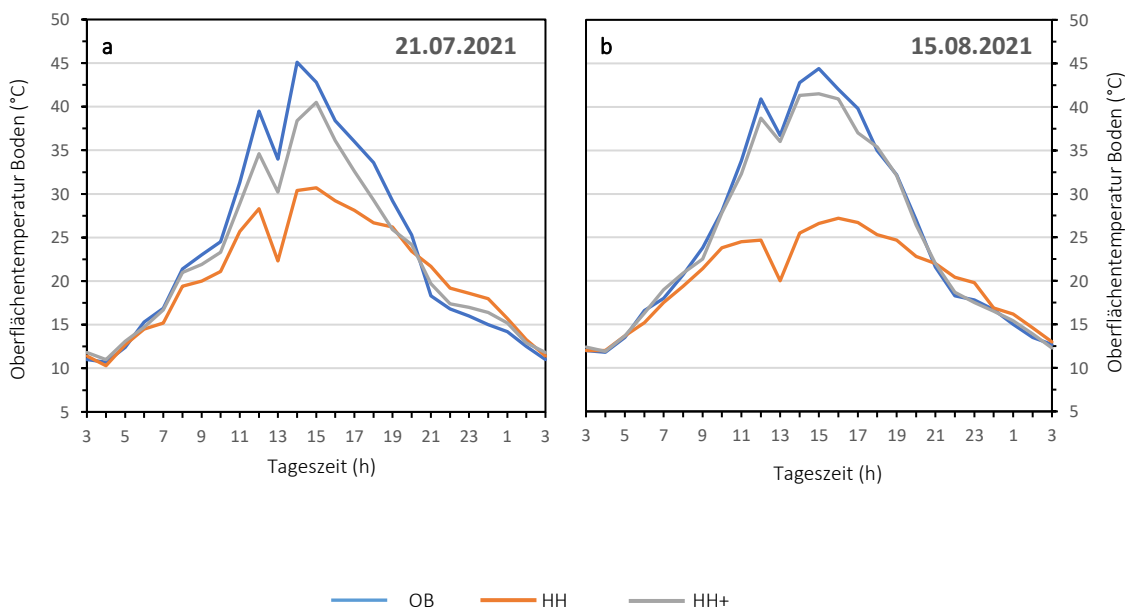


Abbildung 32 Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a+b) der Oberflächentemperatur des Bodens (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächige Bodentemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

Versuchsjahr 2022

19. Juli 2022

Die am 19. Juli durchgeführte Tagesmessung zeigte nahezu den gleichen Temperatureffekt bis 09:00 Uhr auf, wie bereits 2021 (OB = 25,2 °C; HH = 25,5 °C; HH+ = 25,8 °C; MB = 25,1 °C). Ab diesem Zeitpunkt entstanden immer größere oberflächige Temperaturdisparitäten zwischen OB/MB und HH+/HH, ehe die Bodenoberflächentemperaturen von OB (41,6 °C), HH (29,7 °C), HH+ (35,2 °C) und MB (42,4 °C) bis 12:00 Uhr linear anstiegen. Aufgrund des Zenitstandes der Sonne gegen 12:00 Uhr wurde eine Verringerung der oberflächigen Bodentemperatur bis 13:00 Uhr ermittelt (Abbildung 33a). Individuelle Tageshöchstwerte der oberflächigen Bodentemperatur wurden mit 62,1 °C (OB), 34,3 °C (HH), 58,7 °C (HH+) und 61,9 °C (MB) erhoben. Ab diesem Zeitpunkt fielen alle Bodenoberflächentemperaturen stündlich um 3K ab, wohingegen sich HH um 1,25 K/h reduzierte. Gegen 19:00 Uhr nahm die Verlaufslinie einen einstündigen in OB, HH+ und MB linear absinkenden Verlauf ein, ehe alle vier Versuchsvarianten bis zum Ende der Tagesmessung einen gleichbleibenden Temperaturverlauf vollzogen.

04. August 2022

Die zweite durchgeführte Tagesmessung im Jahr 2022 zeichnete sich bereits gegen 08:30 Uhr durch minimal differenzierende Bodenoberflächentemperaturen zwischen den jeweiligen Versuchsformen aus (Abbildung 33b). Gegen 09:00 Uhr spiegelte sich ein heterogener Verlauf bis 12:00 Uhr ab (OB = 48,1 °C; HH = 33,7 °C, HH+ = 43,4 °C, MB = 47,7 °C), bis das Erreichen des Höchststandes der Sonne erreicht wurde. Eine Schattenbildung im Unterstockbereich und Abkühlung der Bodenoberflächentemperaturen resultierte (Abbildung 33b). Während in HH gegen 14:00 Uhr die Tageshöchsttemperatur des Bodens von 35,1 °C gemessen wurde, erwärmten sich die im Unterstockbereich „offen nicht bedeckten“ Böden in OB, HH+ und MB bis 16:00 Uhr nahezu doppelt so hoch wie HH, einst alle drei zuvor genannten Formen gegen 20:00 Uhr einen nahezu exakt gleichen Oberflächentemperaturverlauf vollzogen. Ab 21:00 Uhr erreichten alle Erhebungsvarianten ein gleiches Temperaturniveau und sanken bis zur Beendigung der Messperiode auf 15,6 °C (OB); 15,5 °C (HH); 45,7 °C (HH +) und 15,4 °C (MB) ab.

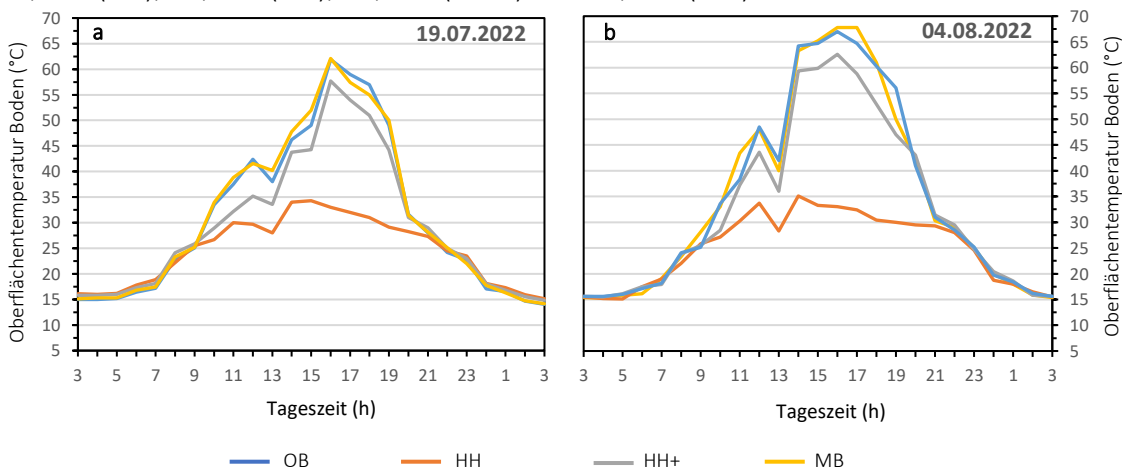
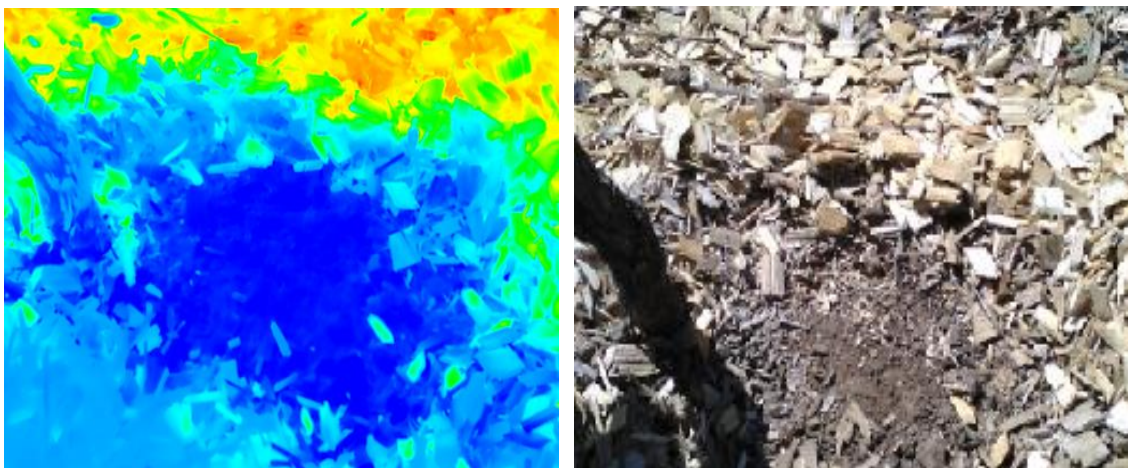
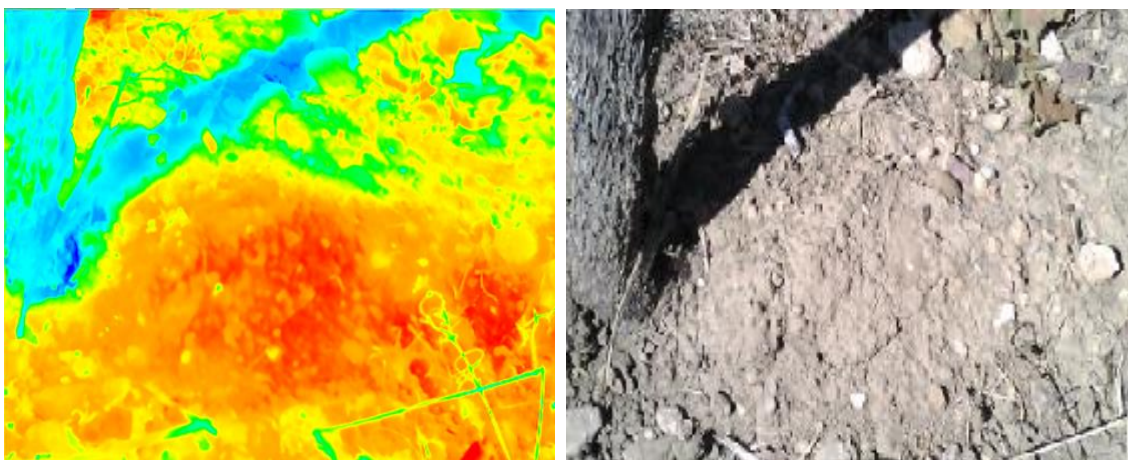


Abbildung 33

Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a+b) der Oberflächentemperatur des Bodens (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockbedeckung (HH), flächendeckenden Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB) in den Versuchsjahren 2021 und 2022. Bodenoberflächentemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

Die folgenden Infrarotaufnahmen verdeutlichen nochmals den prekären Temperaturunterschied der Oberflächentemperatur des Bodens zwischen bedecktem und nicht bedecktem Unterstockbereich am 28. August 2022 gegen 15:00 Uhr (Abbildung 34). In Versuchsvarianten, in welchen keine Unterstockbedeckung vorhanden ist (MB, OB, HH+), wurden oberflächige Temperaturerhöhungen von bis zu 30 K gegenüber einer mit Holzhäcksel bedeckten Form unterhalb der Reben wie HH ermittelt. Welchen Wirkungseffekt die Reduzierung der oberflächigen Bodentemperatur mit sich bringt, zeigt sich darüber hinaus an den durchgeführten Untersuchungen wie der verbesserten Bodenfeuchte- und Blattwasserpotentialmessungen, daraus folgend eines verbesserten Nährstofftransport innerhalb des Kontinuums Boden-Rebe (s. Kapitel 5.2- 5.5).

Keine Unterstockbedeckung (OB/MB/HH+), hier OB.



Unterstockbedeckung (HH)

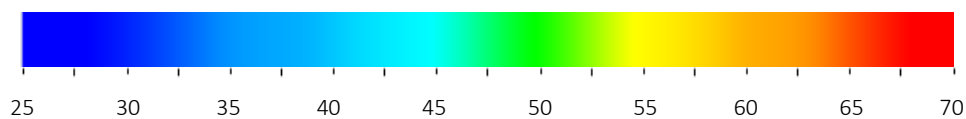


Abbildung 34 Oberflächentemperatur des Bodens, Bodenbedeckung (HH) versus nichtbedeckter Variante (OB), Infrarotaufnahme und Originalbild gegen 15:00 Uhr, Pfeddersheim 28. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].

Letztlich kann mithilfe der vollzogenen Teilmessung belegt werden, dass eine Unterstockbedeckung einen Kühlungseffekt der oberflächigen Bodentemperatur mit sich bringt, welcher sich durch eine deutliche Temperaturreduzierung ablichten lässt (Abbildung 32-34). Ein weiterer Aspekt spielt der Farbunterschied zwischen nicht bedecktem Boden in OB und HH+ (Lehm-Löß = braun) und der im Unterstockbereich ausgebrachten Holzhäcksel (Eichenhäcksel = sandfarben).

Demzufolge lässt eine solche Abdeckung auf eine größere Reflexion schließen, wohingegen in der Kontrollvariante (OB) eine erhöhte Absorption stattfindet (s. Kapitel 5.7), was sich letzten Endes in der erhöhten Bodenoberflächentemperatur niederschlägt. Eine flächendeckende Bedeckung brachte hingegen eine minimal reduzierte Oberflächentemperatur des Bodens als OB, was einen verminderten Kühlungseffekt im „offenen“ Unterstockraum bedeutet.

5.6.2 Oberflächentemperatur: Beeren

Versuchsjahr 2021

21. Juli 2021

Lange Laubwand

Im Gegensatz zur Oberflächentemperatur des Bodens wurde zur Erhebung der Beerenoberflächentemperatur eine Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand vorgenommen. Zusätzlich wurde zwischen Ost- und Westseite der Rebenzeilen differenziert. Es zeigt sich, dass alle Ostseiten, welche am Vormittag besonnt wurden, im direkten Vergleich zur Westseite niedrigere Beerenoberflächentemperaturen aufweisen. Zu Messbeginn wurden nahezu in allen Ost- und Westseiten gleiche Oberflächentemperaturen der Beeren bis 9:00 Uhr ermittelt. Innerhalb der langen Laubfronten wurde gegen 13:00 Uhr in OB-O das erste oberflächige Beerentemperaturmaximum von 30,2 °C gemessen. Bis 03:00 Uhr nahm in dieser Variante die oberflächige Beerentemperatur auf 14 °C ab. HH-O und HH+-O erreichten ihren Temperaturhöhepunkt um 14:00 Uhr mit 31,2 °C und 30,7 °C, ehe sie bis zum Messende auf 14,4 °C bzw. 14,5 °C abfielen (Abbildung 35a).

Mit Blick auf die Westseiten erwärmte sich HH-W und HH+-W um 14:00 Uhr an diesem Tage nicht ausgiebiger als 36,5 °C und 36,2 °C und OB-W erst um 15:00 Uhr auf 34,2 °C. In allen langen Laubwänden ergaben die Messergebnisse ein Angleichen der Beerenhauttemperaturen von Ost- und Westseiten innerhalb jeder Versuchsvariante ab 21:00 Uhr.

Kurze Laubwand

Um eine Stunde verfrüht (12:00 Uhr) wurde für die kurze Laubfront HH-O das oberflächige Temperaturmaximum von 31,6 °C erreicht, nachdem ein Temperatursturz der Oberflächentemperatur bis 03:00 Uhr auf 13,7 °C stattfand. Demgegenüber konnte HH+-O um 13:00 Uhr mit 30, °C bzw. OB-O erst gegen 14:00 Uhr ein oberflächiges Beerentemperaturmaximum von 29,4 °C verzeichnen. Bis zum Messende wurden in letzterer die niedrigste Oberflächentemperatur von 12,7 °C gemessen (Abbildung 35aa). Aufgrund des sich verändernden Sonnenstandes wurde ein verzögertes Oberflächentemperaturmaximum um 14:30 Uhr der Westseiten in OB-W (35,7 °C), HH-W (36,7 °C) und HH+-W (35,9 °C) gegenüber der Ostseiten ermittelt. Rund eine Stunde konnte dieses Temperaturniveau aufrecht gehalten werden, bevor eine Temperaturabnahme bis 03:00 Uhr in OB-W auf 12,3 °C, HH-W auf 12,5 °C und HH+-W auf 12,3 °C eruiert wurde (Abbildung 35aa). Auffallend ist, dass trotz der immer intensiveren Schattenbildung im Tagesverlauf innerhalb der Ostwände in HH gleiche Oberflächentemperaturen wie der mittäglich ausgesetzten bestrahlten OB-W und HH+-W auftreten (grüne Markierung), ehe zwischen 22:00 und 23:00 Uhr eine Homogenität der Beerenhauttemperaturen besteht.

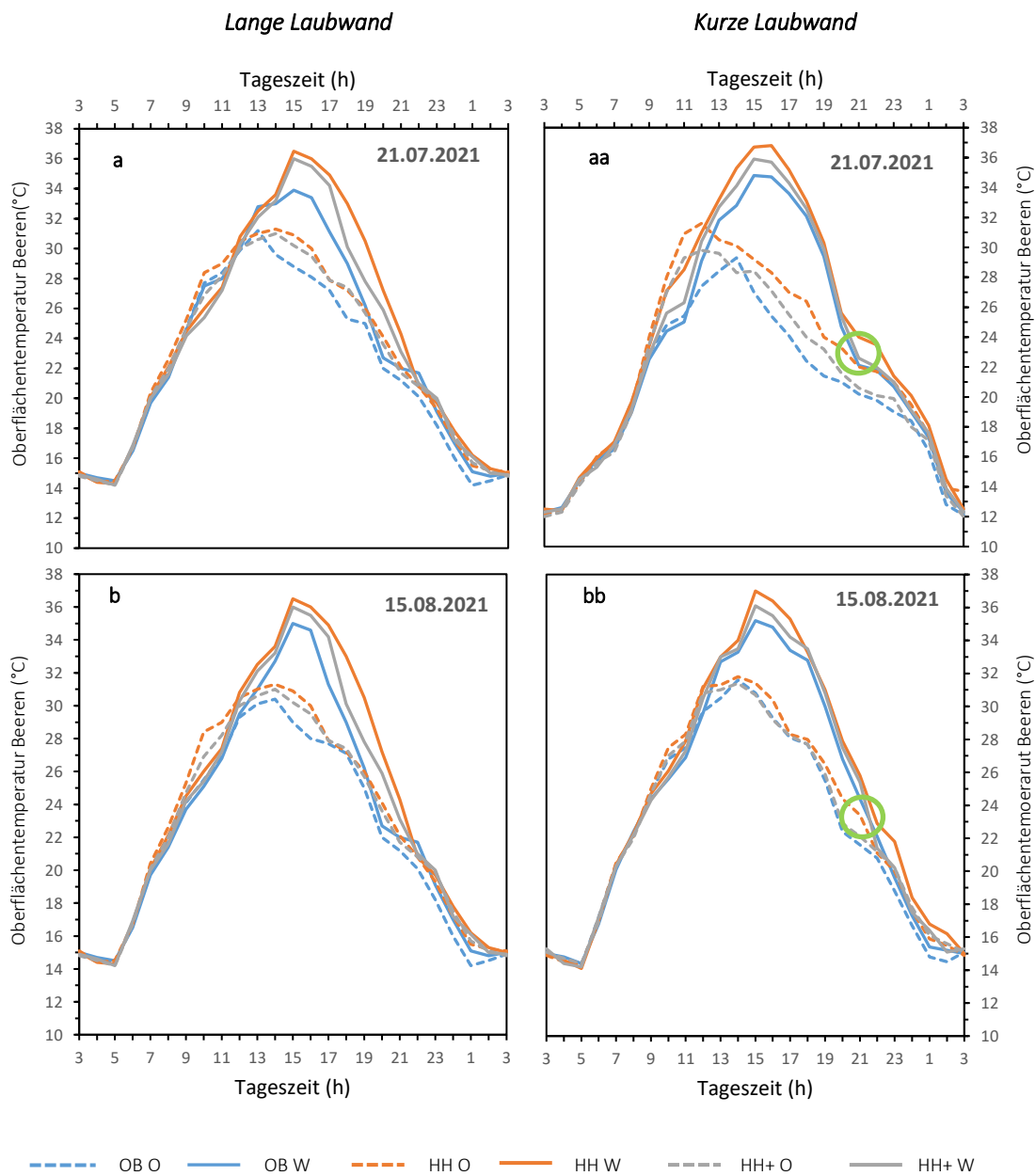


Abbildung 35 Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb) der Oberflächentemperatur der Beeren (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächentemperatur der Beeren (°C) entspricht dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.

15. August 2021

Am 15. August fand eine Vergleichsmessung des Tagesganges der Beerenoberflächentemperaturen statt. Die Ergebnisse in Abbildung 35b-bb zeigen einen nahezu gleichen Linienverlauf der am 21. Juli erhobenen Messdaten. Auf den ersten Blick erscheint die im August durchgeführte Messung verminderte Oberflächentemperaturen aufzuweisen, wobei aber der Schein trügt. Denn im Vergleich zum 21. Juli wurde an diesem Tag beispielsweise eine durchschnittlich stündlich höhere Lufttemperatur von ca. 2,5 K gemessen. Darüber hinaus wurden Tageshöchstwerte zu entsprechenden Uhrzeiten wie folgt erhoben:

Tabelle 5 Maximale Beerenoberflächentemperaturen am 15. August 2021. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+-O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite; Oberflächentemperatur der Beeren besteht aus n = 4 Messwerten.

15.08.2021

Oberflächentemperatur Beeren °C		Uhrzeit		Oberflächentemperatur °C
		14:00 Uhr	15:00 Uhr	
Kurze Laubwand	OB-O	X		31,6 °C
	OB-W		X	35,2 °C
	HH-O	X		31,8 °C
	HH-W		X	37,0 °C
	HH+-O	X		31,4 °C
	HH+-W		X	36,1 °C
Lange Laubwand	OB-O	X		30,4 °C
	OB-W		X	35,0 °C
	HH-O	X		31,3 °C
	HH-W		X	36,5 °C
	HH+-O	X		31,0 °C
	HH+-W		X	36,0 °C

Versuchsjahr 2022

19. Juli 2022

Lange Laubwand

Die am Vormittag besonnten Ostseiten zeigen wie bereits 2021 verringerte oberflächige Beerentemperaturen als ihre am Mittag bis Nachmittag besonnten Westseiten auf. Bis 10:00 Uhr ließen sich bei allen nichtbedeckten Varianten zwischen 1,5 bis 2 K höhere bzw. 2,5 bis 3 K höhere Temperaturwerte als bei ihren benachbarten Westseiten messen (Abbildung 36a). Bereits um 11:00 Uhr zeigten alle am Vormittag bestrahlten Ostlaubwände ihre individuellen Tageshöchsttemperaturen der Beerenoberflächentemperatur auf: OB-O (37 °C), HH-O (37,7 °C), HH+-O (37,1 °C), MB-O (36,9 °C). Maximale Oberflächentemperaturen der Beeren wurden in allen Varianten innerhalb der Westfronten gegen 14:00 Uhr wie folgt ermittelt: OB-W (38,9 °C), HH-W (40,2 °C), HH+-W (38,7 °C), MB-W (39,4 °C). Bis zum Messende sanken alle Beerenoberflächentemperaturen auf ein simultanes Temperaturniveau von 11,1 bis 11,3 °C.

Kurze Laubwand

Für das kurze Blattwerk ergaben sich erste Temperaturdifferenzen bereits um 06:30 Uhr zwischen Ost- und Westseiten jeder Variante. Zur Mittagsstunde, 12:00 Uhr, verzeichneten alle Erhebungsformen ihren oberflächigen Beerentemperaturhöhepunkt: OB-O (36,4 °C), HH-O (37,2 °C), HH+-O (36,4 °C), MB-O (36,6 °C), bevor ein Verringern aller oberflächigen Beerentemperaturen bis 03:00 Uhr auf durchschnittlich 12,9 °C stattfand (Abbildung 36aa). Aufgrund der mittäglich am stärksten bestrahlten Westfronten ereignete sich der Oberflächentemperaturhöhepunkt zuerst in allen nichtbedeckten Unterstockvarianten gegen 14:30 Uhr: OB-W (40,3 °C), HH+-W (40,5 °C), MB-W (40,7 °C). Maximale Oberflächentemperaturwerte wurden in HH eine Stunde verzögert mit 41,5 °C erhoben, was sich allerdings nicht erklären lässt.

Am 04. August 2022 fand eine Tagesmessung mit ebenfalls einer Teiluntersuchung der oberflächigen Beerentemperatur statt. Die in Abbildung 36b-bb gezeigten Tagesgänge bilden den gleichen Effekt wie der die 19. Juli erhobenen Messdaten ab. Die täglich erhobenen Beerenoberflächentemperaturen lagen durchschnittlich 0,5 bis 1 K höher als zur vorherigen Tagesmessung. Die untere Tabelle 6 stellt die jeweiligen Tageshöchstwerte der Beerenhauttemperaturen dar:

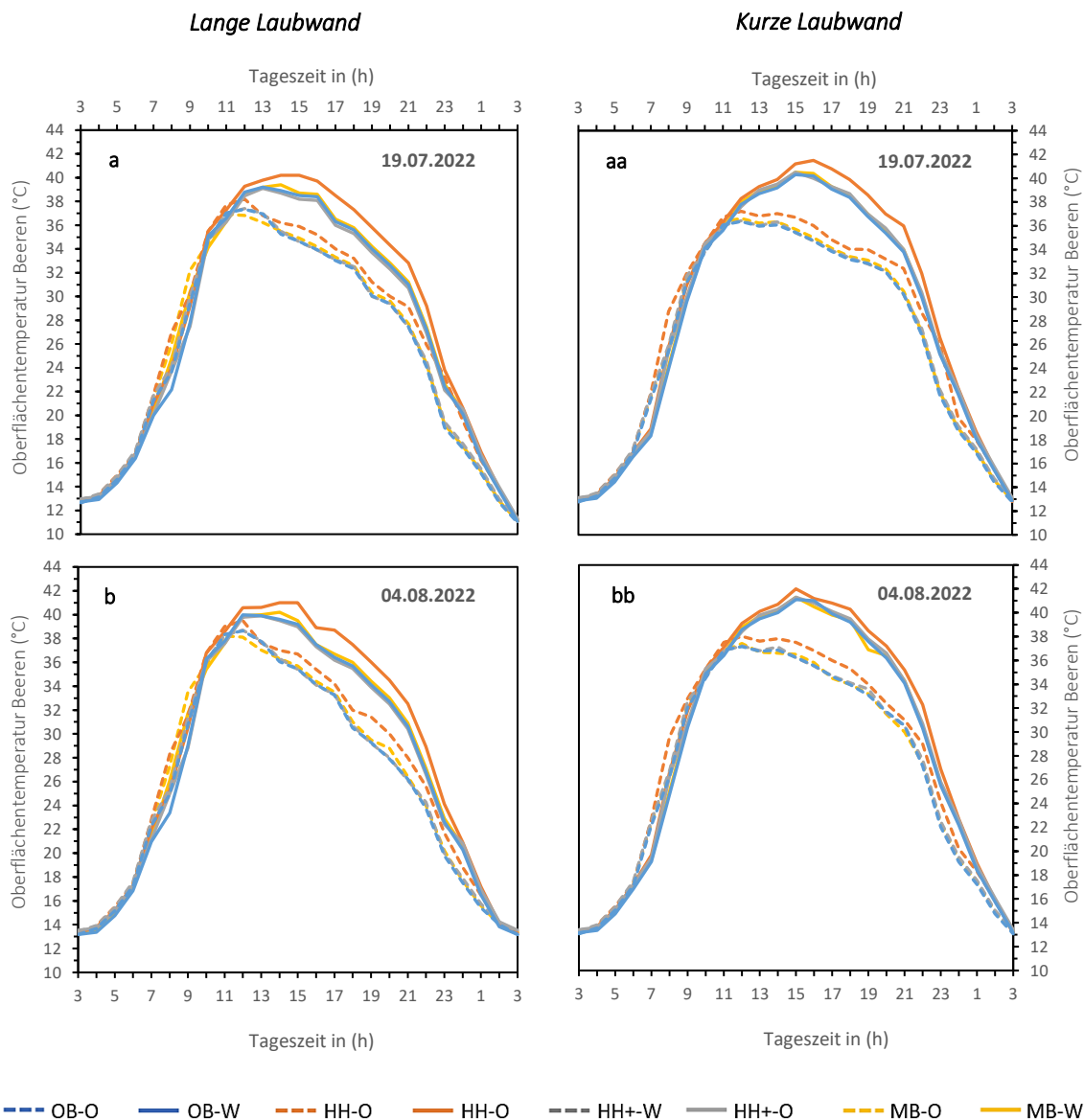


Abbildung 36 Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) der Oberflächenbeerentemperatur (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB) im Versuchsjahr 2022. Oberflächentemperaturen der Beeren (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

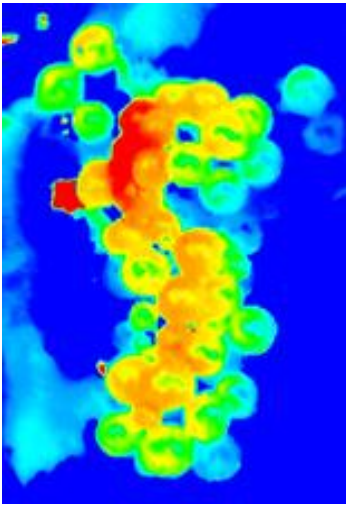
Anhand der unten dargestellten tabellarischen Auflistung wird deutlich, dass eine herkömmliche Laubwand (1,40 m) geringe Oberflächentemperaturwerte zwischen besonnener und nicht besonnener Beeren aufweist. Eine verkürzte Laubwand konnte auch in der zweiten Messkampagne eine erhöhte Beerenhauttemperatur der besonnenen Seiten von bis zu 1,3 K gegenüber der langen Laubwand demonstrieren. Werden individuell die entsprechenden Versuchsvarianten näher betrachtet, so erwies sich HH als die wärmste Methode, was sich auf die ausgebrachten Holzhäcksel im Unterstockbereich zurückführen lässt.

Tabelle 6 Maximale Beerenoberflächentemperaturen am 04. August 2022. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+-O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite; Oberflächentemperatur der Beeren besteht aus n = 4 Messwerten.

04.08.2022		Oberflächentemperatur der Beeren °C			Oberflächentemperatur °C		
		Uhrzeit					
		12:00 Uhr	13:00 Uhr	15:00 Uhr			
Kurze Laubwand	OB-O		X		38,2 °C		
	OB-W			X	41,1 °C		
	HH-O		X		38,0 °C		
	HH-W			X	42,0 °C		
	HH+-O		X		37,2 °C		
	HH+-W			X	41,3 °C		
	MB-O		X		37,4 °C		
	MB-W			X	41,3 °C		
Lange Laubwand	OB-O	X			38,6 °C		
	OB-W		X		40,0 °C		
	HH-O	X			39,5 °C		
	HH-W		X		41,0 °C		
	HH+-O	X			38,7 °C		
	HH+-W		X		39,9 °C		
	MB-O	X			38,2 °C		
	MB-W		X		40,2 °C		

Mit der nun folgenden Abbildung 37 lassen sich die vorherigen Disparitäten, speziell für HH und OB, seitens der jeweiligen Erhebungsformen nochmals visuell bestätigen. Innerhalb dieser Abbildung werden deutlich erhöhte Beerenoberflächentemperaturen in HH als in der gegenübergestellten Variante OB ersichtlich. Beide Infrarotbilder wurden an besonnten Trauben vollzogen. An diesem Erhebungstag lag die Beerenhauttemperatur bei rund 40 °C, wohingegen in HH Beerenoberflächentemperaturen von ca. 42 °C vorherrschten. Durchschnittliche Temperaturerhöhungen von 2 K in HH lassen sich aus dieser Bilddokumentation entnehmen.

*Unterstockbedeckung
(HH)*



*Keine Unterstockbedeckung (OB/MB/HH+),
hier OB*

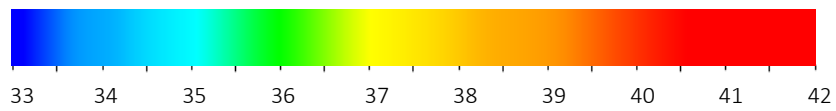
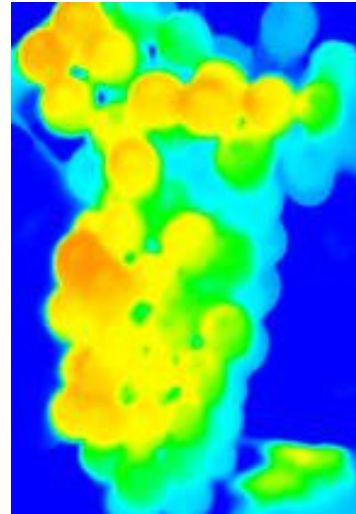


Abbildung 37 Beerenhauttemperaturen, Bodenbedeckung versus nichtbedeckte Varianten im Unterstockbereich, Infrarotaufnahme und Originalbild gegen 15:00 Uhr, Pfeddersheim 25. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].

Alle Untersuchungsformen der am Mittag bis Nachmittag besonnten kurzen Laubwände (West) erzielten minimal gesteigerte Höchstwerte der Beerenschalentemperatur im Vergleich zur langen Laubwand. Dies lässt sich auf das Nichtentblättern der kurzen Laubwände zurückführen, wodurch einerseits eine erhöhte Beschattung in der Traubenzone stattfindet andererseits auch ein gleichzeitiges Emporsteigen der Beeren-temperatur mehr Zeit benötigt. Aufgrund dessen dient in allen kurzen Laubwänden das Rebenblatt unmittelbar vor/über der Beere als Sonnenschirm, weshalb sich die Traubenzone verlangsamt erwärmt und auskühlt. Zusätzlich sorgen die Rebenblätter für einen erschwerten Luftaustausch innerhalb der Laubwand, was eine verstärkte Erwärmung der Luft „hinter“ den Blättern mit sich bringt. Stauwärme entsteht. Zudem befeuert eine verfrühte bzw. verlängerte Bestrahlung der Sonne in den Morgen- und Abendstunden den Erwärmungseffekt der kurzen Laubwände. Grund ist hierfür der größere aus zeitlicher Sicht gesehene längere Einfallwinkel des Sonnenlichtes als in normaler Laublänge.

Als Gegenstück hierzu dienen alle langen Laubwände. Jede Traubenzone wurde entblättert, weshalb eine schnelle Erwärmung und Abkühlung der Traubenzone durch eine verbesserte Durchlüftung der Beeren vonstattengehen kann. Dies lässt sich bspw. anhand der am Vormittag besonnten Beeren, welche rascher ihre oberflächige Maximalbeerentemperaturen inmitten der 1,40 m Laubfronten erreichten, belegen (Tabelle 6). In Hitzejahren wie 2022 kann in entblätterten Varianten die Gefahr von Sonnenbrandschäden ansteigen. Außerdem kann festgehalten werden, dass eine Unterstockbedeckung gesteigerte Beerenhauttemperaturen resultieren lässt, was sich mit der erhöhten Rückstrahlung der Holzhäcksel im Unterstockbereich begründen lässt. Diese findet ihren direkten und kürzesten Weg im Beeren- und Blattbereich wieder, weshalb dieser Erwärmungseffekt nicht in einer flächendeckenden Form (HH+) bzw. der Kontrollvariante (OB) vorzufinden ist.

5.6.3 Oberflächentemperatur: Rebblatt

Versuchsjahr 2021

21. Juli 2021

Lange Laubwand

Im Vergleich zur oberflächigen Beerentemperatur herrscht ein umgekehrtes Abbild des Blatttemperaturverlaufs vom 21. Juli 2021 vor. Sowohl in allen langen und kurzen Laubwandvarianten wurden für Ost- und Westseiten niedrigere Blattoberflächentemperaturen in HH/HH+ als in OB gemessen. Innerhalb der langen Laubwände wurden bis 08:00 Uhr nahezu gleich ansteigende Oberflächentemperaturen des Blattes erfasst (Abbildung 38a). Bereits um 14:00 Uhr wurden in OB-O (31,2 °C), HH-O (27,9 °C) und HH+-O (28,3 °C) das Maximum der oberflächigen Blathtagestemperatur bestimmt. Gegen 19:00 Uhr begann in HH-O (19,4 °C), HH+-O (19,6 °C), um 19:30 Uhr in OB-O (19,5 °C) ein langsames Abflachen der Temperaturwerte bis 03:00 Uhr.

Für das Laubwerk der Westseiten erfolgte das Erreichen der maximalen Blattoberflächentemperatur erst gegen 15:00 Uhr: OB-W (35,1 °C), HH-W (34,2 °C) und HH+-W (33,8 °C), ehe sich ein Temperaturniedergang abzeichnete. Mit Beginn der Abendstunden (20:00 Uhr) reduzierten sich in HH-W (18,2 °C) und HH+-W (18,1 °C) bzw. um 21:00 Uhr in OB-W (21 °C) die Blattoberflächentemperaturen kleinschrittiger bis zum Messende auf ein Oberflächentemperaturniveau von 13-14 °C.

Kurze Laubwand

Mit Beginn der Messungen um 03:00 Uhr bis 06:00 Uhr in den Morgenstunden wurden in allen kurzen Laubfronten annähernd gleiche Oberflächentemperaturen von 15,1 °C ermittelt (Abbildung 38aa), bevor ein erster Anstieg der oberflächigen Rebblatttemperatur bis 10:00 Uhr erkennbar war. Um 14:30 Uhr wurden in HH+-O Tageshöchstwerte der oberflächigen Rebblatttemperatur von 29 °C gemessen. Gegen 15:00 Uhr zeigten OB-O mit 34,5 °C, HH-O 29,2 °C ihre Tageshöchsttemperaturen der sich in der Traubenzone befindenden Blätter auf, welche ab diesem Zeitpunkt bis zur Beendigung der 24h Messphase sanken. Ein erstes verlangsamtes Abflachen dieser Oberflächentemperatur wurde um 18:00 in HH-O (19,7 °C), gefolgt von einer zweistündigen Verzögerung gegen 20:00 Uhr in HH+-O (18,9 °C) und OB-O (19,6 °C) erhoben. Das Maximum der Blattoberflächentemperatur in den besonnten Westseiten wurde in OB-W (35,8 °C) gegen 16:00, HH-W (35 °C) und HH+-W (34 °C) um 15:00 Uhr erhoben. Reduzierungen der Oberflächentemperaturen der Rebblätter wurden um 21:00 Uhr HH-W (18,8 °C), HH+-W (19,1 °C) und OB-W (20,1 °C) erfasst. Bis zum Messende nahm jede Variante durchschnittlich um 20 % (± 2 %) ihrer Blattoberflächentemperatur ab (Abbildung 38aa).

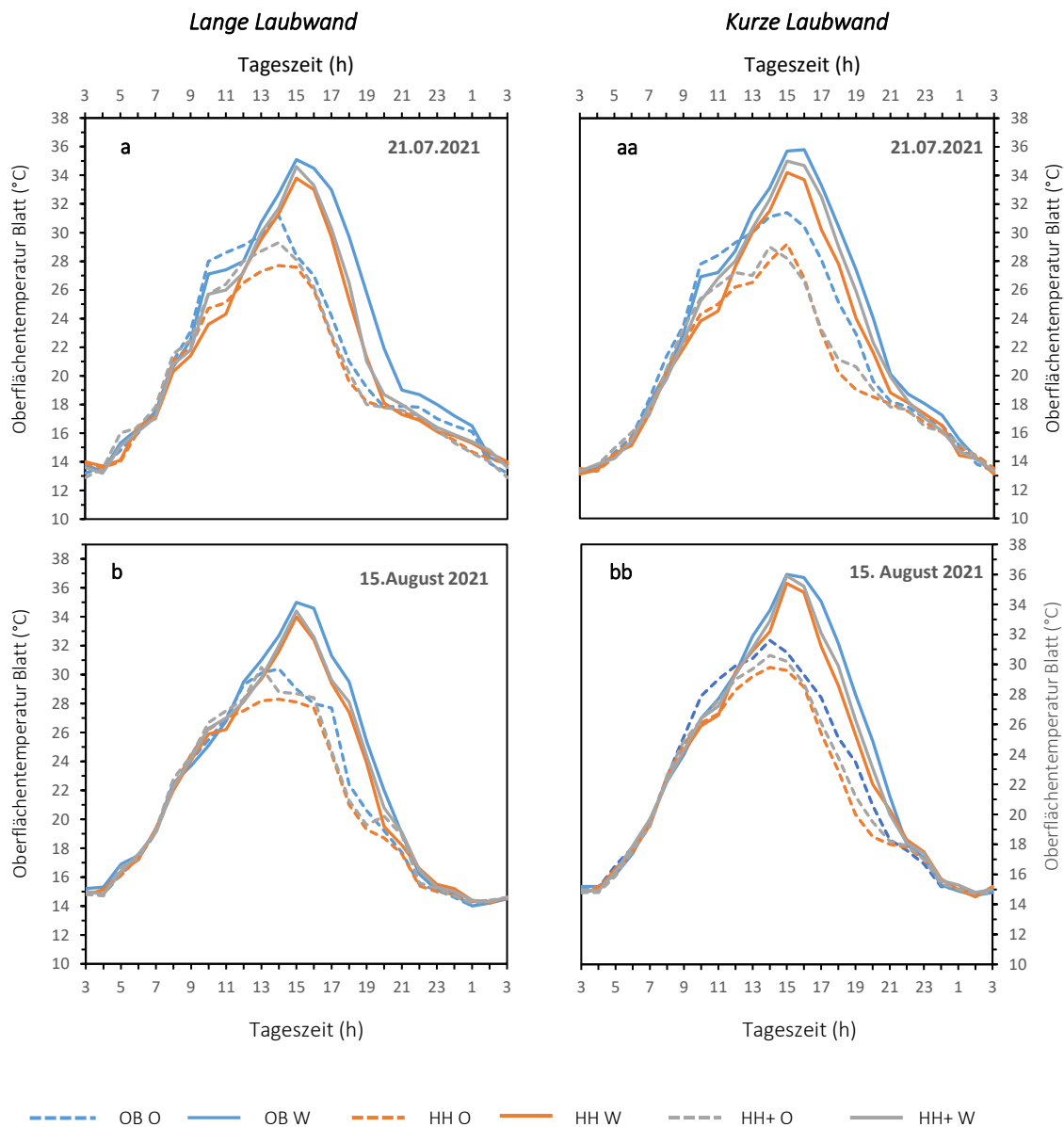


Abbildung 38 Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb) der Oberflächentemperatur des Blattes (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächige Blatttemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.

15. August

An diesem Messtag waren gesteigerte Blattoberflächentemperaturen von ca. 1,4 K durch höhere Lufttemperaturen gegenüber der am 21. Juli durchgeführten Messung erreicht worden. Tageshöchstwerte der Blattoberflächentemperatur wurden konstant in OB sowohl für das längere als auch kurze Blattwerk festgestellt. Sowohl eine Unterstock- als auch flächendeckende Abdeckung zeigen reduziertere Oberflächentemperaturen der Blätter auf als die der Kontrollvariante, was auf einen verbesserten Wasserhaushalt schließen lässt.

Tabelle 7 Maximale Blattoberflächentemperaturen am 15. August 2021. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bewässerung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+-O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite, Oberflächentemperaturen der Blätter bestehen aus n = 4 Messwerten.

15.08.2021

Oberflächentemperatur des Blattes °C		Uhrzeit			Oberflächentemperatur °C
		13:30 Uhr	14:00 Uhr	15:00 Uhr	
Kurze Laubwand	OB-O		X		30,6 °C
	OB-W			X	35,9 °C
	HH-O		X		29,8 °C
	HH-W			X	35,4 °C
	HH+-O	X			30,5 °C
	HH+-W			X	35,2 °C
Lange Laubwand	OB-O		X		30,4 °C
	OB-W			X	35,0 °C
	HH-O		X		28,3 °C
	HH-W			X	34,0 °C
	HH+-O	X			30,5 °C
	HH+-W			X	34,4 °C

Versuchsjahr 2022

19. Juli 2022

Lange Laubwand

Beide Laubwandvarianten zeigten 2022 für Ost- und Westlaubwände verringerte Blattoberflächentemperaturen in beiden mit Holzhäcksel bedeckten sowie auch in der bewässerten Variante auf. Mit Beginn der Messungen bis 06:00 Uhr stellen alle Westfronten, außer OB, die niedrigsten Oberflächentemperaturen dar. Von 06:00 bis 08:00 Uhr erwärmten sich alle Ostseiten um ca. 1,5 K höher als ihre benachbarten Westseiten (Abbildung 39a). Ab 10:00 Uhr zeigten die am Vormittag besonnten Ostlaubwände einen deutlichen Temperaturunterschied, welcher sich gegen 14:00 Uhr mit dem Erreichen der Tageshöchsttemperatur der Blätter bestimmen ließ: OB-O (36,4 °C), HH-O (34,7 °C) und HH+-O (35,2 °C), MB-O (34,6 °C). Um 17:00 Uhr herrschte nochmals eine einstündige Stagnation der oberflächigen Blatttemperaturen aller Erhebungsformen vor. Mit Erreichen des frühen Abends (18:00 Uhr) fielen alle Blattoberflächentemperaturen rapide bis 23:00 Uhr ab. Von nun an nahmen alle Laubwände einen fast gleichen stufenartigen Temperaturverlauf, was sich in einem „Endtemperaturbereich“ von 14,6 bis 14,9 °C widerspiegelte. Der Höhepunkt der Blattoberflächentemperaturen innerhalb aller Westfronten konstatierte sich gegen 15:30 Uhr in OB-W (41 °C) bzw. um 16:30 Uhr in HH-W (39,5 °C), HH+-W (39,6 °C), MB-W (39,3 °C), ehe sich ein Temperaturniedergang abzeichnete. Während in OB ab 19:00 Uhr ein rapider Temperaturabfall der Rebenblätter ermittelt wurde, zeigten HH, HH+ und MB zeitgleich einen lindernden Verlauf. Ein Anpassen aller Versuchsformen zwischen Ost- und Westfronten ging bis zum Messende vonstatten (Abbildung 39a)

Kurze Laubwand

Ein durchaus übereinstimmender Temperaturverlauf wurde wie zuvor in den 1,40 m hohen Rebzeilen für alle verkürzten Laubfronten bis zum Tageshöchstwert der oberflächigen Blatttemperaturen ermittelt (Abbildung 39aa). Der primäre Unterschied liegt allerdings in dem höher angesiedelten Oberflächentemperaturniveau von 0,3 bis 0,5 K der halbierten Rebgassen gegenüber der 1,40 m hohen Rebzeilen der Ostseiten. Um 12:00 Uhr erzielten OB-O mit 37,3 °C, HH-O mit 35,6 °C, HH+-O mit 35,5 °C. MB-O erreichte erst gegen 15:00 Uhr ihren oberflächigen Temperaturhöhepunkt mit 35,2 °C. Ein auffällig steiles Abflachen der Oberflächentemperaturen wurde um 19:00 Uhr in allen Versuchsformen erhoben. Von 23:00 Uhr bis zum Messende verliefen alle Versuchsformen hinsichtlich Ost- und Westlaubwände gleich und endeten mit einem durchschnittlichen Oberflächentemperaturwert von ca. 15 °C.

Mit Blick auf die ebenfalls an diesem Tag erfassten Westseiten zeigte sich ein gleichartiges Geschehen innerhalb dieser Blattfronten wie bereits in den zuvor dargestellten langen Rebgassen. Was für das bereits erwähnte höhere Oberflächentemperaturniveau der Ostwände galt, ereignete sich auch inmitten der vom Westen aus bestrahlten Laubwänden von 0,3-0,5 K gegenüber der 1,40 m hohen Westseiten. Das Temperaturoptimum lag an diesem Tag in OB-W (41,6 °C) gegen 17:00 bzw. HH-W (39,5 °C), HH+-W (39,6 °C) und

MB-W (39,1 °C) um 16:00 Uhr vor. Mit fortschreitender Abendstunde sanken alle oberflächigen Blatttemperaturen stetig ab. Gegen 23:00 Uhr wurde ein gemeinsamer Verlauf aller Ost- und Westseiten bis zum Messende von durchschnittlich 14,7 °C erreicht (Abbildung 39aa).

19. Juli und 04. August

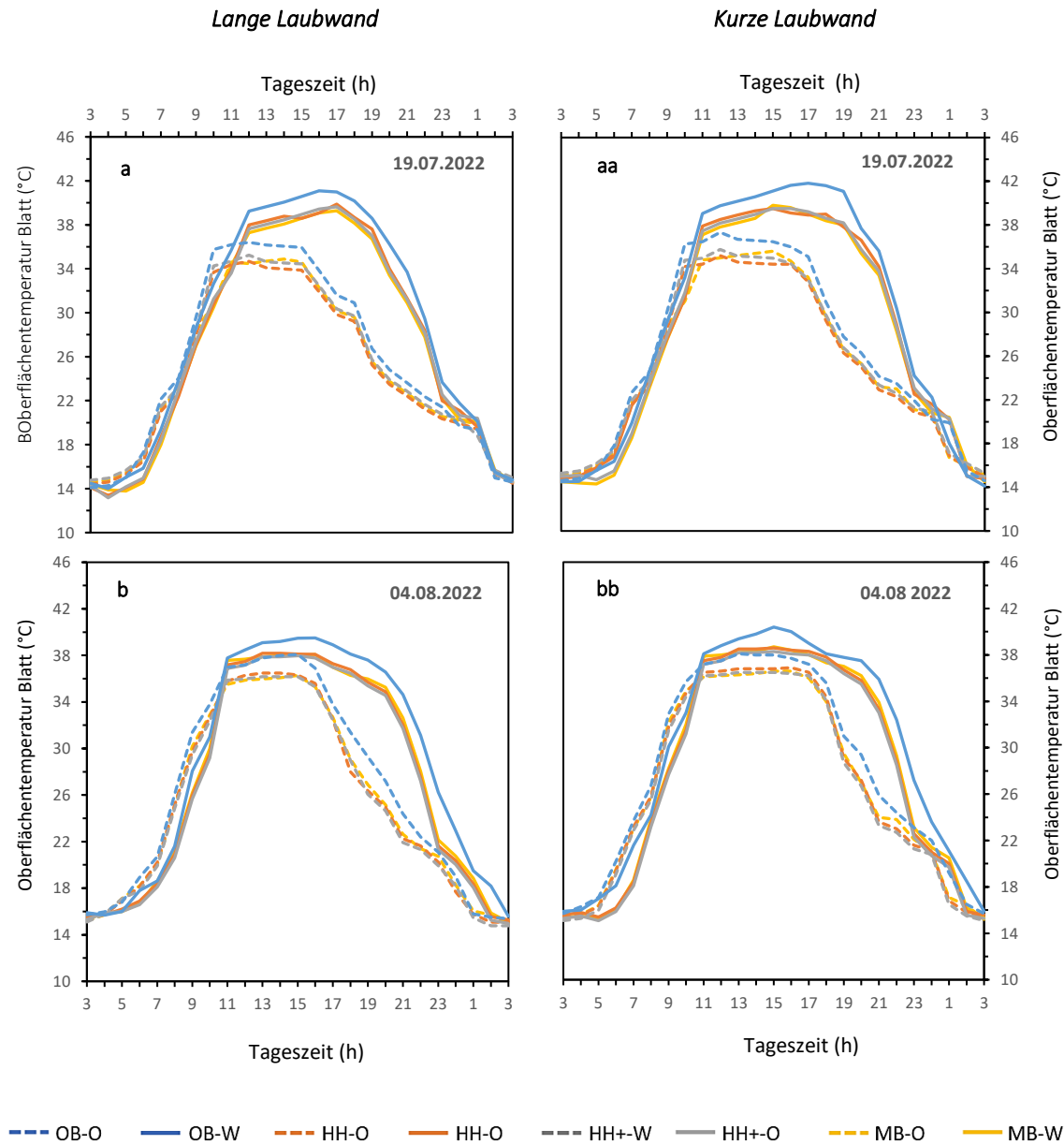


Abbildung 39 Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) der Oberflächentemperatur des Blattes (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderater Bewässerung (MB). Oberflächige Blatttemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.

Die Anfang August durchgeführte Vergleichsmessung erbrachte den gleichen Effekt einer bedeckten bzw. gezielten Bewässerung gegenüber der Kontrolle hinsichtlich der Blattoberflächentemperaturen (39b-bb). Am 04. August wurden verringerte Oberflächentemperaturen von 1,5 K bis zu maximal 2 K im Vergleich zur Tagesmessung am 19. Juli ermittelt. OB zeigte in beiden Laubwandlängen Höchstwerte in Punkto Blattoberflächentemperatur. Individuelle Temperaturspitzenwerte lassen sich zur entsprechenden Tageszeit entnehmen.

04. August

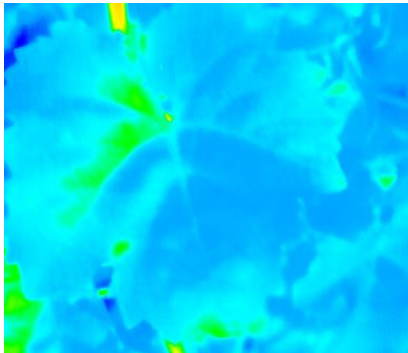
Table 8 Maximale Blattoberflächentemperatur am 04. August 2022. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bewässerung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH+-O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckende Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite, Oberflächentemperatur der Blätter bestehen aus n = 4 Messwerten.

04.08.2022		Oberflächentemperatur des Blattes °C			Uhrzeit		Oberflächentemperatur °C	
		13:00 Uhr	14:00 Uhr	15:00 Uhr				
Kurze Laubwand	OB-O	X					38,1 °C	
	OB-W			X			40,4 °C	
	HH-O	X					36,8 °C	
	HH-W			X			38,6 °C	
	HH+-O	X					36,6 °C	
	HH+-W			X			38,3 °C	
	MB-O		X				36,6 °C	
	MB-W			X			38,7 °C	
Lange Laubwand	OB-O		X				38,0 °C	
	OB-W			X			39,5 °C	
	HH-O	X					36,5 °C	
	HH-W		X				38,2 °C	
	HH+-O	X					36,2 °C	
	HH+-W			X			38,0 °C	
	MB-O		X				36,3 °C	
	MB-W		X				38,0 °C	

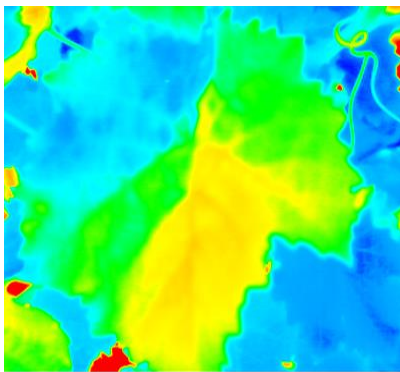
In der nun folgenden Abbildung 40 ist beispielhaft für MB, HH und OB die Differenzierung der Oberflächentemperatur des Rebblattes vom 23. August 2022 gegen 15:00 Uhr mittels Infrarotbild aufgezeigt. Wie auf den Teilbildern chronologisch (verringerte bis stark erhöhte Blattoberflächentemperaturen) zu erkennen ist, zeigt Variante MB die niedrigsten, ansteigend in HH und letztlich die höchsten Oberflächentemperaturen in OB auf. Resultierend aus diesem Temperaturanstieg ergibt sich ein verminderter Blattkühlungseffekt, welcher in OB deutlich zu erkennen ist. In HH sind erste Wasserstresssymptome in Form von oberflächigen Temperaturanstiegen zu verzeichnen. Dies lässt sich mit den zu diesem Zeitpunkt ermittelten Blattwasserpotential- und Bodenfeuchte-

werten belegen, was den Wasserstress Ende August inmitten der Versuchsform HH bestätigte (Kapitel 5.2 und 5.4).

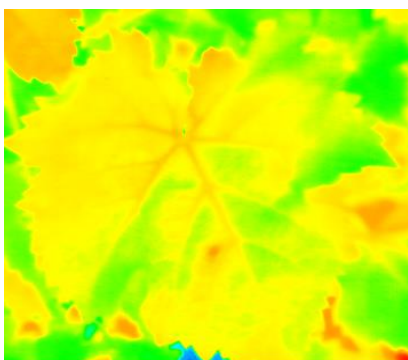
Besonnte Rebenblätter



Variante MB



Variante HH



Variante OB

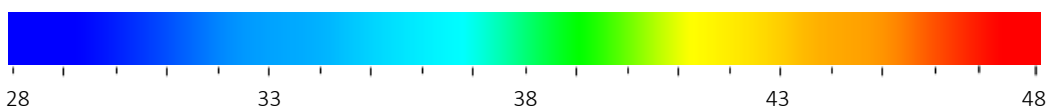


Abbildung 40 Oberflächentemperatur der Blätter; hier kurze Laubwand, Bodenbedeckung versus nichtbedeckte Varianten, Infrarotaufnahme und Originalbild, 15:00 Uhr, Pfeddersheim 23. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].

Mittels dieser Erhebung der oberflächigen Blatttemperaturen kann aufgezeigt werden, dass eine vorhandene Unterstockbedeckung durch Holzhäcksel geringere Blattoberflächentemperaturen als in OB-Rebzeilen aufweist. Dies lässt sich auf eine verbesserte Wasserversorgung zurückführen (Kapitel 5.2). Im direkten Vergleich zwischen HH und MB kann festgehalten werden, dass HH der MB-Form in Sachen Oberflächentemperatur-Rebblatt standhalten kann. Insofern kann unter sommerlichen Witterungsverhältnissen eine Bodenbedeckung in 2021 und 2022 zusätzlich eine erhöhte Transpiration gewährleisten, wodurch zeitgleich ein simultaner Kühlungseffekt dem Blattwerk zu Gute kommt, was sich schlussendlich in der herabgesetzten Blattoberflächentemperatur widerspiegelt (Abbildung 38-40).

5.7 Lufttemperatur innerhalb der Laubwand

Oberflächige Beeren-, Blatt- und Bodentemperaturen einer Unterstockabdeckung waren sowohl mit positiven als auch negativen Teilergebnissen behaftet. Erhöhte Beeren-, verringerte Blatt- und Bodenoberflächentemperaturen wurden erfasst, wohingegen die Messung der maximalen Lufttemperatur innerhalb der Laubwand, Nähe Traubenzone, ermittelt wurde.

Sowohl am 21. Juli als auch 15. August wurden in allen langen Laubwänden durchschnittlich ca. 2 K verringerte Lufttemperaturen in Traubenzonennähe als in kurzer Laubwand ermittelt.

Versuchsjahr 2021

Lange Laubwand

Gegen 15:00 Uhr wurden sowohl am 21. Juli maximale Lufttemperaturen inmitten der Beerenzone OB (28,8 °C), HH (29,3 °C), HH+ (29 °C) als auch am 15. August für OB (29,5 °C), HH (30,1 °C) und HH+ (29,9 °C) erfasst (Abbildung 41a+b). An beiden Messtagen fand der größte Lufttemperaturanstieg zwischen 09:00 und 10:00 Uhr von durchschnittlich 4 bis 4,4 °C am 21. Juli bzw. am 15. August mit ca. 2,5 bis 2,8 °C statt. Am späten Nachmittag, 17:00-18:00 Uhr, war ein Absinken von 3,5 bis 4 °C (21. Juli) und 4,4 °C bis 4,9 °C (15. August) in allen Versuchsformen erhoben worden.

An beiden Erhebungstagen wurde durchweg eine erhöhte Lufttemperatur in Nähe der Traubenzone in abgedeckten Varianten (HH und HH+) bestimmt, wobei HH hierbei nochmals eine minimale Temperatursteigerung von 1,5 K vorweist. Rasches Abkühlen in den nächtlichen und morgendlichen Stunden (03:00 bis 06:00 Uhr) resultierte in allen Varianten mit nahezu gleichen Lufttemperaturen innerhalb der Laubwand.

Kurze Laubwand

Ein leicht veränderter Lufttemperaturverlauf wurde für alle eingekürzten Fronten eruiert. Um 16:00 Uhr wurde am 21. Juli ein Höchstwert der Lufttemperatur in OB (29,4 °C), HH (30,8 °C), HH+ (30,5 °C), am 15. August für die Formen OB (31 °C), HH (32,7 °C) und HH+ (32,1 °C) bestimmt (Abbildung 41aa + bb). Anders als in allen 1,40 m langen Erhebungsformen wurde der größte Temperaturanstieg am 21. Juni mit ca. 3 bis 3,2 °C und 15. August mit 3,6 bis 4 °C bereits zwischen 05:00 Uhr und 06:00 Uhr gemessen. Ab diesem Zeitpunkt stiegen in OB, HH und HH+ die Lufttemperaturen der inneren Laubwand linear an, bevor sie am Nachmittag einen gleichen, allerdings negativ linearen Verlauf vollzogen (Abbildung 41aa+bb). Holzhäcksel sowohl im Unterstockbereich als auch flächendeckend sorgten innerhalb der 0,70 m hohen Rebzeilen für höhere Lufttemperaturwerte als in der Kontrollvariante (OB).

21. Juli und 15. August 2021

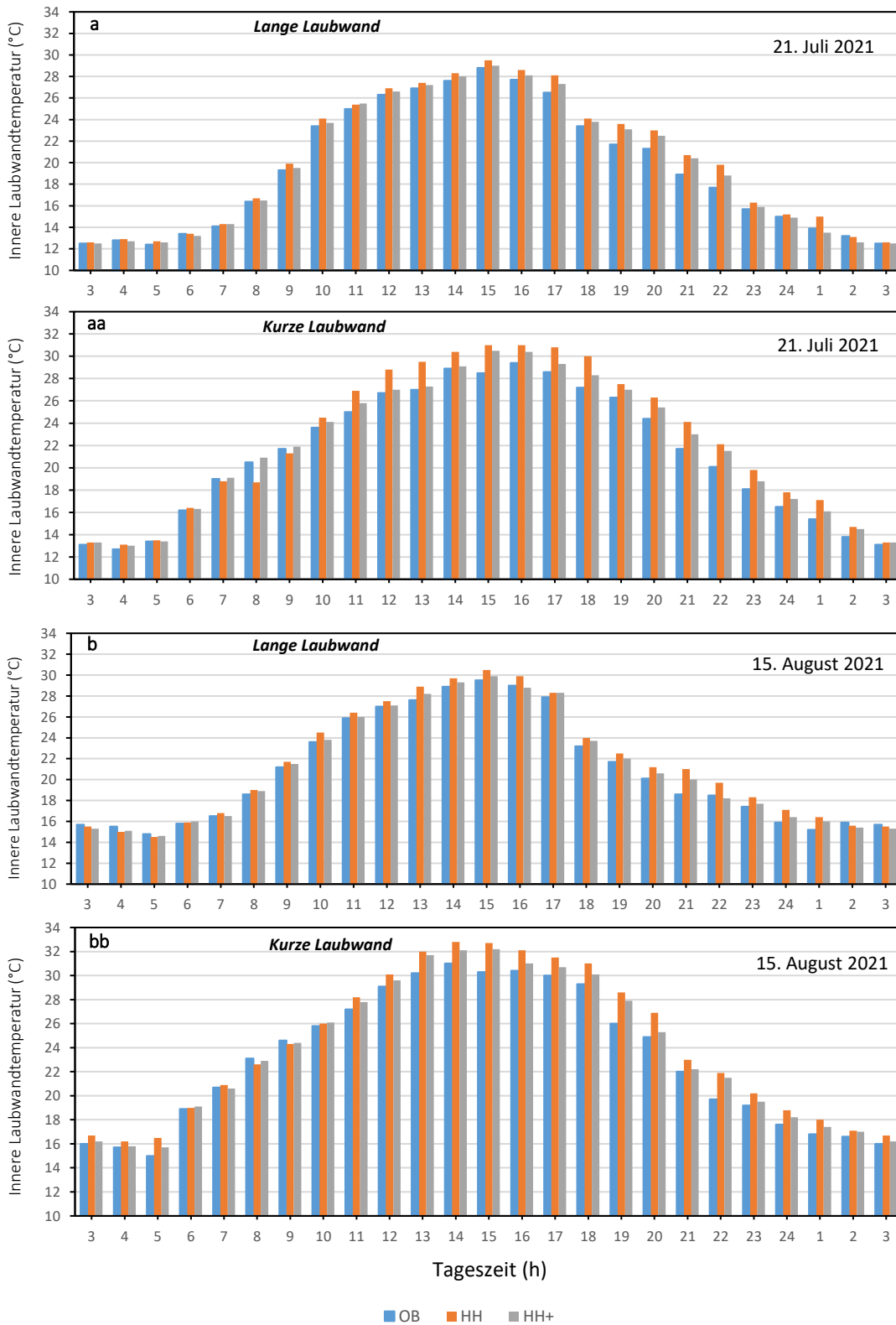


Abbildung 41 Tagesgang der inneren Lufttemperatur (°C) der Laubwand am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+). Innere Lufttemperaturen der Laubwand (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.

Versuchsjahr 2022

Lange Laubwand

An der ersten und zweiten Tagesmessung 2022 wurden maximale Lufttemperaturen für das lange Blattwerk gegen 16:00 Uhr in OB (37,8 °C), HH (38,5 °C), HH+ (38,0 °C), MB (37,7 °C) bzw. am zweiten Messtermin in OB (40,0 °C), HH (40,6 °C), HH+ (39,8 °C), MB (40,0 °C) gemessen, so Abbildung 42a+b. An beiden Erhebungstagen fand ein Ansteigen der inneren Laubwandtemperaturen von 3 bis 3,3 °C zwischen 08:00 und 09:00 Uhr statt.

Insbesondere am zweiten Messtag, dem 04. August, ereignete sich zwischen 12:00 und 13:00 Uhr ein nochmaliges Ansteigen von durchschnittlich 3 °C jeder Versuchsvariante. Ein rasches Temperatursenken fand einerseits am 19. Juli zwischen 19:00 und 20:00 Uhr mit 4 bis 4,5 °C bzw. am 04. August um eine Stunde verfrüht zwischen 18:00 und 19:00 Uhr mit 3,9 bis 4,2 °C. Beide mit Holzhäcksel bedeckten Varianten (HH und HH+) zeigten an beiden Tagesmessungen eine erhöhte innere Lufttemperatur der jeweiligen Laubwände. HH erwies sich hierbei als Temperaturspitzenreiter. MB zeigte durchweg minierte Lufttemperaturen innerhalb der Laubwandstrukturen.

Kurze Laubwand

Das verkürzte Blattwerk zeigte im Vergleich zur langen Laubwand ein leicht verändertes Verlaufsbild auf. Um 17:00 wurde am 19. Juli der Tageshöchstwert der Lufttemperatur inmitten der Laubwand in OB (38,6 °C), HH (39,3 °C), HH+ (38,7 °C), MB (38,5 °C), am 04. August für OB (41,4 °C), HH (41,8 °C) HH+ (41,2 °C) und MB (41,5 °C) bestimmt (Abbildung 42aa+bb). Ein „Temperatursprung“ geschah im Vergleich zur langen Laubwand erst gegen 10:30 Uhr an beiden Messtagen zwischen 3,3 und 3,6 °C. Alle kurzen Laubfronten speicherten ihre inneren Laubwandtemperaturen länger als die zuvor dargestellten 1,40 m hohen Fronten. Dies macht sich ebenfalls auch in dem am Abend verspäteten Absinken der Luft-Laubwandtemperaturen bemerkbar, welches am 19. Juli zwischen 20:00 und 21:00 Uhr am stärksten mit durchschnittlich 3,5 °C bzw. am 04. August zwischen 19:30 und 20:30 Uhr mit einem errechneten Mittelwert von 3,9 °C jeder Varianten gemessen wurde (Abbildung 42aa+bb). Holzhäcksel sowohl im Unterstockbereich als auch flächendeckend sorgten innerhalb der 0,70 m hohen Rebzeilen für höhere Lufttemperaturen als in der Kontrollvariante (OB) und der moderaten Bewässerung (MB).

19. Juli und 04. August 2022

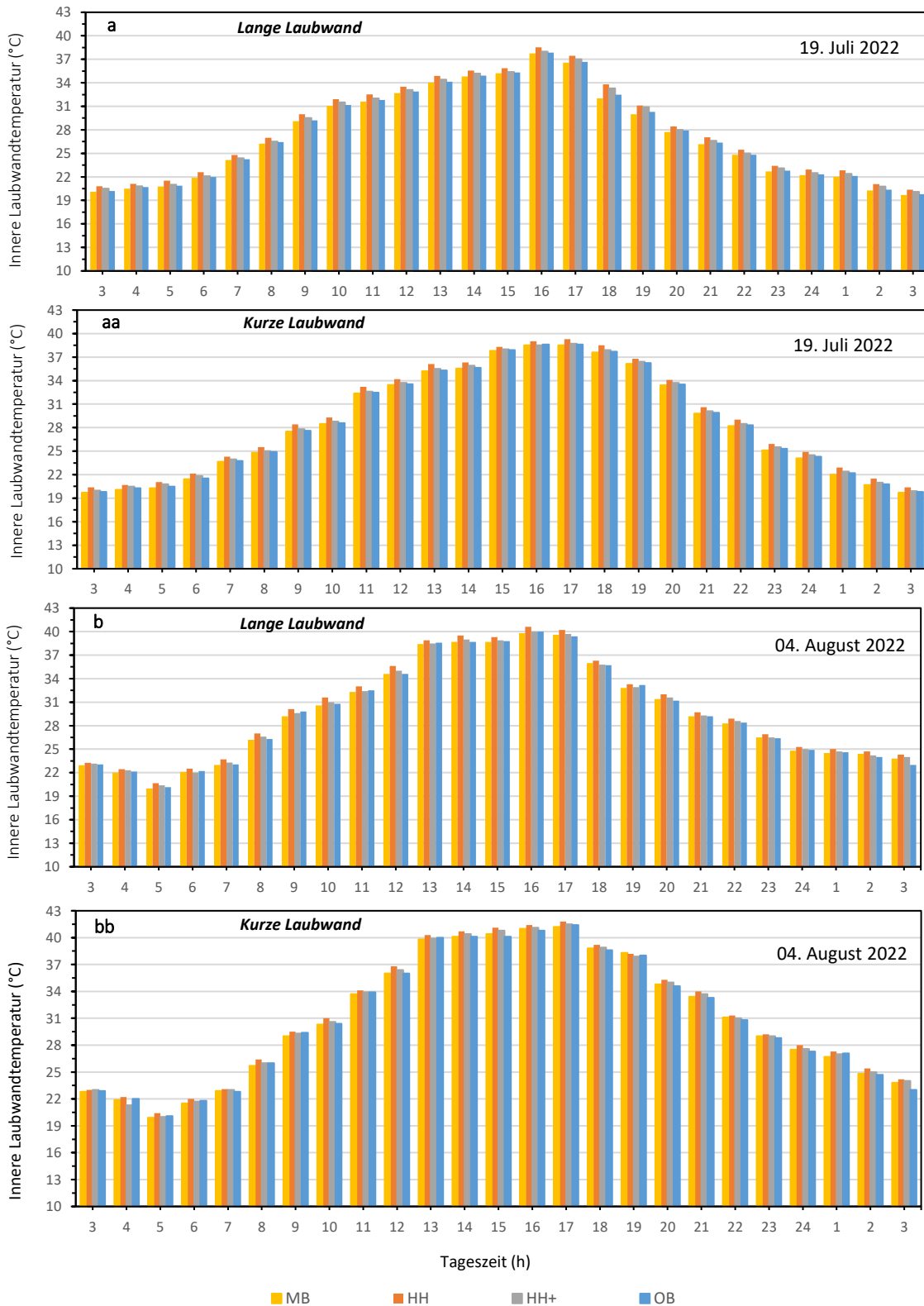


Abbildung 42 Tagesgang der inneren Lufttemperatur (°C) der Laubwand am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB). Innere Lufttemperaturen der Laubwand (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.

Erhöhte Lufttemperaturen inmitten der Laubwand (Beerenzone) wurden in HH/HH+ in langer als auch kurzer Form im Vergleich zu OB und MB gemessen. Ein möglicher Grund stellt für HH eine erhöhte Albedo durch Holzhäcksel im Unterstockbereich dar, was sich in einer gesteigerten Rückstrahlung und folglich in vermehrter Wärmestrahlung inmitten der Traubenzone niederschlägt.

Der Kühlungseffekt, welcher durch verringerte Blattoberflächentemperaturen in HH und HH+ stattfand (s. Kapitel 5.6.3), hat letzten Endes keinen nachhaltigen Effekt in Bezug auf die örtlichen Trauben erzeugt, da innere Lufttemperaturen der Laubwände in beiden oben genannten Erhebungsformen gegenüber MB erhöht waren (Abbildung 41+42).

Aufgrund der 0,70 m- Laubwände wurden verfrühte maximale Temperaturanstiege der Luft gegenüber der 1,40 m- Rebzeilen ermittelt, was sich auf eine verringerte Laubwandhöhe zurückführen lässt und demzufolge ein frühzeitiges Bestrahlen der Laubfront ermöglicht. Allerdings bringt hierbei das Nichtentblättern der Traubenzone eine Art Staubbildung der sich erwärmenden inneren Lufttemperatur der Laubwand mit sich, was letzten Endes ein höheres Lufttemperaturniveau widerspiegelt.

5.8 Photosynthetisch aktive Strahlung „aus dem Unterstockbereich“

Aufgrund der zuvor erhöhten Oberflächentemperaturen innerhalb der Variante HH wurden im Jahr 2022 photosynthetisch aktive Strahlungsmessungen in allen Unterstockbereichen von OB, HH, HH+ und MB durchgeführt. Aufgrund der übereinstimmenden Messergebnisse für alle nicht im Unterstockbereich bedeckten Versuchsformen wurde sich randomisierend für OB entschieden. Es soll Aufschluss über mögliche Beziehungsgefüge einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich und der daraus resultierenden Beeren- und inneren Laubwandtemperaturen geben.

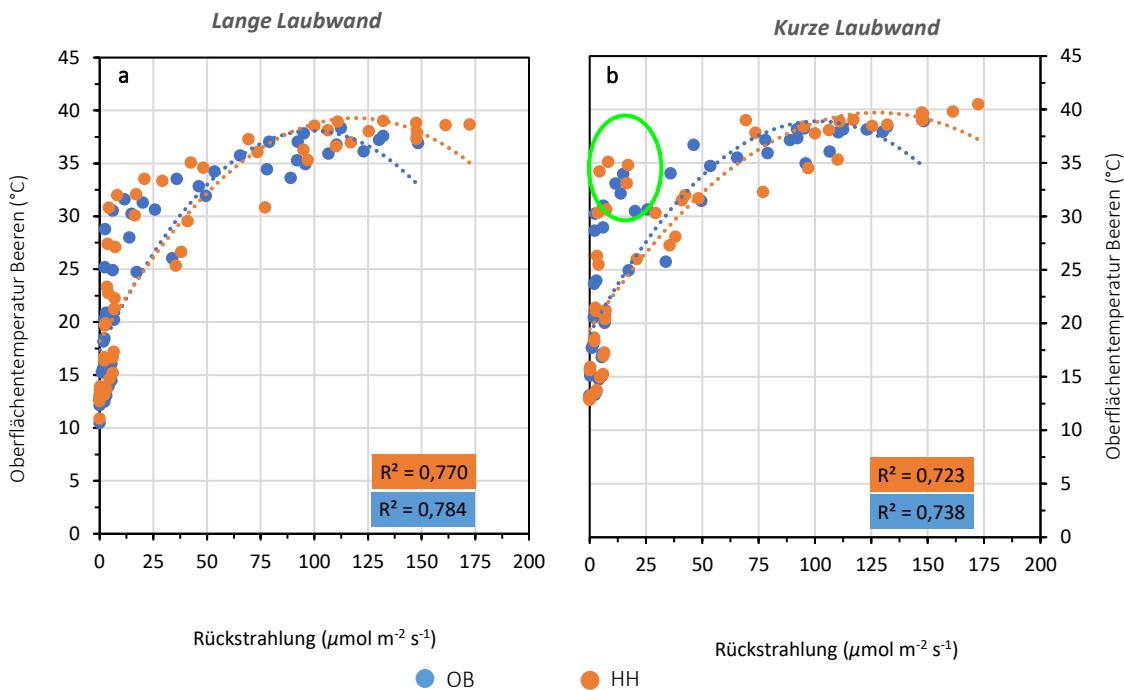


Abbildung 43 Zusammenhang zwischen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und der Beerenoberflächentemperatur im Versuchsjahr 2022 (a+b). Tagesmessung (19. Juli und 04. August) von 06:00-22:00 Uhr. OB = Ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock. PAR entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang.

Abbildung 43a+b zeigt die Abhängigkeit der rückgestrahlten photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) aus dem Unterstockbereich in den Beeren- und Laubwandbereich für OB und HH der langen und kurzen Laubwand. Allgemein lässt sich festhalten, dass mit einer ansteigenden Rückstrahlung aus dem Unterstockbereich inmitten der inneren Laubwand ein Erwärmen der Beerenhaut für das lange Blattwerk mit $R^2 = 0,784$ in OB und $R^2 = 0,770$ in HH bzw. dem kurzen Blattwerk mit $R^2 = 0,738$ in OB und $R^2 = 0,723$ in HH einhergeht (Abbildung 43a+b). HH weist in beiden Laubwandhöhen die größte zurückgeworfene Strahlung bei maximaler Beerenhauttemperatur auf, wodurch sich der Effekt der verstärkten Reflexion durch Holzhäcksel bestätigen lässt. Innerhalb der langen Laubwand ist ein Abflachen der oberflächigen Beerenoberflächentemperatur bei einer Rückstrahlung in OB $> 125 \mu\text{mol}$ zu verzeichnen (Abbildung 43a).

Innerhalb der kurzen Laubfronten ist kein Reduzieren bzw. Stagnieren der Beerenhauttemperatur bei gleichzeitig anwachsender Rückstrahlung $> 125 \mu\text{mol}$ für bedeckte und nichtbedeckte Unterstockbereiche ermittelt worden (Abbildung 43b). Dieser Verlauf lässt sich auf das Nicht-entblättern der verkürzten Laubwände zurückführen, weshalb eine verschlechterte Luftzirkulation und demzufolge eine verlängerte „Wärmestrahlungsspeicherung“ vorzufinden ist. Die in beiden Teilgrafiken erhöhte Beerenoberflächentemperaturen zwischen 30 und $35 \text{ }^\circ\text{C}$ bei gleichzeitig verringerter Rückstrahlung $< 25 \mu\text{mol}$, lässt sich mit dem Einkürzen der Laubwand begründen. Ein dadurch in den Morgen-/ und in den Abendstunden früheres bzw. längeres Einfallen der Sonnenstrahlen innerhalb der Rebgassen „verlängern“ den Zeitraum seitens der Rückstrahlung (grüne Markierung). Ein höheres Beerenhauttemperaturniveau gegenüber der langen Laubwand resultiert.

Letztlich kann mittels der durchgeführten Teilmessung bestätigt werden, dass eine ausgebrachte Holzhäckselbedeckung aufgrund ihres hellen Materials eine erhöhte Reflexion der eintreffenden Globalstrahlung am Boden auslöst, was sich in einer höheren Beerenoberflächentemperatur niederschlägt. Deutlich wurde dieser Effekt innerhalb des kurzen Blattwerks, aufgrund der gehemmten Windzirkulation. Ein gleicher Rückstrahlungseffekt wurde für das lange Laubwerk realisiert, allerdings mit einer minimal verringerten Beerenhauttemperatur. Grund hierfür ist die besser durchlüftete Traubenzone durch eine zu Beginn der Reifeperiode durchgeführte Entblätterung.

5.9 Blatttranspirationsrate

In den folgenden Themenabschnitten wurde die Transpirationsrate (TR) der Unterstockabdeckung (HH) mit der moderaten Tropfbewässerung (MB) bzw. der Kontrollvariante (OB) verglichen. Im Jahr 2021 war eine Durchführung der moderaten Bewässerung aufgrund unzähliger Niederschläge nicht von Nöten, da Wasserpotential- und Bodenfeuchtwerte nicht unterhalb der Bewässerungsschwelle lagen. Zusätzlich wurde zwischen Ost- und Westlaubwand unterschieden. Aufgrund der analogen Effekte beider Tagesmessungen wurde sich bewusst für die Beschreibung der des 21. Juli 2021 und des 19. Juli 2022 in diesem Kapitel entschieden, da durch die beiden weiteren Messungen kein zusätzlicher Erkenntnisgewinn zu erzielen war.

5.9.1 Verlauf der Blatttranspirationsrate und der Lufttemperatur in einer Unterstockabdeckung

Versuchsjahr 2021

Lange Laubwand

In allen langen Laubwänden konnte unter variierenden Lufttemperaturen in HH als auch OB eine Abhängigkeit der Transpiration gegenüber der Lufttemperatur im Tagesgang gemessen werden. Schnittpunkte, in welchen ein Übersteigen der Transpiration von West- zur Ostseite gemessen wurde, ergab sich durchschnittlich für OB um 11:00 Uhr und für HH gegen 12:00 Uhr (Abbildung 44a). Dieser Vorgang der Schnittpunkt von Ost- zu Westlaubwänden lässt sich mit der Gradwanderung der Sonne begründen. Während am Morgen alle Ostseiten der Rebassen besonnt werden, wird zur Mittagszeit der Zenitstand der Sonne erreicht. Die intensivste Bestrahlung der Westfronten findet am Nachmittag statt (vgl. Abbildung 44a-aa). Gegen 14:00 Uhr wurden in OB-W ($1,56 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) und in HH-W ($1,66 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) Tageshöchstwerte der TR bei einer Lufttemperatur von $36,6 \text{ }^\circ\text{C}$ gemessen. Ab diesem Messzeitpunkt nahm die Blatttranspiration kontinuierlich bis 18:00 Uhr ab, ehe diese einen steilen Abfall bis zum Messende vorwies. Dieser temporäre Verlauf ist auf die Höhe der Laubwand zurückzuführen, da bereits gegen 15:00 Uhr die Schattenbildung in der jeweilig gegenüberliegenden Traubenzone begann. Aufgrund der längeren Variante (1,40 m) konnte ein verkürzter Einfall der Sonne gewährleistet werden, was einen verminderten TR-Verlauf erklären lässt.

Kurze Laubwand

Der Einfluss der Tageszeit auf die Blatttranspiration unter sich verändernder Lufttemperaturbedingungen der kurzen Laubwand ist in Abbildung 44aa dargestellt. Bei diesen Laubwänden ist sowohl in HH als auch OB eine Abhängigkeit der Blatttranspiration von der Lufttemperatur erkennbar. Einkürzte Laubwände transpirierten im Verhältnis zur langen Laubwand durchschnittlich zwischen 15 bis 20 % weniger (Abbildung 42aa+bb), was mit der Reduzierung der Blattmasse einhergeht. Mittäglich besonnte Westlaubwände konnten im Vergleich zur Schattenlaubwand am Nachmittag (Ostseite) gesteigerte Transpirationswerte aufweisen, was der längeren Besonnung bis in die Abendstunden geschuldet ist. Mit anwachsenden Lufttemperaturen wurden simultan erhöhende TR-

Werte erhoben. Auffallend ist, dass gegen 11:15 Uhr ein Schneiden der Verlaufslinie von West- zu Ostlaubwänden in OB hinsichtlich der steigenden Transpiration zu erkennen ist. Lediglich in HH wurde eine zeitliche Verschiebung des Schnittpunktes um 12:30 Uhr ermittelt (Abbildung 44aa: gelbe Markierungen). In OB-W wurde bereits um 12:00 Uhr ($0,94 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$), gegen 14:00 Uhr in HH-W ($1,25 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) das Maximum der Blatttranspiration erreicht. Ein nahezu linearer TR-Verlauf bis circa 16:30 Uhr konnte aufrechterhalten werden, bis ein Abflachen aller TR-Werte vorzufinden war.

21. Juli und 15. August 2021

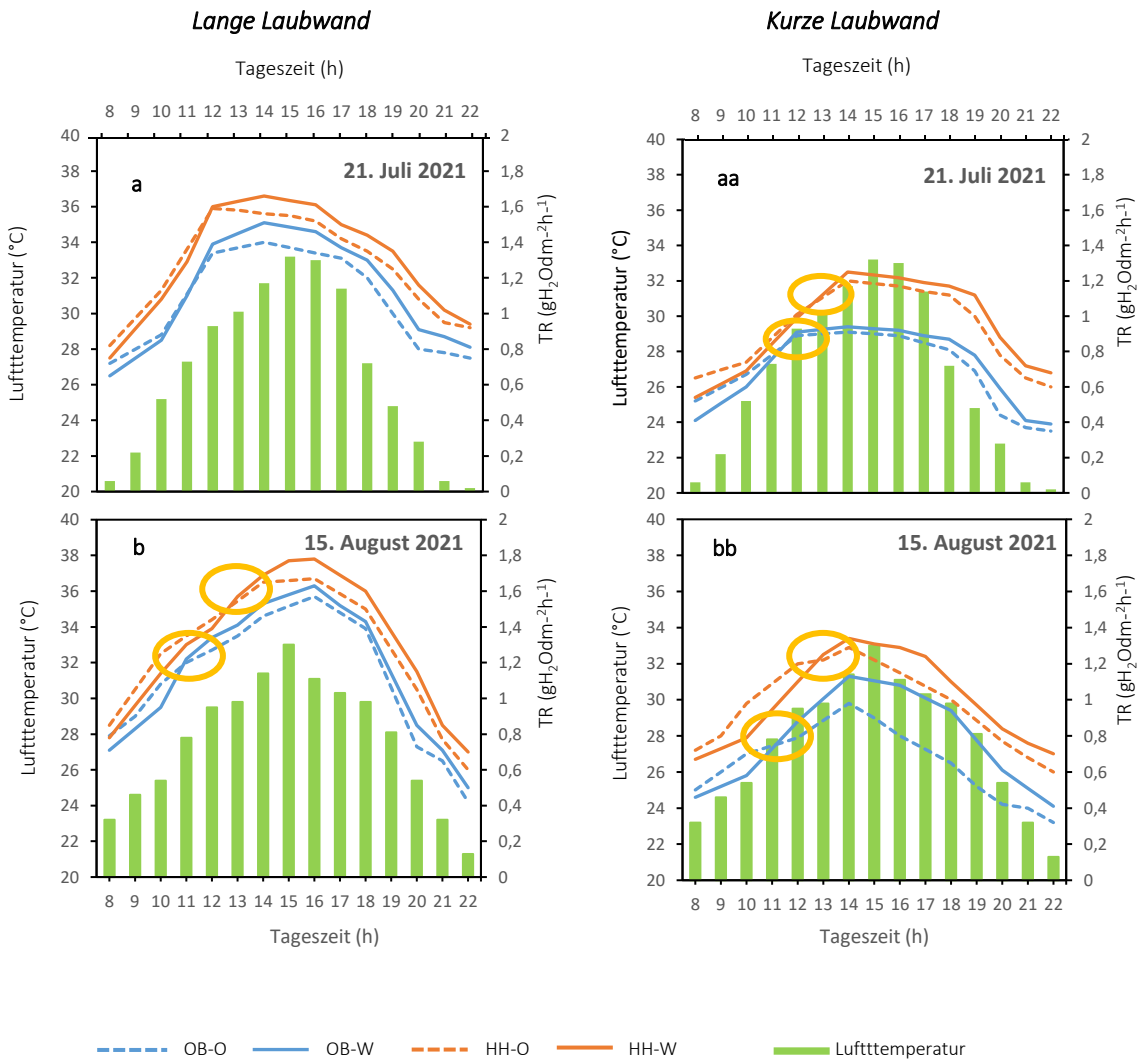


Abbildung 44 Tagesgang von Lufttemperatur und der Transpirationsrate (TR) zweier Tagesmessungen (21. Juli und 15. August 2021, a-bb) innerhalb der Kontrollvariante (OB) und Unterstockabdeckung (HH), Unterscheidung zwischen langer (1,40 m) und kurzer (0,70 m) Laubwand. TR entspricht dem Durchschnittswert von $n = 4$ Messwerten. Lufttemperatur besteht aus 15-minütig gemittelten Werten.

Versuchsjahr 2022

Lange Laubwand

Mit ansteigender bzw. abfallender Lufttemperatur ging ein simultaner TR-Verlauf in allen Versuchsformen (OB, HH, MB) einher. Ein am Vormittag stattfindendes Überschreiten der Transpirationsrate von West- zur Ostseiten wurde für MB und HH gegen 11:00 Uhr, für OB um 11:30 Uhr gemessen (Abbildung 45a). Um 14:00 Uhr leisteten OB-W ($1,15 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$), HH-W ($1,48 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) und MB-W ($1,69 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) maximale TR-Werte für diesen Messtag. In zweistündiger Verspätung (16:00 Uhr) zeigte die örtliche Lufttemperatur mit $37,1 \text{ }^\circ\text{C}$ ihren Tageshöchstwert. Nach Erreichen der maximalen Blatttranspiration reduzierte sich diese bis 18:00 Uhr sowohl in Ost- als auch Westfronten. In HH und MB wurden nahezu individuelle gleiche TR-Werte für Ost- und Westseiten bis 20:00 Uhr ermittelt, ehe sich HH-W und MB-W bis zum Messende minimalst von ihren benachbarten Ostwänden differenzierten und bis zum Messende geringere TR-Leistungen aufzeigten (Abbildung 45a). Auffällig ist, dass in OB-W ein einstündiges Ansteigen der Blatttranspiration gemessen wurde. Bis zur Beendigung der Messung vielen beide OB-Seiten seitens Transpiration linear ab.

Kurze Laubwand

Mit Blick auf das verkürzte Blattwerk wurden 2022 im Durchschnitt 15 % verringerte Transpirationswerte als im langen Blattwerk ermittelt (Abbildung 45aa+bb). Um 11:30 Uhr ereignete sich in allen Varianten das Kreuzen von West- zu Ostlaubwänden mit Bezug auf deren Transpirationsleistungen. Die am Mittag bis in die Abendstunden besonnenen Westseiten zeigten vergleichsweise zur benachbarten Ostseite die höchsten Transpirationswerte gegen 14:00 Uhr für HH-W ($1,29 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) und MB-W ($1,44 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$), gegen 15:45 Uhr für OB-W ($0,95 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) bei einer Tageshöchsttemperatur der Luft von $37,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

Auffällig ist, dass wie zuvor innerhalb der langen Laubwand ein Angleichen zwischen HH-W und MB-O zu erkennen ist, was sich bis 20:00 Uhr fortsetzte. Ebenfalls fand ein Angleichen zwischen HH-O und HH-W um 20:00 Uhr statt bzw. verringerte sich in OB-O die TR-Leistung zwischen 18:00 und 20:00 Uhr radikal um 50 %. Alle erhobenen TR-Werte jeder Laubseiten für OB, HH und MB sanken im Allgemeinen nach ihrem am Mittag erreichten TR-Maximum nahezu linear bis zum Messende ab.

19. Juli und 04. August 2022

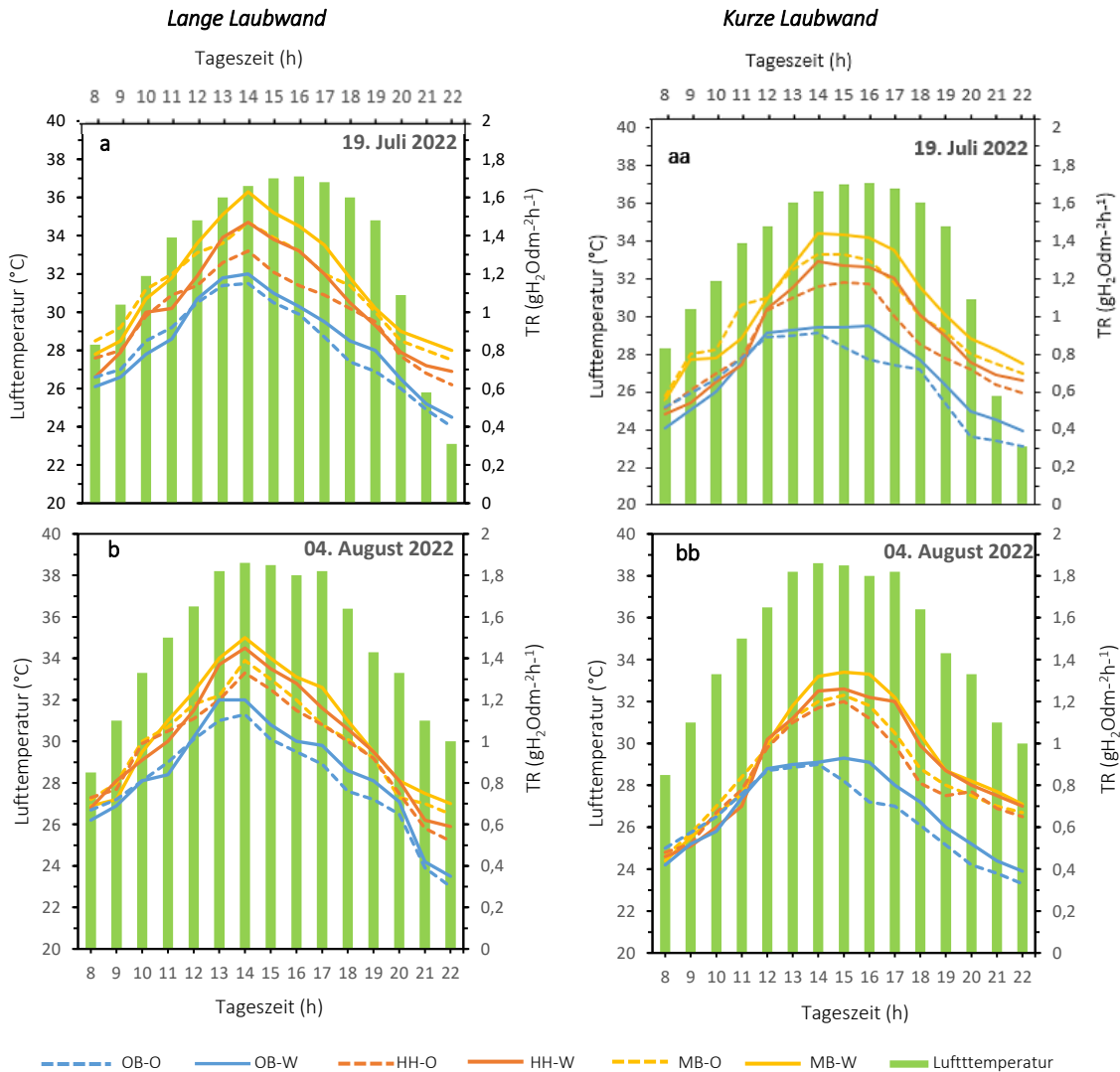


Abbildung 45 Tagesgang von Lufttemperatur und der Transpirationsrate (TR) zweier Tagesmessungen (19. Juli und 04. August 2022, a-bb) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckenden Abdeckung (HH+), moderaten Bewässerung (MB). Unterscheidung zwischen langer (1,40 m) und kurzer (0,70 m) Laubwand. TR entspricht dem Durchschnittswert von $n = 4$ Messwerten. Lufttemperatur setzt sich aus 15-minütig gemittelten Werten zusammen.

5.9.2 Zusammenhang zwischen Blatttranspirationsrate und Lufttemperatur einer Unterstockabdeckung

Um den Zusammenhang zwischen der Blatttranspiration und der Lufttemperatur im Versuchsfeld darzustellen, wurden die in den Versuchsjahren 2021 und 2022 erhobenen Werte in Abbildung 46a-bb miteinander korreliert.

Lange Laubwand

Ost- als auch Westlaubwände zeichnen sich innerhalb der langen Laubwand 2021 durch einen positiv linearen Zusammenhang aus: OB ($R^2 = 0,874$) und HH ($R^2 = 0,822$). In HH und OB geht mit steigender Lufttemperatur eine analog sich erhöhende Blatttranspiration einher. Die höchste Transpirationsleistung konnte innerhalb der Erhebungsform HH mit $1,66 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ bei $33,2 \text{ }^\circ\text{C}$ Lufttemperatur registriert werden (Abbildung 46a). Für dieses Erhebungsjahr konnte kein Stagnieren für beide Versuchsformen und demzufolge kein Trockenstress ermittelt werden, was der diesjährigen hohen Taktung an ergiebigen Niederschlägen zuzuschreiben ist.

2022 erwies sich als klassisches Gegenstück zu 2021, weshalb die dargestellten Korrelationen einen verminderten TR-Verlauf annehmen (Abbildung 46b). Mit einem positiven Zusammenhang (OB: $R^2 = 0,785$; HH: $R^2 = 0,668$; MB: $R^2 = 0,713$) in allen abgelichteten Varianten konnten Blatttranspiration und Lufttemperatur eine hohe Korrelation aufweisen. Lediglich HH und MB zeigen einen linearen Anstieg $> 30 \text{ }^\circ\text{C}$ bezüglich der Reblatttranspiration, wohingegen OB einen kleinschrittigen Transpiration-/Temperaturanstieg vernehmen lässt. Die höchsten Transpirationsleistungen konnten in MB ($1,69 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$), gefolgt von HH ($1,48 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) und OB ($1,15 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$) bei $38,6 \text{ }^\circ\text{C}$ Lufttemperatur erfasst werden. Ansteigende Lufttemperaturen ließ die Transpiration in MB und HH polynomisch anwachsen. In OB hingegen unterband diese $> 35 \text{ }^\circ\text{C}$ eine Stagnation der Blatttranspiration (Abbildung 46b).

Kurze Laubwand

Für beide Versuchsvarianten konnten signifikante Bestimmtheitsmaße für 2021 herausgearbeitet werden, OB ($R^2 = 0,871$) und HH ($R^2 = 0,851$). Eine reduzierte Laubwand (0,70 m) erzielte deutlich herabgesetztere Transpirationsleistungen als eine herkömmliche 1,40 m Laubwand. Keine TR-Stagnation bzw. TR-Abflachen bei ansteigenden Lufttemperaturen wurde für alle Erhebungsvarianten ermittelt, was zugleich auf den weniger beanspruchten Wasserhaushalt der Reben zurückzuführen ist. Maximal erfasste Transpirationswerte der Blätter wies HH mit $1,25 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ auf (Abbildung 46aa).

Für 2022 wurden positive Zusammenhänge in OB ($R^2 = 0,678$), HH ($R^2 = 0,819$) und MB ($R^2 = 0,626$) erfasst. Für das kurze Blattwerk ergibt sich ein ähnliches Abbild wie in 1,40 m hohen Laubwänden. Die gravierendste Differenz lässt sich lediglich in der verringerten TR-Leistung aller Varianten aufzeigen. Darüber hinaus ist keine Stagnation innerhalb OB wie einst in der langen Laubwand zu erkennen, was auf die geringere Wasserbeanspruchung der verkürzten Laubwände zurückzuführen ist.

Versuchsjahr 2021 und 2022

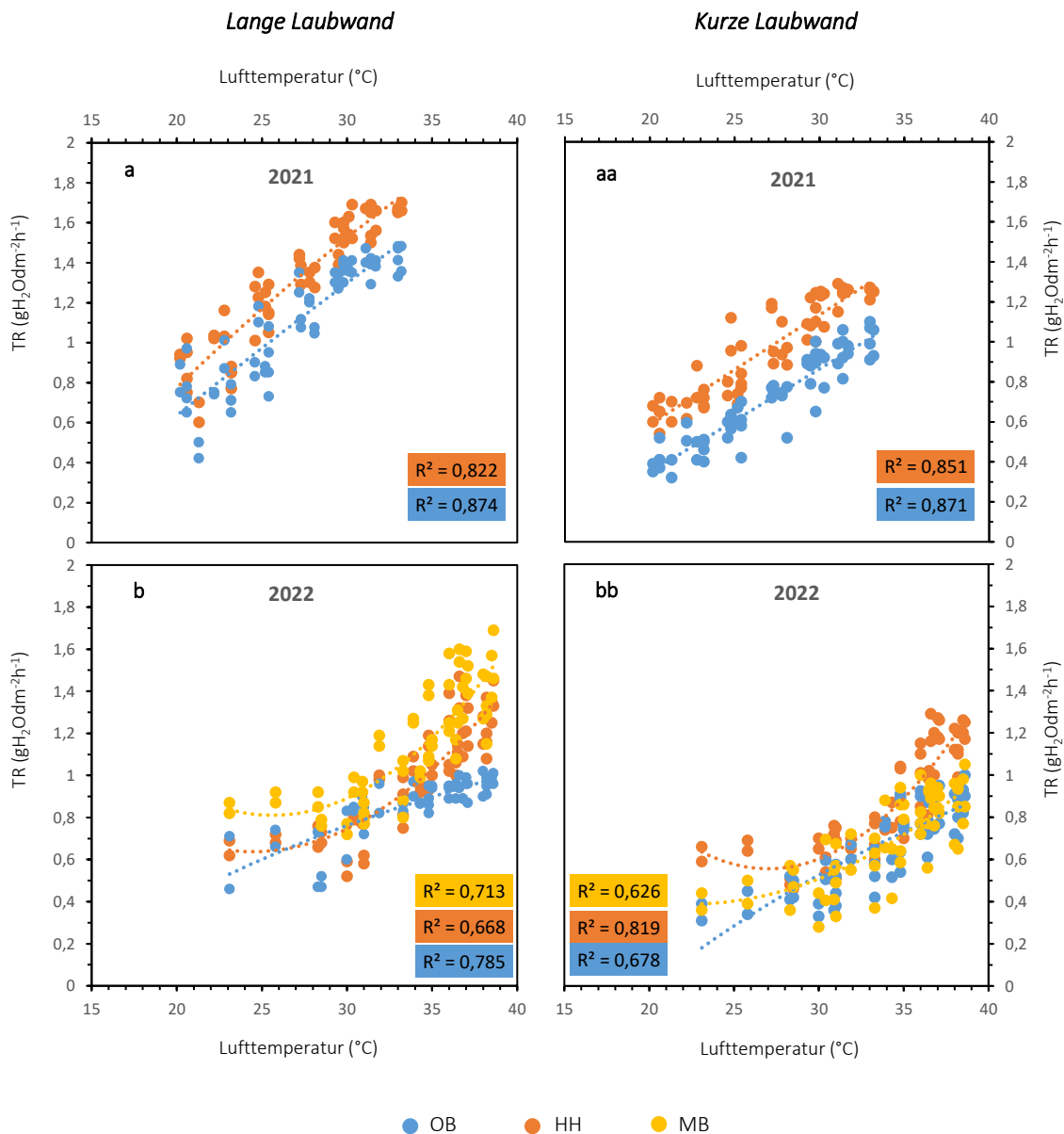


Abbildung 46 Zusammenhang zwischen der Transpirationsrate (TR) und der Lufttemperatur im Versuchsjahr 2021 und 2022. Tagesmessung (21. Juli und 15. August 2021; 19. Juli und 04. August 2022, a-bb) von 08:00-22:00 Uhr. TR entspricht dem Durchschnittswert aus West- und Ostseiten mit jeweils n = 4 Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang.

Mittels Kapitel 5.9.1 und 5.9.2 konnte aufgezeigt werden, dass die Blatttranspiration in Zusammenhang mit der vorherrschenden Lufttemperatur steht. Versuchsformen wie MB und HH, welche einen deutlich verbesserten Wasserhaushalt belegen als OB, leisten die höchsten TR bei hiesig anwachsenden Lufttemperaturen, was das Jahr 2022 deutlich zum Ausdruck brachte. MB zeichnet sich hierbei als bestmögliche Variante, gefolgt von HH und OB aus.

In Anbetracht der Laubwandlängen vollbringen verkürzte Rebfronten ein verringertes TR-Niveau, was der geringeren Laubfront geschuldet ist. Demzufolge wird der örtlich vorhandene Wasserhaushalt weniger beansprucht. HH hob sich inmitten dieser als Erhebungsform mit den höchsten TR-Werten bei maximaler Lufttemperatur ab. Aufgrund der nicht durchzuführenden Bewässerung innerhalb dieser Laubwandhöhe in MB ist ein vergleichbarer Korrelationsverlauf wie in OB vorzufinden.

5.9.3 Verlauf der Blatttranspirationsrate im Verhältnis zur Lufttemperatur und Blattoberflächentemperatur

Um einen tiefgründigeren Einblick des zuvor beschriebenen Verlaufs der Blatttranspiration und Lufttemperatur zu erhalten, wurden im Folgenden zwei Tagesgänge für 2021 und 2022 der Blattoberflächen- und Lufttemperatur sowie der Blatttranspirationsrate der verkürzten (0,70 m) und normalen (1,40 m) Laubwand zusammengeführt. Eine Unterscheidung von Ost- und Westlaubwänden wurde berücksichtigt. Aufgrund nahezu übereinstimmender Tagesgangeffekte der zweiten Messung wurde sich auf eine ausführliche Beschreibung der Daten der ersten Messung bezogen. Vorab kann festgehalten werden, dass innerhalb der 1,40 m langen Blattwand erhöhte Blatttranspiration bzw. eine verringerte oberflächige Blatttemperatur gegenüber den kurzen Laubwänden abzulesen ist (Abbildung 47a-bb). Kapitel 5.9.1 stellt bereits detailliert die Tagesgänge der TR-Daten dar, weshalb nun eine gebündelte Beschreibung fortgeführt wird.

Versuchsjahr 2021

Lange Laubwand

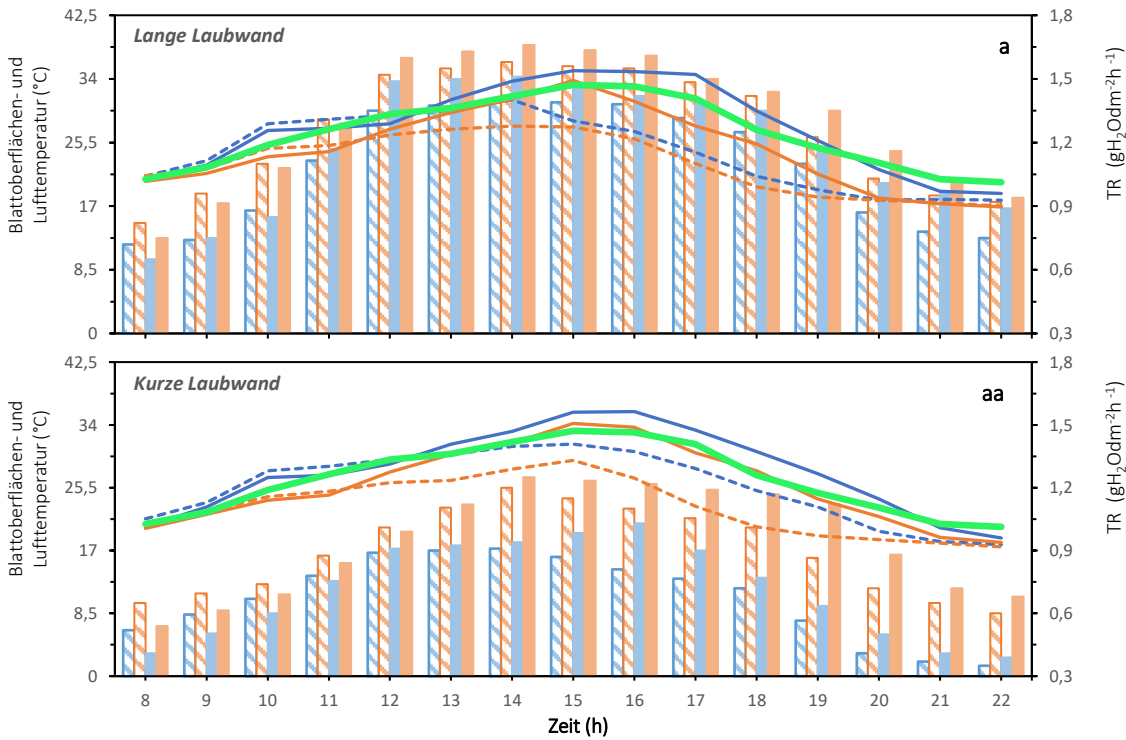
Beide Tagesgänge zeichneten sich durch einen massiven Temperatursprung der Blattoberfläche zwischen 09:00 und 10:00 Uhr aus. Mit Blick auf die TR ist gegen 10:30 Uhr ein Übersteigen der TR von West- (blau) zur Ostseite (blau-gestrichelt) in OB zu verzeichnen. Gleicher Ablauf lässt sich eine Stunde verzögert in HH (HH-W = orange, HH-O = orange-gestrichelt) beobachten. Am 21. Juli wurde eine Zunahme in OB-O um 22 % und in HH-O um 12 % erfasst. Diese Disparität lässt sich mittels einer herabgesetzten Blatttranspiration beider OB-Varianten im Gegensatz zu HH-Varianten bekräftigen (Abbildung 47a und aa). Mit fortschreitender Gradwanderung der Sonne wurde in HH gegen 12:00 Uhr ein Passieren von West- (Linie orange = 26,5 °C) gegenüber der oberflächigen Ostwandtemperatur (Linie orange-gestrichelt = 26,5 °C) erhoben. Gleicher Prozess fand 60 Minuten verzögert in OB zwischen West- (Linie blau = 30,7 °C) und Ostfront (Linie blau-gestrichelt = 30,7 °C) bei simultan wachsender Lufttemperatur (30,1 °C) statt. Tageshöchstwerte bei den Blattoberflächentemperaturen wurden in beiden Westfronten gegen 15:00 Uhr für OB-W mit 35,1 °C bzw. HH-W 33,2 °C erfasst. Mit gemessener Maximallufttemperatur von 33,2 °C gegen 15:00 Uhr sanken die oberflächigen Blatttemperaturen bis zum Messende ab. Von 18:00 bis 20:00 Uhr bzw. von 20:00 bis 22:00 Uhr ist ein stufenähnlicher TR-Verlust in allen Varianten durch eine verringerte Sonneneinstrahlung und Lufttemperaturen resultierend. Markant ist hierbei der Temperaturabfall der Blattoberflächen von HH-W zwischen 19:00 und 20:00 Uhr. Ab 21:00 sank sogar die an der längst bestrahlten Westfront (17,3 °C) in HH unterhalb der HH-O (17,5 °C) Oberflächentemperaturen. Auffallend sind die zwischen 15:00 und 17:00 Uhr stark erhöhten Oberflächentemperaturen der Blätter innerhalb OB, was ein Schließen der Stomata und dem Verringern der TR mit sich bringt.

Kurze Laubwand

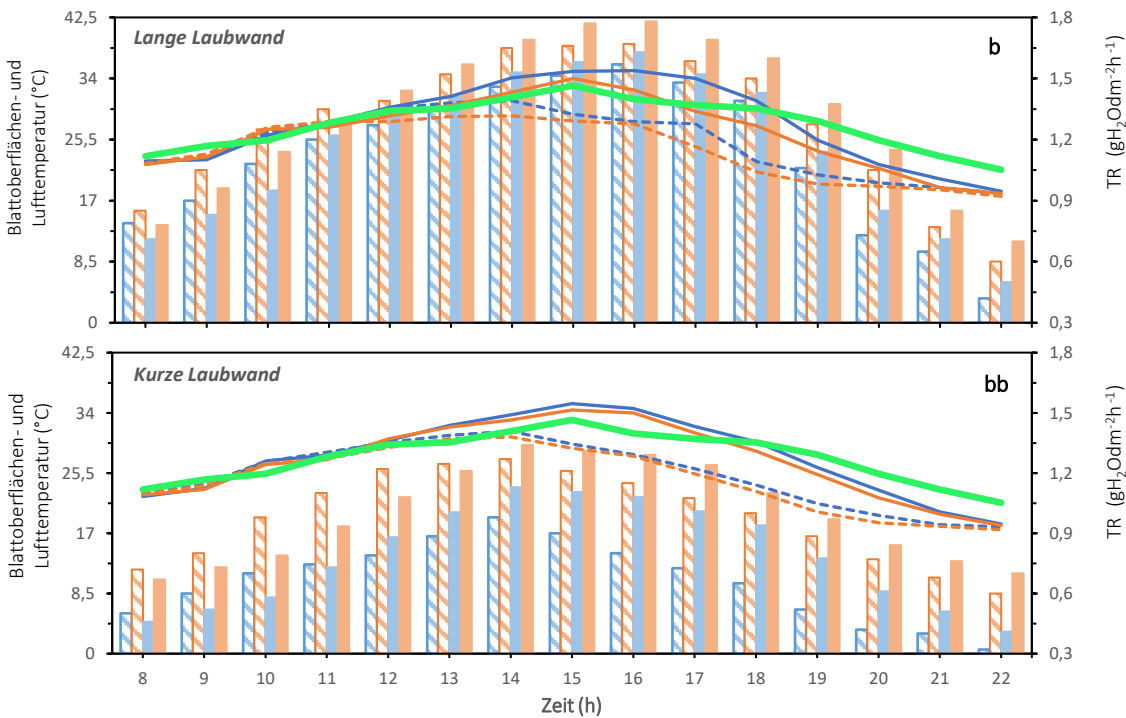
Abbildung 47aa und bb zeigt auf, dass bis zur Mittagszeit (12:00 Uhr) sowohl in OB als auch in HH jede der Ostseiten höhere Blattoberflächentemperaturen als deren benachbarte Westfronten aufweisen. Während des höchsten Sonnenstandes, gegen 12:00 Uhr, ist zuerst in HH ein „Überholen“ der Blattoberflächentemperaturen von West- (Linie orange = 27,6 °C) zu Ostlaubwand (Linie orange-gestrichelt = 27,6 °C) bei gleichzeitig ansteigender Lufttemperatur (grün = 29,3 °C) zu erkennen.

Innerhalb der Kontrollvariante (OB) weist die Transpirationsleistung eine marginal erhöhte Leistung der mittags besonnten Westseite (blaue Linie) gegenüber ihrer Ostfront (blau gestrichelte Linie) ab 12:00 Uhr auf. Gleiches Szenario kontrastiert sich zeitverzögert gegen 13:00 Uhr in OB der West- (Linie blau = 31,4 °C) zur Ostlaubwand (Linie blau-gestrichelt = 30 °C) bei emporschnellender Lufttemperatur (30,1 °C). Mit Erreichen der Tageshöchsttemperatur der Luft von 33,2 °C (15:00 Uhr) innerhalb der Rebengassen sanken fortan in allen Varianten die Oberflächentemperaturen der Rebblätter bis zur Beendigung der Messung gegen 22:00 Uhr. Stetig erhöhte Oberflächentemperaturen der Blätter der am Nachmittag besonnten Westseiten in OB waren bis 22:00 Uhr kontinuierlich höher als die der HH, was auf eine verschlechterte Wasserversorgung der Reben schließen lässt (Abbildung 47aa).

21. Juli 2021



15. August 2021



Blatttranspiration OB O OB W HH O HH W Lufttemp.
Blattoberflächen-temperatur OB O OB W HH O HH W

Abbildung 47

Tagesgang der Blattoberflächen-/ Lufttemperatur und Transpirationsrate am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb), Blatttranspiration = Säulendiagramm, Lufttemperatur = grüne Verlaufsline, Blattoberflächentemperatur = durchgezogene/gestrichelte Verlaufsline, OB-O = Ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = Ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, Blattoberflächentemperatur und -transpiration entsprechen dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten, Lufttemperatur ergibt sich aus 15-minütig-gemittelten Werten.

Versuchsjahr 2022

Lange Laubwand

Die höchsten Oberflächentemperaturen der Ostblätter wurden innerhalb der am Morgen besonnten Ostwände gegen 10:00 Uhr ermittelt. Für OB-O (36,2 °C) wurden die höchsten Kennwerte gefolgt von HH-O (34,7 °C) und MB-O (34,2 °C) gemessen. Während sich in HH und MB bereits um 11:30 Uhr ein Schneiden von West- zu Ostlaubwänden sich ereignete, ging dieser Vorgang in OB gegen 12:00 Uhr vonstatten (Linienverlauf Abbildung 48a). Am frühen Nachmittag wurde in allen drei Varianten das oberflächige Blatttemperaturmaximum gegen 15:00 Uhr erhoben. Spitzenreiter war auch hier Versuchsform OB. Bis zum Messende sanken alle Oberflächentemperaturen der Laubwände im Gleichschritt ab (Abbildung 48a). Auffällig ist, dass eine einstündige Temperaturstagnation in allen Ostwänden zwischen 17:00 und 18:00 Uhr einherging.

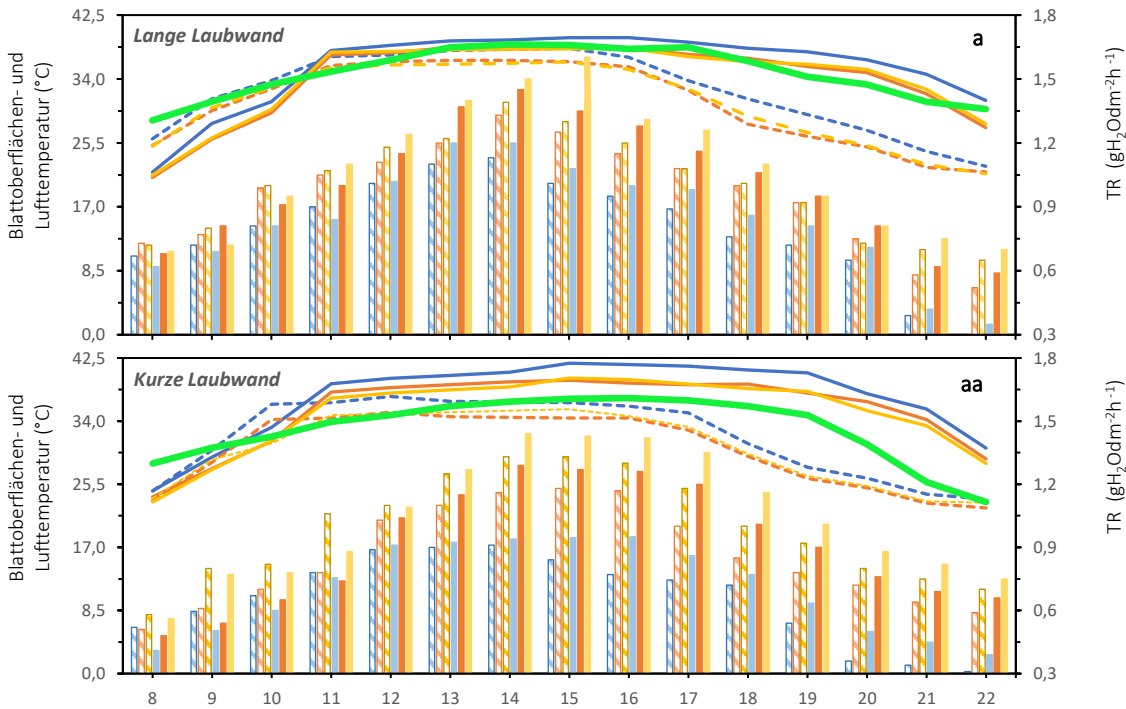
In Sachen Blatttranspiration wurde gegen 11:30 Uhr ein Schneiden der Transpirationsrate von West- (einfarbige Säulen) zur Ostseite (gestrichelte Säulen) ermittelt. Die Tagesbestmarke für die Transpirationsrate wurde in MB (1,69 gH₂Odm⁻²h⁻¹), gefolgt von HH (1,48 gH₂Odm⁻²h⁻¹) und OB (1,15 gH₂Odm⁻²h⁻¹) gemessen. Mit Erreichen dieser Bestwerte verringerten sich alle TR-Werte bis zum Messende linear (Abbildung 48a).

Kurze Laubwand

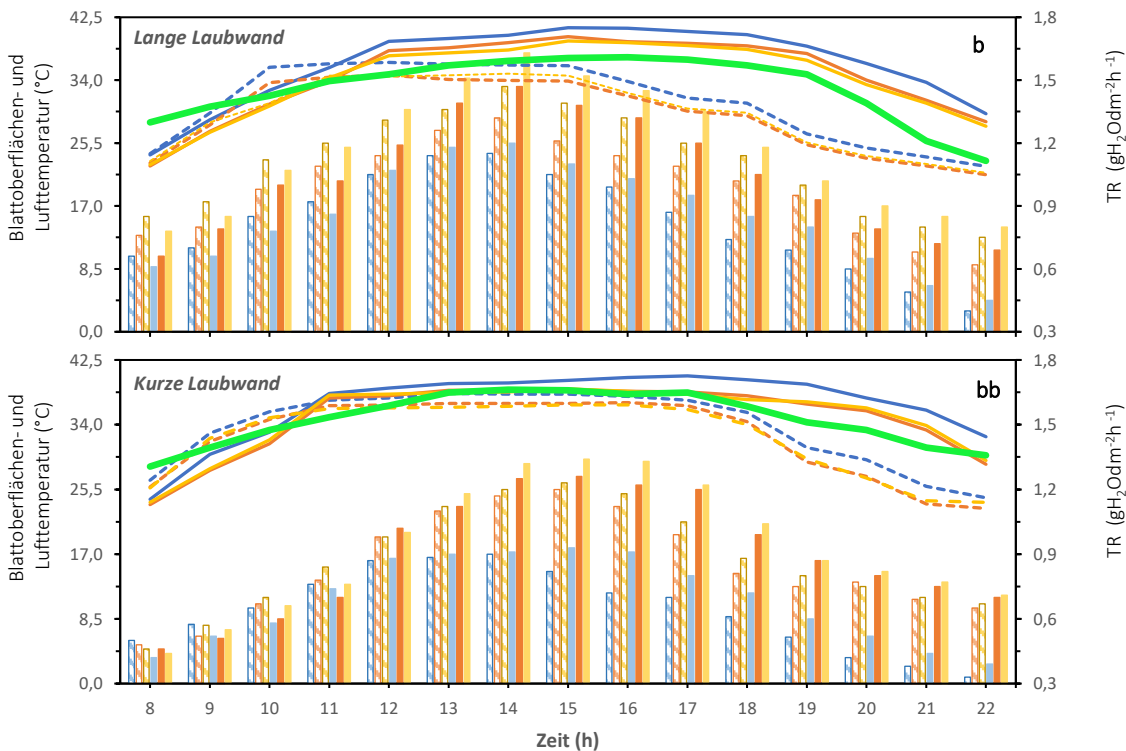
Die höchsten Oberflächentemperaturen der Blätter wurden gegen 10:00 Uhr innerhalb der Ostwände erhoben (Abbildung 48aa und bb). Um 11:15 Uhr wurde in HH und MB, um 12:00 Uhr in OB ein Schneiden und zeitgleich ein weiteres Emporsteigen der Westtemperaturen gegenüber der Osttemperaturen erfasst (Abbildung 48aa). 15:00 Uhr kristallisierte sich als Zeitpunkt der Blatttageshöchsttemperaturen innerhalb der Westfronten mit 41,8 °C (OB), 39,5 °C (HH) und 39,8 °C (MB) heraus.

Der im unteren Bereich von Abbildung 48aa verlaufende Säulengraph zeichnet sich durch eine in MB durchschnittlich höchste Transpirationsrate aus. Ab 13:00 Uhr fand ein Übersteigen der TR-Leistungen von West- zur Ostlaubwand in OB, HH und MB statt. Um 14:00 Uhr wurden TR-Tageshöchstwerte in OB-W (0,95 gH₂Odm⁻²h⁻¹), in HH-W (1,29 gH₂Odm⁻²h⁻¹) und in MB-W (1,44 gH₂Odm⁻²h⁻¹) erhoben. Mit fortschreitender sich reduzierender Lufttemperatur sanken alle TR-Leistungen zum Messende ab.

19. Juli 2022



04. August 2022



Blatttranspiration OB O OB W HH O HH W MB O MB W Lufttemp.
Blattoberflächen-temperatur OB O OB W HH O HH W MB O MB W

Abbildung 48

Tagesgang der Blattoberflächen-/ Lufttemperatur und Transpirationsrate am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb), Blatttranspiration = Säulendiagramm, Lufttemperatur = grüne Verlaufslinie, Blattoberflächentemperatur = durchgezogene/gestrichelte Verlaufslinie, OB-O = Ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = Ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite, Blattoberflächentemperatur und -transpiration entsprechen dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten, Lufttemperatur ergibt sich aus 15-minütig-gemittelten Werten.

5.9.4 Zusammenhang zwischen Blatttranspirationsrate und -oberflächentemperatur

Aufbauend zu den bereits beschriebenen Verläufen der Blatttranspirationsrate und Oberflächentemperaturen wurde nun eine Korrelation aller Erhebungsparameter durchgeführt, um mögliche Verbindungen und Disparitäten herauszuarbeiten. Sowohl Blattoberflächentemperaturen als auch Blatttranspirationsrate wurden in Ost- als auch Westfronten herangezogen.

Lange Laubwand

Ost- als auch Westlaubwände ergaben innerhalb der langen Laubwand 2021 einen positiv polynomischen Zusammenhang in OB ($R^2 = 0,775$) bzw. einen positiv linearen Zusammenhang in HH ($R^2 = 0,676$). Während in HH mit steigender Oberflächentemperatur der Blätter eine sich analog erhöhende Transpirationsrate der Blätter verzeichnen lässt, wurde für OB im Temperaturintervall von 29 bis 33 °C ein minimales Stagnieren der anwachsenden Transpirationsrate im Verhältnis zur Blattoberflächentemperatur ermittelt. Ab diesem Zeitpunkt wurde nochmals ein höheres TR-Niveau bei ansteigender Blattoberflächentemperatur verzeichnet. Die höchste Transpirationsleistung konnte innerhalb der Erhebungsform HH mit $1,66 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ gefolgt von OB mit $1,51 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ registriert werden (Abbildung 49a).

2022 zeigte MB an beiden Tagesmessungen die größtmögliche Blatttranspirationsrate von $1,69 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ bei ca. 38 °C Blattoberflächentemperatur, gefolgt von HH mit einer Transpirationsrate von $1,48 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ bei 38,5 °C und OB mit einer Blatttranspiration von $1,15 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ bei 40,2 °C. In allen drei Varianten wurde einen Zusammenhang zwischen Blatttranspiration und Blattoberflächentemperatur von $R^2 = 0,610$ bis $0,860$ erhoben (Abbildung 49b). Ab einer oberflächigen Blatttemperatur > 26 °C ist in OB ein Stagnieren der vorherrschenden TR-Leistung zu verzeichnen, was den akuten Wasserstress darstellt. Das Schließen der Stomata war hierbei die Folge.

Kurze Laubwand

Innerhalb der beiden Versuchsvarianten wurden positiv linear signifikante Bestimmtheitsmaße für OB ($R^2 = 0,916$) und HH ($R^2 = 0,740$) herausgearbeitet. Keine TR-Stagnation bei ansteigenden Oberflächentemperaturen der Blätter wurde für alle Erhebungsvarianten ermittelt, was zugleich auf den weniger beanspruchten Wasserhaushalt der Reben zurückzuführen ist. Verringerte Blattwerkfronten zeigen einen minimierten Wasserverbrauch auf, welches der Boden zur Verfügung stellt, was sich letzten Endes in einer reduzierten Transpirationsleistung niederschlägt (Abbildung 49b). Für das Folgejahr 2022 wurden minimal höhere oberflächige Blatttemperaturen bei gleichzeitig geringerer Blatttranspiration als in allen langen Laubfronten ermittelt. Die höchsten oberflächigen Blatttemperaturen wurden bei größtmöglicher Blatttranspirationsrate erreicht: MB = 40 °C, HH = 40,3 °C, OB = 41,6 °C (Abbildung 49bb). Eine Reduktion der Transpirationsrate bei ansteigenden Blattoberflächentemperaturen konnte innerhalb der verkürzten Laubwände nicht bestimmt werden.

Versuchsjahr 2021 und 2022

Lange Laubwand

Kurze Laubwand

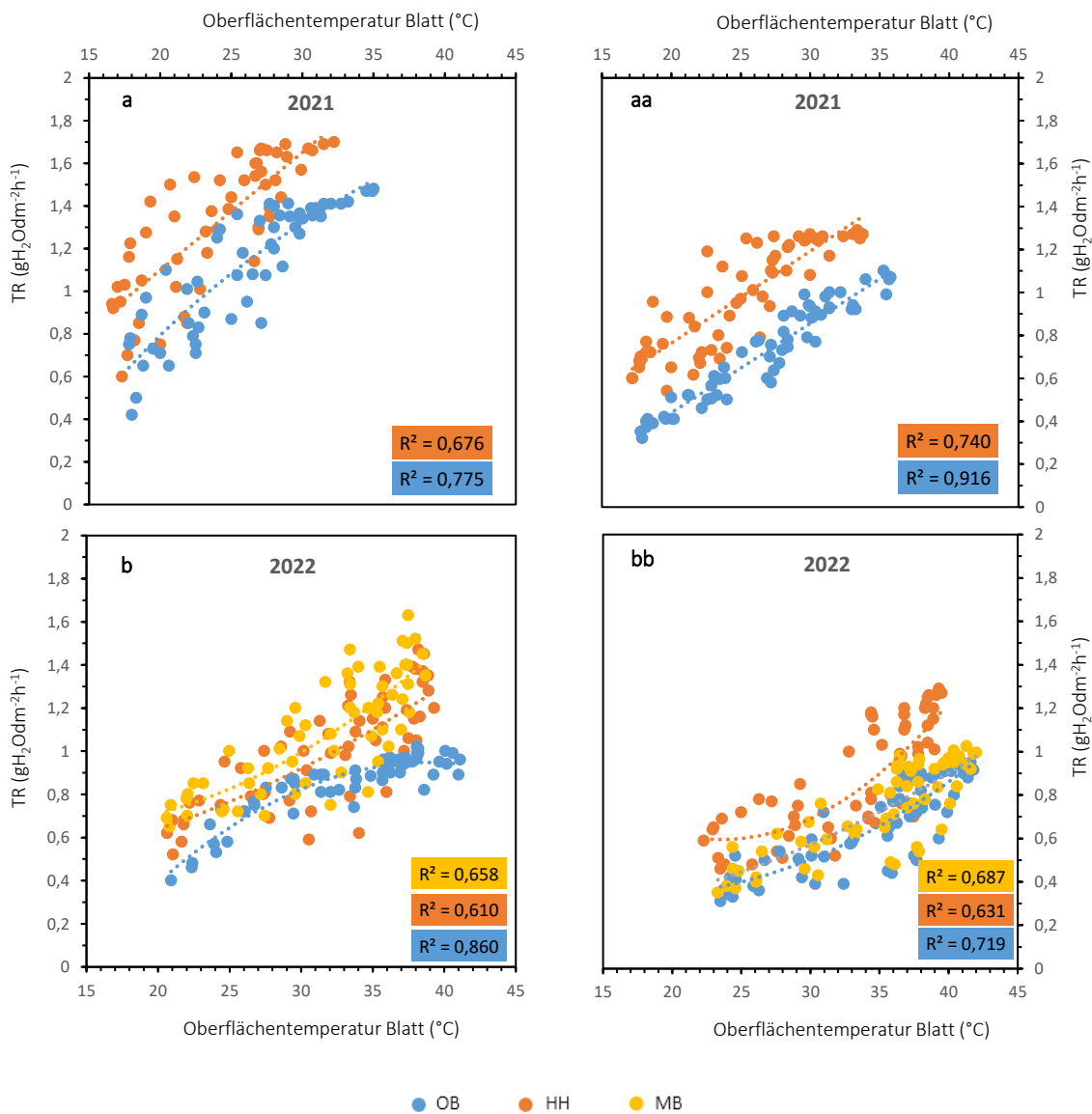


Abbildung 49 Zusammenhang zwischen Transpirationsrate (TR) und der Oberflächentemperatur der Blätter am 21. Juli und 15. August 2021 bzw. 19. Juli und 04. August 2022 zwischen 08:00 und 20:00 Uhr (a-bb). Unterscheidung zwischen kurzer und langer Laubwand bzw. Ost- und Westseite; TR: n = 4; Oberflächentemperatur Blatt: n = 4; HH = Unterstock – Holzhäcksel, OB = Ohne Bedeckung; MB = moderate Bewässerung; Regressionsgleichung s. Anhang.

Für die in 2021 und 2022 ermittelten TR-Werte in Abhängigkeit zur Oberflächentemperatur der Blätter kann für das gesamte lange Blattwerk eine verringerte Blattoberflächentemperatur bei gesteigerter TR-Leistung verzeichnet werden. Varianten, welche mittels einer Abdeckung bzw. einer moderaten Bewässerung „behandelt“ wurden, zeigten verbesserte Blatttranspirationsleistungen bei verringerter oberflächigen Blatttemperatur im Vergleich zur Kontrolle (OB) (s. Abbildung 49).

Verkürzte Laubwandhöhen wurden mit geringfügig erhöhten Blattoberflächentemperaturen als herkömmliche Rebgassen (1,40 m) ermittelt, was allerdings nicht in einer Hemmung seitens der Transpirationsrate vorzufinden war. Dies lässt sich auf die herabgesetztere Beanspruchung des örtlichen Wasserhaushaltes zurückführen, was dem verminderten Blattvorkommen geschuldet ist. In Sachen der signifikant höheren Blattoberflächentemperaturen ist eine verschlechterte Durchlüftung der hier zu nennende Grund.

5.9.5 Blatttranspirationsrate in Abhängigkeit zum VPD (Wasserdampfsättigungsdefizit)

Die Datenpunkte in Abbildung 50a-bb repräsentieren die Mittelwerte der Transpirationsrate gegenüber dem örtlich ermittelten VPD. Grund des hierbei herangezogenen VPD ist die Beeinflussung der Regulierung der Schließzellen. Mit Anstieg des VPDs geht ein Schließen der Stomata einher, wodurch eine Untersuchung der Versuchsvarianten herangezogen wurde, um einen möglichen Stomataschluss zu untersuchen. Für 2021 wurden die Varianten OB und HH zur Auswertung herangezogen. In 2022 wurde eine moderate Tropfbewässerung (MB) eingesetzt.

Lange Laubwand

Innerhalb der langen Laubwände nimmt die Blatttranspiration mit steigendem VPD zu, bekräftigt durch ein nicht lineares Verhältnis in OB ($R^2 = 0,645$ bis $0,691$), HH ($R^2 = 0,796$ bis $0,818$) bzw. MB ($R^2 = 0,748$). Innerhalb der nicht bedeckten Variante (OB) steigen die VPD-Leistungen bis zu einem Maximum auf 15 hPa an, ehe ein Stagnieren stattfand. Eine Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich konnte bei anwachsenden VPD-Werten eine Blatttranspiration weiterhin aufrechterhalten. Im direkten Vergleich der beiden Erhebungsvarianten zeigte HH verbesserte Transpirationsleistungen bei ansteigenden VPD-Stufen. Ab einem VPD-Niveau von > 19 hPa sind gesteigerte TR-Leistungen von bis zu $0,4 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ zu verzeichnen.

2022 wurden deutlich höhere VPD-Werte unter geringeren TR-Leistungen als in 2021 erhoben, was auf die Hitzephasen dieses Jahres schließen lässt. Die höchsten TR-Werte wurden demnach während der Phase mit den größten VPD-Kennwerten in MB gemessen (Abbildung 50b). Während in MB und HH ein nahezu linearer Zusammenhang besteht, deklarierte sich OB mit einem abflachend-polynomischen Verlauf dar. Für das Hitzejahr 2022 begann sich die Transpirationsrate gegenüber des vorherrschenden VPD in OB > 20 hPa einzustellen, währenddessen sich ein gleichrangiges Emporsteigen beider Variablen in MB und HH abzeichnen lässt (Abbildung 50b).

Kurze Laubwand

Die TR nimmt sowohl in OB als auch in HH mit steigendem VPD zu (Abbildung 50aa+bb), was durch einen nicht linearen Zusammenhang in OB ($R^2 = 0,754$ bis $0,794$) und einen linearen Zusammenhang in HH ($R^2 = 0,758$ bis $0,878$) und MB ($R^2 = 0,748$) ausgedrückt wird. Eine maximale Transpirationsleistungen der Blätter bei maximal erfasstem VPD wurde in HH ermittelt: $1,46 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$. Auffallend ist, dass in OB und HH mit anwachsendem VPD ansteigende TR-Werte zu erkennen sind, wobei ab 25 hPa keine Zunahme der TR erfasst wurde. Aus Abbildung 50b geht hervor, dass eine Holzhäckselabdeckung ab einem VPD-Wert > 18 hPa eine um $\sim 0,25$ bis $0,4 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ verbesserte Transpirationsrate aufweist. In allen drei Varianten wurden signifikant nichtlineare Zusammenhänge, außer in OB (linearer Verlauf) gemessen, so Abbildung 50bb. Demzufolge ist kein Schließen der Blattstomata vorzufinden. Ab einer VPD-Schwelle > 35 hPa ist ein geradliniges Emporschnellen der Transpirationsrate bei höchsten VPD-Werten in HH resultierend, was auf eine verbesserte Wasserversorgung schließen lässt (Abbildung 50bb).

Lange Laubwand

Kurze Laubwand

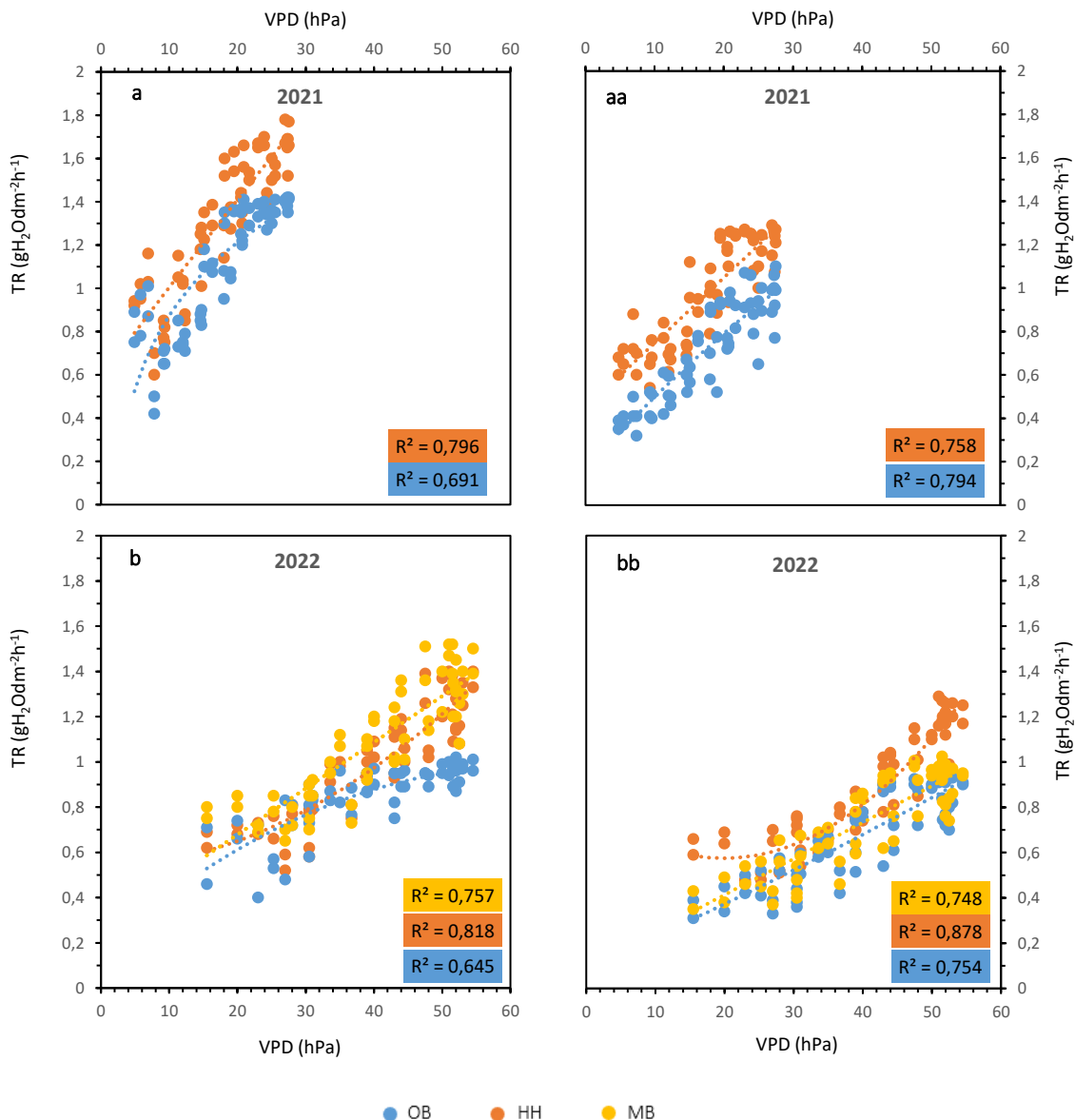


Abbildung 50 Zusammenhang zwischen Transpirationsrate (TR) und dem VPD (Wasserdampf-sättigungsdefizit) im Versuchsjahr 2021 und 2022 (a-bb). Tagesmessung (21. Juli und 15. August 2021; 19. Juli und 04. August 2022) von 08:00 – 22:00 Uhr (a-bb). TR entspricht dem Durchschnittswert aus West- und Ostseiten n = 4 Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang.

Für beide Messkampagnen zeichneten sich Varianten, welche einerseits gezielt bewässert bzw. andererseits im Unterstockbereich bedeckt wurden, als die beste Erhebungsform in Anbetracht bei anwachsendem VPD und der gleichzeitig bestmöglich zu leistenden Transpirationsleistung ab. Insbesondere eine Bewässerung (MB) zeigte bei ansteigendem VPD die besten TR-Werte auf. Nichtbewässerte bzw. nichtbedeckte Rebzeilen wie OB leisteten 2022 unter hiesigen Bedingungen die niedrigsten TR-Leistung, was sich im Stomataschließen der langen Laubwand bemerkbar machte (Abbildung 50b).

5.10 Generative Wuchsleistung in den Versuchsjahren 2021 und 2022

5.10.1 Reifeverlauf: Mostgewicht 2021

Die Reifebeobachtungen im Versuchsjahr 2021 wurden am 09. August begonnen. Alle kurzen Laubwände wurden aufgrund der klimatischen Verhältnisse im Versatz von zwei Wochen (17. Oktober) verspätet geerntet, weshalb in allen langen Laubwandvarianten der Erhebungstermin 10. und 17. Oktober nicht aufgeführt ist. 2021 konnte durchweg eine Zunahme der Oechsle in allen Varianten erhoben werden, bis sich die Oechslezunahme verringerte. In Abbildung 51 sind die Mostgewichtsverläufe dargestellt. Vergleichsweise zu allen langen Laubwandlängen wurden signifikant geringere Mostgewichte in den kurzen Laubwänden erfasst.

Im direkten Vergleich konnten von Messbeginn bis -ende kontinuierliche Mostgewichtsanstiege der langen Laubwände ermittelt werden. Innerhalb dieser wurden die niedrigsten Oechslewerte bis zum Lesezeitpunkt des 03. Oktobers in OB (82° Oe), ansteigend in HH+ (84° Oe) und HH (85° Oe) eruiert.

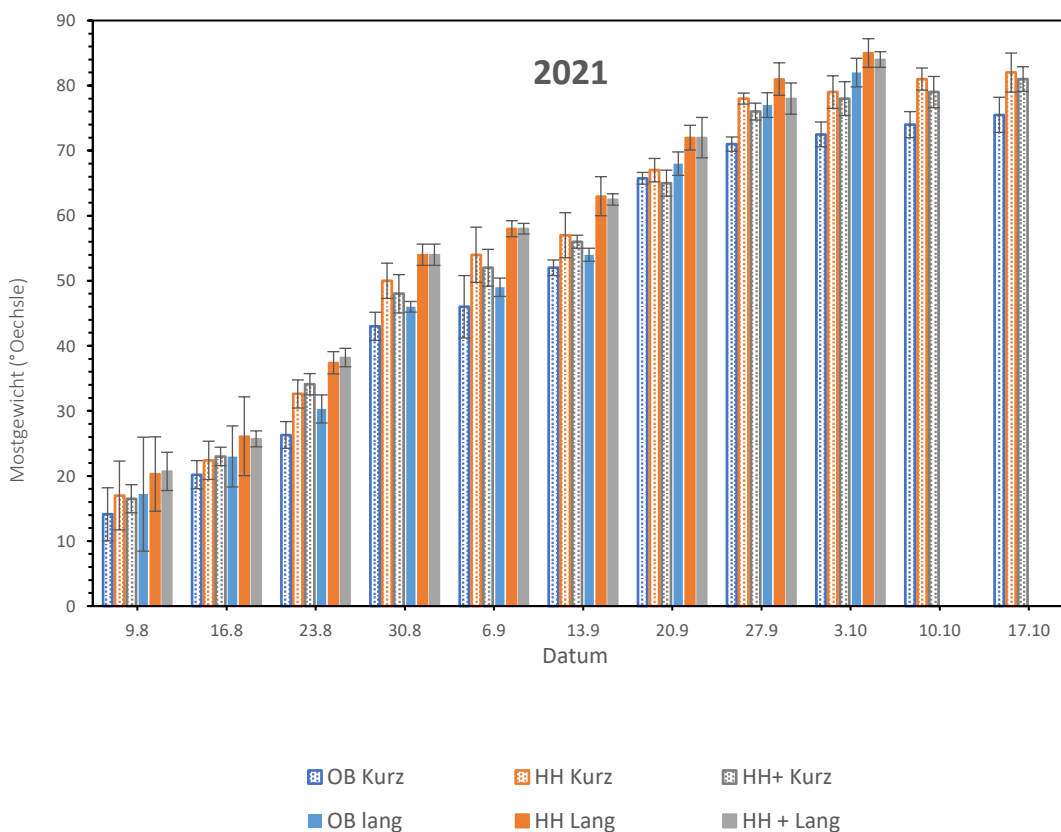


Abbildung 51 Verlauf der Mostgewichtsmessungen (°Oechsle) der jeweiligen Varianten und des Versuchsjahres 2021 während der Reifephase (n = 4; ± Standardabweichung). OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock, HH+ = flächendeckend Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.

Bedingt durch den herabgesetzten Wasserstatus (s. Kapitel 5.2) wurden in OB der langen Laubwand während der Reifephase ab dem 13. September bis zur Lese signifikant niedrigere Mostgewichte gegenüber HH und HH+ bestimmt (Tabelle 9).

Alle eingekürzten Versuchsvarianten verzeichneten einen steilen Anstieg bis zum 27. September, was sich zudem durch signifikant höhere Oechslewerte in HH am 13. ($p = 0,027$) und 27. September ($p = 0,011$) gegenüber der Kontrollvariante ermitteln ließ. Trotz einem minimalen Abflachen der Mostgewichtszunahme bis zum 17. Oktober wurden am 10. ($p = 0,028$) und 17. Oktober ($p = 0,003$) signifikant höhere Mostgewichte in HH als in OB und HH+ erfasst. Werden innerhalb der kurzen Varianten Unterschiede über den gesamten Reifemesszeitraum herausgestellt, so weist HH durchweg bis zur Lese die höchsten Mostwerte auf (82°Oe), gefolgt von HH+ (81°Oe) und OB ($75,5^\circ \text{Oe}$).

Tabelle 9

Übersicht über Mostgewichtsmessungen der einzelnen Varianten ($n = 6$), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, lang = Lange Laubwand, kurz = Kurze Laubwand.

2021																						
Datum																						
	09. Aug		16. Aug		23. Aug		30. Aug		13. Sep		20. Sep		27. Sep		03. Okt		10. Okt		17. Okt			
° Oechsle																						
OB Lang	17,2		23		30,3		46		54	A	77	A	82	AB	82	A	-		-		-	
OB Kurz	14,1		20,2		26,3		43		52	ab	65,75		71		72,5		74	ab	75,5	ab		
HH Lang	20,3		26,1		37,4		54		63	A	72		81	A	85		-		-		-	
HH Kurz	17		22,4		32,6		50		57	a	67		78	a	79		81	a	82	a		
HH+ Lang	20,7		25,7		38,2		54		62,5		72	A	78	B	84	A	-		-		-	
HH+ Kurz	16,5		23		34,1		48		56	b	65		76	a	78		79	b	81	b		
Lang: Signifikanz	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		*		*		**		***		-		-		-	
p	0,287		0,221		0,121		0,196		0,033		0,019		0,007		< 0,001							
Kurz: Signifikanz	n.s.		n.s.		n.s.		n.s.		*		n.s.		*		n.s.		*		*		**	
p	0,311		0,16		0,188		0,191		0,027		0,386		0,011		0,1		0,028		0,003			

Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen den Signifikanzen bei $p < 0,001$, $< 0,01$, $< 0,05$ und nicht signifikant. $P < 0,05$ nach Scheffé-Test. Großbuchstaben stellen signifikante Zusammenhänge innerhalb der langen Laubwand und Kleinbuchstaben innerhalb der kurzen Laubwand zwischen den jeweiligen Varianten dar. Eine Überschneidung der jeweiligen Buchstaben in jeder Spalte stellt die vorherrschende Signifikanz dar; blaue Markierung = kurze Laubwand, gelbe Markierung = lange Laubwand.

5.10.2 Reifeverlauf: Mostgewicht 2022

2022 starteten die Reifemessungen am 25. Juli. Im Vergleich zum Vorjahr rund vier Wochen verfrüht, was den hiesigen klimatischen Bedingungen geschuldet war. Demzufolge ereignete sich ein völlig verändertes Reifeprofil der Beeren. Für 2022 konnte eine Reifeverzögerung von rund zweieinhalb Wochen erzielt werden (14.10). In allen langen Laubwandvarianten ist dementsprechend eine Auflistung der letzten drei Erhebungstermine 3., 10. und 14. Oktober nicht notiert. Eine kontinuierliche Oechslezunahme jeder Varianten wurde über die gesamte Zeitspanne vom 25. Juli bis zum 26. September bzw. 14. Oktober erhoben. Ab dem 15. August wurden signifikant höhere Oechslewerte gegenüber OB bestimmt. Innerhalb dieses starken Trockenstressjahres unterschieden sich MB, HH und HH+ signifikant von der unbewässerten Kontrollvariante. Somit erreichte OB bis zur Lesereife nur ein Mostgewicht von 80,5 °Oe, wohingegen HH ein Mostgewicht von 82,4 °Oe, HH+ ein Mostgewicht von 82,3 °Oe und MB ein Mostgewicht von 83,7 °Oe aufwies (Abbildung 52 und Tabelle 10).

Aufgrund der nicht zunehmenden Oechsle für das kurze Blattwerk fand die Lese am 14. Oktober statt. Bis dato erreichte OB ein Mostgewicht von 78,9 °Oe, HH ein Mostgewicht von 80 °C, HH+ 79,8 °Oe bzw. MB 79,1 °Oe. Es wird ersichtlich, dass eine nicht bedeckte oder bewässerte Variante wie OB oder MB aufgrund der vorherrschenden Hitzeperioden hoch signifikant verminderte Oechsle als HH und HH+ aufweist.

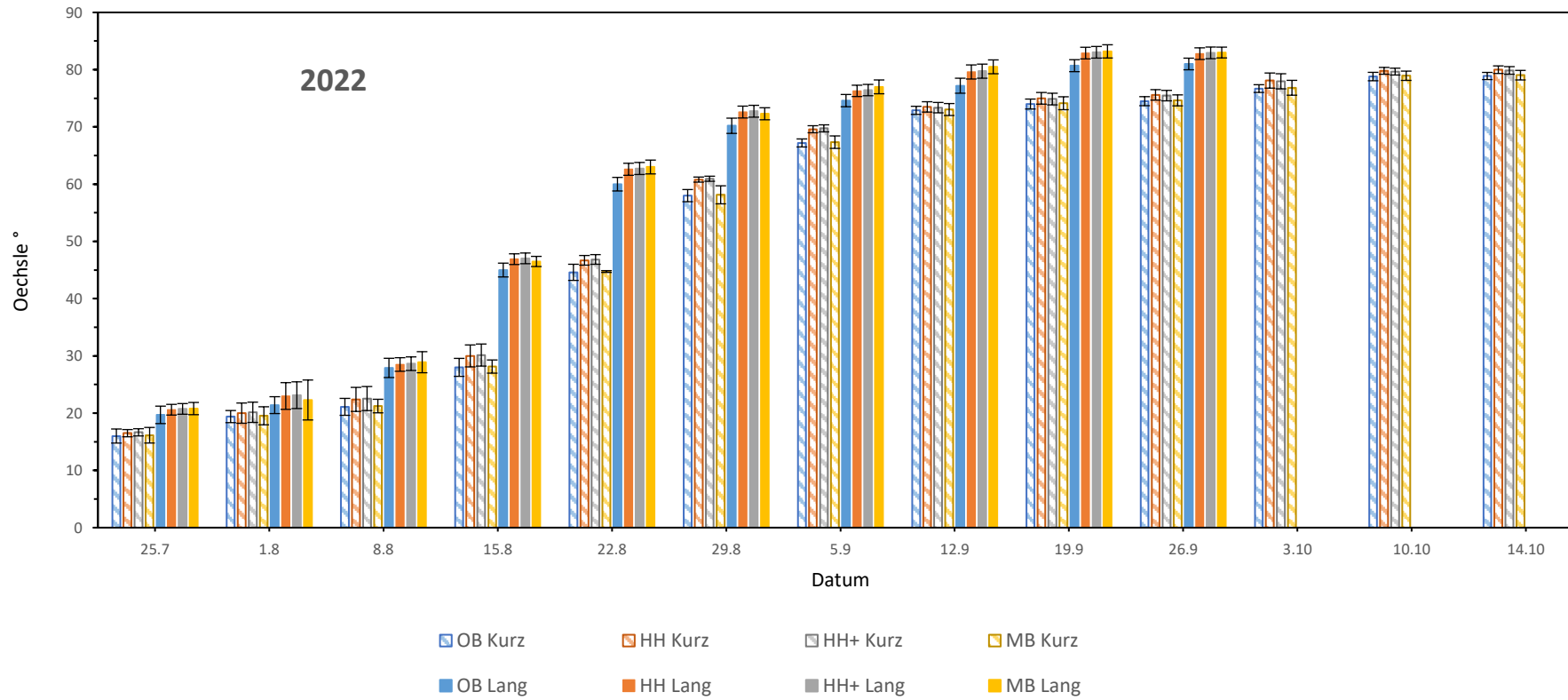


Abbildung 52 Verlauf der Mostgewichtsmessungen der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2022 während der Reifephase ($n = 4$; \pm Standardabweichung). OB = Ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock, HH+ = Holzhäcksel flächendeckend, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.

Tabelle 10

Übersicht über Mostgewichtsmessungen 2022, mittlere Mostgewichte (Oechsle °) der einzelnen Varianten (n = 6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.

2022																							
Datum																							
	25. Jul	01. Aug	08. Aug	15. Aug	22. Aug	29. Aug	05. Sep	12. Sep	19. Sep	26. Sep	03. Okt	10. Okt	14. Okt										
°Oechsle																							
OB Lang	19,7	21,4	27,9	45,0	A	60,0	AB	70,2	CD	74,6	AB	77,2	AB	80,0	CD	80,5	AB	-	-	-	-		
OB Kurz	16,0	19,4	21,1	28,0		44,6		58,0	ab	67,2		72,9		74,0	a	74,5		76,7	a	78,8	ab	78,9	ab
HH Lang	20,6	23,0	28,5	46,9		62,6	A	72,6	BD	76,3	AC	79,6	AC	82,4	BD	82,4	AC	-	-	-	-		
HH Kurz	16,5	20,0	22,4	30,0		46,7	a	60,8	ac	69,6	a	73,5		75,0		75,6	a	78,1		79,8	ac	80,0	ac
HH+ Lang	20,7	23,1	28,6	47,0		62,7		72,7	AC	76,4		79,7		82,2	AC	82,3		-	-	-	-		
HH+ Kurz	16,6	20,1	22,5	30,1		46,8	ab	60,9	bc	69,7		73,3		74,8	a	75,4	a	77,9	a	79,6	bc	79,9	bc
MB lang	20,8	22,3	28,9	46,5	A	63,0	B	72,3	AB	77,0	BC	80,5	BC	83,2	AB	83,7	BC	-	-	-	-		
MB kurz	16,1	19,5	21,3	28,1		44,7	ab	58,3	cb	67,0	a	73,0		74,2	a	74,4		76,8		79,0	cb	79,1	cb
Lang: Signifi- kanz	n.s.	n.s.	n.s.	**	*	***	**	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	-	-	-	-		
p	0,138	0,625	0,584	0,003	0,021	< 0,001	0,004	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	-	-	-	-	-	
Kurz: Signifi- kanz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	***	***	***	***	n.s.	*	**	*	***	***	***	***	***	*	*	*	***	***	***
p	0,535	0,812	0,446	0,22	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	0,072	0,02	0,009	0,01	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001	< 0,001

Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen den Signifikanzen bei $p < 0,001$, $p < 0,01$, $p < 0,05$ und nicht signifikant. $P < 0,05$ nach Scheffé-Test. Großbuchstaben stellen signifikante Zusammenhänge innerhalb der langen Laubwand und Kleinbuchstaben innerhalb der kurzen Laubwand zwischen den jeweiligen Varianten dar. Eine Überschneidung der jeweiligen Buchstaben in jeder Spalte stellt die vorherrschende Signifikanz dar, blaue Markierung = kurze Laubwand, gelbe Markierung = lange Laubwand.

Die Oechslemessungen aus 2021 und 2022 zeigen, dass Versuchsformen, welche einen ausreichenden Wasserhaushalt vorweisen, gleichzeitig eine anwachsende Zuckerproduktion innerhalb der Beeren gewährleisten. Speziell im Jahr 2022 konnte mittels einer punktuellen Bewässerung innerhalb der 1,40 m hohen Rebengassen eine stetig anwachsende Oechslezunahme der Beeren gesichert werden, welche zudem den höchsten Oechslegehalt darstellte. Eine bedeckte Variante wie HH oder HH+ stellte sich als Bindeglied zwischen MB und OB dar. Verringerte Oechsle von 1,5 °Oe wurden hierfür ermittelt. Nichtbewässerte bzw. nichtbedeckte Varianten wie OB konnten aufgrund des geringeren Wasserhaushaltes die entsprechende Zuckerproduktion nicht schritthalten, weswegen eine Minderung von bis zu 5 °Oe hervorging.

Alle verkürzten Rebengassen erreichten bis zum Lesezeitpunkt verminderte Mostgewichte von bis zu 4 °Oe als ihre „langen Gegenspieler“. Ebenfalls zeigte das Einkürzen, dass eine mögliche Bewässerungsmaßnahme, wie sie bereits in MB-Lang vollzogen wurde, nicht relevant war. Folglich lässt sich diese Form mit der Kontrolle OB gleichsetzen. Durch die vollzogene Laubwandeinkürzung konnte eine Reifeverzögerung von bis zu 18 Tagen erzielt werden.

5.10.3 Reifeverlauf: Gesamtsäuregehalt 2021

2021 wurde am 09. August mit der Säurebestimmung begonnen. Grund waren bis zu diesem Zeitpunkt übermäßige Säurewerte aufgrund der unzähligen Niederschlagsmengen, welche erst zu Beginn August eine Abnahme unterhalb von $50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ erkennen ließen. In Abbildung 53 ist der Einfluss der Unterstockabdeckung, der flächendeckenden Holzhäckselabdeckung bzw. der Kontrollvariante auf den Gesamtsäuregehalt im Most im Jahr 2021 dargestellt. Einkürzte Varianten wurden allesamt zwecks klimatischer Bedingungen im Verzug von zwei Wochen (17. Oktober) verspätet gelesen, wodurch in allen langen Laubwandvarianten der Erhebungstermin 10. und 17. Oktober entfällt. 2021 konnte eine Abnahme der Gesamtsäure in allen Varianten von 09. August bis einschließlich 17. Oktober gemessen werden. Wie bereits in den kurzen Varianten wurde zudem in allen langen Laubwänden von Messbeginn bis zur Traubenlese ein Säureabfall erfasst (Abbildung 53).

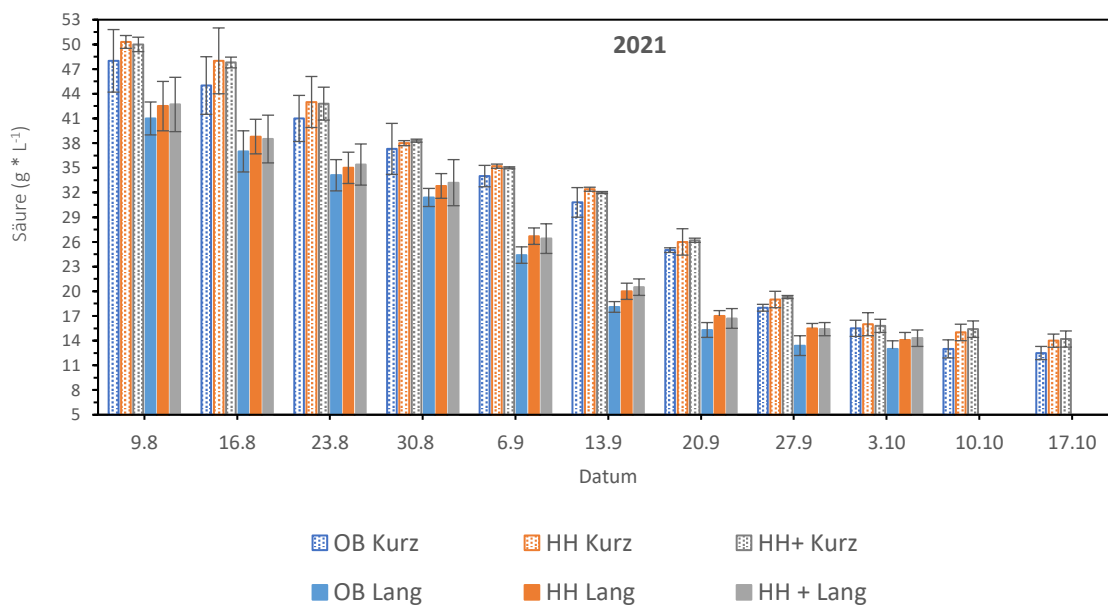


Abbildung 53 Verlauf des Säuregehaltes im Most (gemessen als Weinsäure) der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2021 während der Reifephase. Säure entspricht dem Durchschnittswert aus $(n = 4) \pm$ Standardabweichung. OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckend Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.

Zum Messstart wies HH+ die höchsten Werte ($42,7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), gefolgt von HH ($42,5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) und OB ($41 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$) auf. Die tiefsten Säurewerte wurden bis zur Lese der langen Laubwände (3. Oktober) in OB mit $13 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, anwachsend in HH+ mit $14,1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ und HH mit $14,3 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ bestimmt (Abbildung 53). Wie in jeder verkürzten Unterstock- und flächendeckenden Abdeckvariante zwischen 20. September und 27. September ersichtlich wird, ist der größte Abfall der Säurewerte im langen Blattwerk vom 30. August bis zum 13. September vorzufinden. Innerhalb der langen Varianten konnten über den gesamten Messzeitraum signifikant höhere Säurewerte gegenüber der Kontrolle wie z. B. gegen Ende der Messkampagne 27. ($p = 0,025$) und 03. Oktober ($p = 0,019$) errechnet werden (Tabelle 11).

Alle verkürzten Laubwände zeigen ein Abfallen der Gesamtsäure. Innerhalb der eingekürzten Kontrollvariante ist eine nahezu gleichmäßige Reduzierung der Säure zu erkennen. Sowohl in der Unterstockvariante als auch in der flächendeckenden Abdeckung wurden vom 03. bis 17. Oktober langsam abflachende Säurewerte erhoben (HH: 16 bis 14 g * L⁻¹ , HH+: 15,8 bis 14,2 g * L⁻¹), was sich ebenfalls in der Kontrollvariante bestätigen ließ (OB: 15,5 bis 12,5 g * L⁻¹). Aus Tabelle 11 ist zu erkennen, dass HH und HH+ in diesem Versuchsjahr einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Gesamtsäure hatten. Alle verkürzten Laubfronten erzielten zum Lesetermin deutlich zu hohe Säurewert in allen drei Versuchsvarianten, was den überdurchschnittlichen Wassershaushalt inmitten aller verkürzten Laubfronten demonstriert.

Tabelle 11

Übersicht der Säuremessungen des Versuchsjahres 2021 der einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.

2021											
Datum											
	09. Aug	16. Aug	23. Aug	30. Aug	06. Sep	13. Sep	20. Sep	27. Sep	03. Okt	10. Okt	17. Okt
Säue g*L ⁻¹											
OB Lang	41,0	37,0 AB	34,1	31,4 A	24,4 AB	18,1	15,3	13,4 A	13,0 A	-	-
OB Kurz	48,0	45,0 ab	41,0	37,3 ab	34,0 ab	30,8	25,0 ab	18,0 a	15,5	13,0 ab	12,5 ab
HH Lang	42,5	38,3 A	35,0 A	32,8 A	26,7 A	20,0 A	17,0	15,5 A	14,1 A	-	-
HH Kurz	50,3	48,0 a	43,0	38,0 a	35,2 a	32,4	26,0 a	19,0 a	16,0	15,0 a	14,0 a
HH+ Lang	42,7	38,5 B	35,4 A	33,2	26,4 B	20,5 A	16,7	15,4	14,3	-	-
HH+ Kurz	50,0	47,8 b	42,8	38,3 b	35,0 b	32,0	26,2 b	19,3	15,8	15,4 a	14,2 b
Lang: Signifikanz	n.s.	***	*	*	***	***	n.s.	*	*		
p	0,452	< 0,001	0,032	0,065	< 0,001	< 0,001	0,617	0,025	0,019	-	-
Kurz: Signifikanz	n.s.	**	n.s.	***	***	n.s.	**	*	n.s.	***	**
p	0,114	0,009	0,501	< 0,001	< 0,001	0,381	0,008	0,05	0,541	< 0,001	0,002

Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen den Signifikanzen bei $p < 0,001$, $p < 0,01$, $p < 0,05$ und nicht signifikant. $P < 0,05$ nach Scheffé-Test. Großbuchstaben stellen signifikante Zusammenhänge innerhalb der langen Laubwand und Kleinbuchstaben innerhalb der kurzen Laubwand zwischen den jeweiligen Varianten dar. Eine Überschneidung der jeweiligen Buchstaben in jeder Spalte stellt die vorherrschende Signifikanz dar, blaue Markierung = kurze Laubwand, gelbe Markierung = lange Laubwand.

In Abbildung 54 und Tabelle 12 ist der Einfluss einer moderaten Bewässerung bzw. einer Bodenbedeckung der Kontrolle auf den Gesamtsäuregehalt im Most gegenübergestellt worden. Aufgrund der hohen Lufttemperaturen und der anhaltender Trockenphasen in 2022 war innerhalb der reifenden Monate bei allen Erhebungsformen ein steiler Abfall der Mostsäurewerte zu messen (Abbildung 54). Sowohl im verkürzten als auch langen Blattwerk wurden im gesamten Reifeverlauf zwischen den einzelnen Varianten signifikante Unterschiede festgestellt (Tabelle 12).

Innerhalb der langen Rebengassen erwies sich MB als diejenige, welche aufgrund ihres verbesserten Wasserhaushaltes dem schnellen Abbau, speziell der Apfelsäure¹⁴, entgegenwirken konnte. Dies zeichnete sich durch die hierbei am höchsten erzielten Gesamtsäurewerte ab (Abbildung 54 und Tabelle 12). Durchweg wurden in beiden Laubwandlängen signifikante bis hoch signifikante Zusammenhänge zwischen den gesteigerten Säurewerten in MB, HH, HH+ und der Kontrolle OB ermittelt. Die letzte Reifemessung der kurzen Laubfronten zeigte auf, dass HH und HH+ geringfügig höhere Gesamtsäurewerte von 0,3 bis 0,4 g*L⁻¹ im Most aufwiesen als die gleichnamig zweieinhalb früher gelesenen langen Rebengassen.

¹⁴ Die Apfelsäure bildet neben der Wein-, Bernstein-, Milch und Essigsäure das wichtigste Grundgerüst der Gesamtsäure. Je mehr Wasserstoffionen in einer Konzentration enthalten sind, desto saurer die Substanz. Bei unzureichendem Wasserhaushalt der Reben wird die Apfelsäure zügiger abgebaut und die Milchsäure tritt hierbei in den Vordergrund (Jakob 2012).

5.10.4 Reifeverlauf: Gesamtsäuregehalt 2022

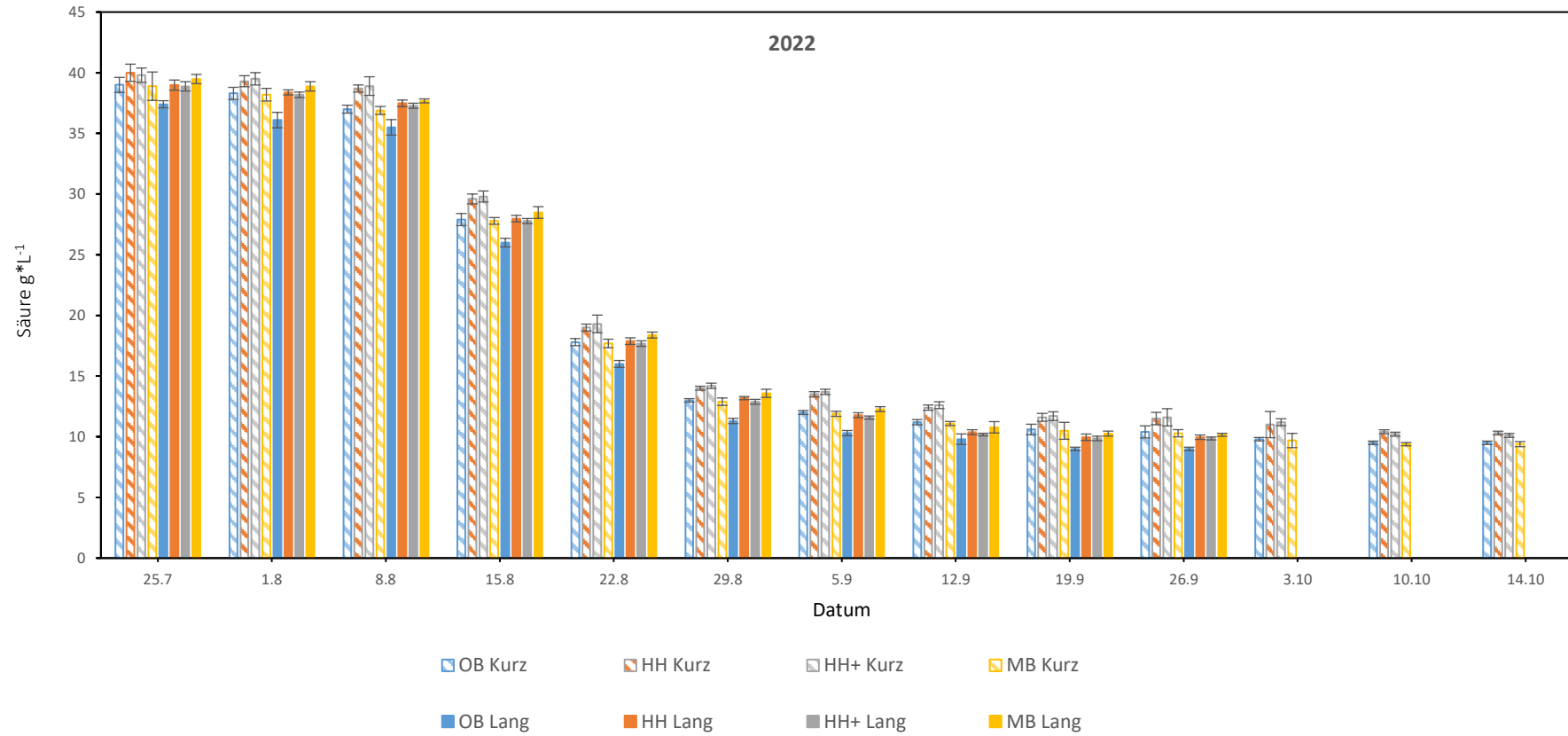


Abbildung 54 Verlauf der Säuremessungen der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2022 während der Reifephase (n = 4; ± Standartabweichung). OB Kurz = Ohne Bedeckung kurze Laubwand, HH Kurz = Holzhäcksel Unterstock kurze Laubwand, HH+ Kurz = Holzhäcksel flächendeckend kurze Laubwand, OB Lang = Ohne Bedeckung lange Laubwand, HH Lang = Holzhäcksel Unterstock lange Laubwand, HH+ Lang = Holzhäcksel flächendeckend lange Laubwand, MB Kurz = moderate Bewässerung kurze Laubwand, MB Lang = moderate Bewässerung lange Laubwand.

Tabelle 12

Übersicht über Säuremessungen des Versuchsjahres 2022, mittlere Säurewerte (Säure g*L⁻¹) der einzelnen Varianten (n = 6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand

2022																										
Datum																										
	25. Jul		01. Aug		08. Aug		15. Aug		22. Aug		29. Aug		05. Sep		12. Sep		19. Sep		26. Sep		03. Okt		10. Okt		14. Okt	
Säure g*L ⁻¹																										
OB Lang	37,4	ABC	36,1	ABC	35,5	CD	26,0	AB	16,0	AB	11,3		10,3		9,8	AB	9,0	A	9,0	CD	-		-		-	
OB Kurz	39,0		38,3	ab	37,0		27,9	ab	17,8	ab	13,0	ab	12,0		11,2	a	10,6		10,4		9,8		9,5	ab	9,5	ab
HH Lang	38,9	A	38,4	A	37,5	BD	27,9	A	17,8		13,2	A	11,7		10,3	A	9,9	A	9,9	BD	-		-		-	
HH Kurz	40,0		39,3	ac	38,7		29,6	ac	19,0	a	14,0	a	13,5	a	12,4	a	11,6		11,5	a	11,0	a	10,4	ac	10,3	a
HH+ Lang	38,8	B	38,1	B	37,3	AC	27,7		17,6	B	12,9	AB	11,5		10,1		9,8	B	9,8	AC	-		-		-	
HH+ Kurz	39,8		39,5	bd	38,9		29,8	bd	19,3	b	14,2	b	13,7	b	12,6		11,7		11,6		11,2	b	10,2	bd	10,1	b
MB lang	39,4	C	38,9	C	37,7	AB	28,4	B	18,3	A	13,5	B	12,2		10,7	B	10,2	B	10,2	AB	-		-		-	
MB kurz	38,8		38,2	cd	36,9		27,7	cd	17,6		12,8		11,9	ab	11,0		10,4		10,2	a	9,6	ab	9,39	cd	9,3	
Lang: Signifikanz	***		***		***		***		***		***		n.s.		*		***		***							
P	< 0,001		< 0,001		< 0,001		< 0,001		< 0,001		< 0,001		0,347		0,015		< 0,001		< 0,001		-		-		-	
Kurz: Signifikanz	n.s.		**		n.s.		***		***		***		***		**		n.s.		**		**		***		***	
p	0,179		0,004		0,851		< 0,001		< 0,001		< 0,001		< 0,001		0,003		0,426		0,005		0,008		< 0,001		< 0,001	

Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen den Signifikanzen bei $p < 0,001$, $< 0,01$, $< 0,05$ und nicht signifikant. $P < 0,05$ nach Scheffé-Test. Großbuchstaben stellen signifikante Zusammenhänge innerhalb der langen Laubwand und Kleinbuchstaben innerhalb der kurzen Laubwand zwischen den jeweiligen Varianten dar. Eine Wiederholung der jeweiligen Buchstaben in jeder Spalte stellt die vorherrschende Signifikanz dar, blaue Markierung = kurze Laubwand, gelbe Markierung = lange Laubwand.

2021 wurden durch übermäßige Niederschlagsmengen und kühlere Lufttemperaturen die Säurewerte langsamer abgebaut als in 2022. Hitze- und Trockenphasen bewirken einen beschleunigten Säureabbau unter gleichzeitig anwachsenden Oechsle der Trauben. Das entsprechende Verhältnis gerät ins Wanken und im späteren Ausbau des Weins kann es zu stark erhöhten Alkohol- und zu niedrigen Säurewerten kommen. Durch eine exakte Bewässerungssteuerung wurden diese Disparitäten ausgeschaltet. Eine natürliche Bodenbedeckung wie HH und HH+ zeigen beachtliche Messergebnisse im Vergleich zu MB. Leicht reduzierte Säurewerte resultierten.

Eine verminderte Laubfront zeigt bis zum Lesezeitpunkt leicht erhöhte Säurewerte gegenüber dem Lesezeitpunkt der langen Laubwand auf, was die Verbesserung des Wasserstatus darstellt. Einem raschen Säureabbau konnte durch einen konstant verbesserten Wasserhaushalt (MB, HH, HH+) entgegengewirkt werden.

5.10.5 Traubenertrag

Abbildung 55 stellt die durchschnittlichen Erträge der individuellen Varianten in den Versuchsjahren 2021 und 2022 dar. Für das Versuchsjahr 2021 sind die Ertragsleistungen aus Abbildung 55a+b, für 2022 aus Abbildung 55aa+bb zu entnehmen. Alle verkürzten Erhebungsvarianten zeigten verringerte Erträge als ihre verlängerten Versuchsformen auf:

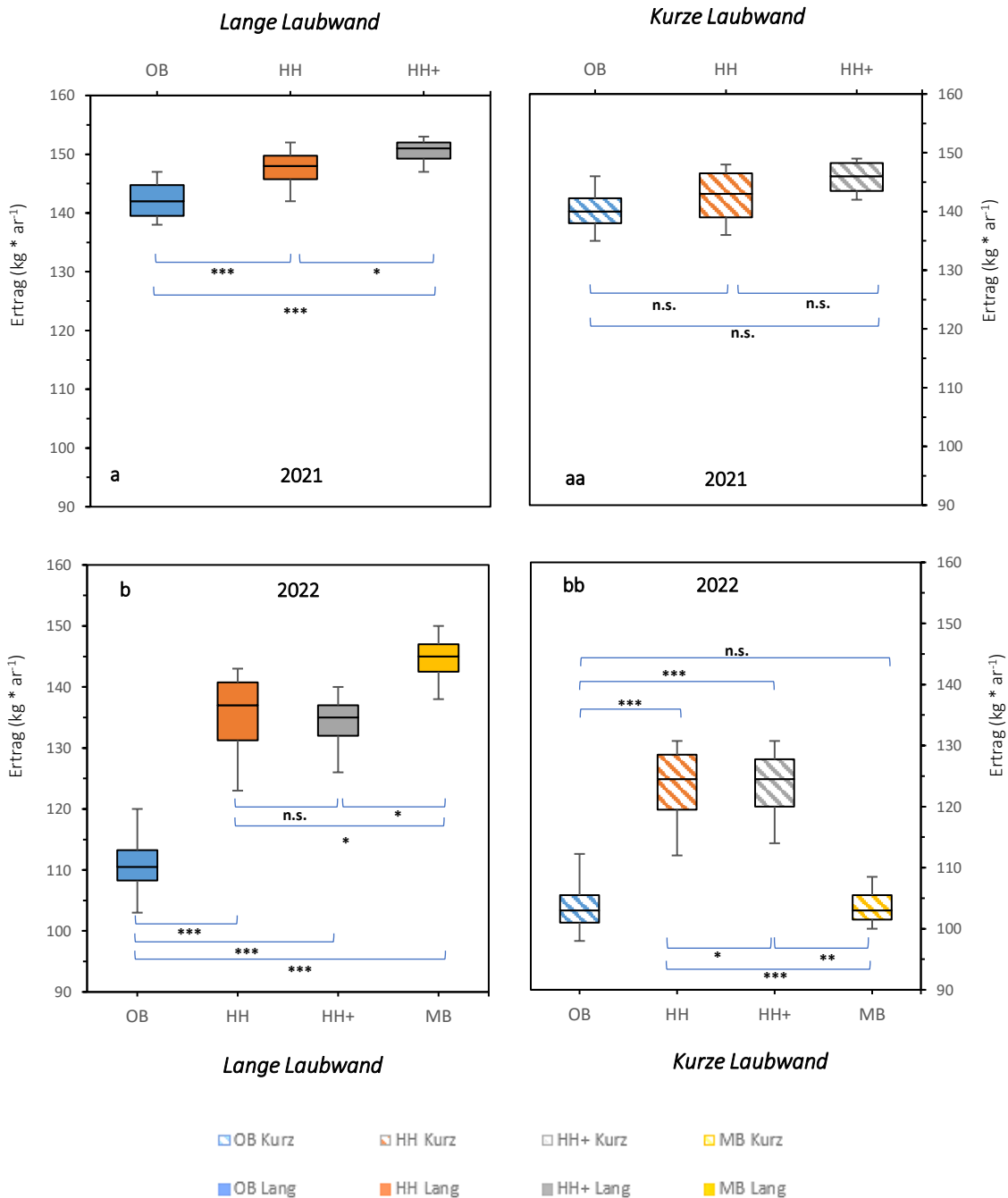


Abbildung 55 Mittlerer Traubenertrag der einzelnen Varianten der Versuchsjahre 2021 und 2022 (a-bb) nach der zu Les (n = 4 ± Standardabweichung); signifikante Unterschiede bei p < 0,001 nach Scheffé Test. Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen Signifikanzen bei p < 0,001, < 0,01, < 0,05 und nicht signifikant OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäckselabdeckung Unterstock, HH+ = Holzhäckselabdeckung flächendeckend, MB = moderate Bewässerung.

Für 2021 und 2022 geht aus Abbildung 55a+b hervor, dass beide Abdeckungsvarianten (HH und HH+) bzw. auch eine punktuelle Bewässerung (MB) signifikant höhere Ertragswerte als die Kontrollvariante (OB) für 1,40 m hohe Rebengassen erzielten. In sowohl HH als auch HH+ wurden 2021 die Erträge um 7 bis 9 kg * ar⁻¹ gesteigert. Im Trockenjahr 2022 entstanden verringerte Ertragsdisparitäten wie folgt: HH = 27 kg * ar⁻¹, HH+ = 25 kg * ar⁻¹ und in MB = 45 kg * ar⁻¹ im Vergleich zu OB. In der Kontrollvariante wurde 2021 ein Ertrag von 138 kg * ar⁻¹, 2022 ein Ertrag von 110,5 kg * ar⁻¹ gemessen. In beiden Erhebungsjahren wurden zwischen der Kontrolle und den bedeckt/bewässerten Formen hoch signifikante Ertragsunterschiede ermittelt. In der rechten Hälfte der Abbildung 55aa+bb ist als Gegenstück das verkürzte Blattwerk dargestellt.

Vergleichsweise zur langen Laubwand konnte zwischen HH, HH+ und OB kein statistisch signifikanter Traubenertrag bestimmt werden. Für 2022 hingegen wurden hoch signifikante Unterschiede zwischen den Abdeckungsvarianten gegenüber der nicht bedeckten- bzw. bewässerten Varianten OB und MB erhoben. Erträge von bis zu 18 kg * ar⁻¹ resultierten zwischen bedeckten- und nichtbedeckten/bewässerten Varianten (Tabelle 13).

*Tabelle 13 Übersicht über Traubenertrag (kg * ar⁻¹) der Versuchsjahre 2021 und 2022 für einzelne Varianten (n = 6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand*

	Versuchsjahr	
	2021	2022
Gewicht kg * ar ⁻¹		
OB Lang	138 kg * ar ⁻¹	110 kg * ar ⁻¹
OB Kurz	135 kg * ar ⁻¹	105 kg * ar ⁻¹
HH Lang	145 kg * ar ⁻¹	137 kg * ar ⁻¹
HH Kurz	141 kg * ar ⁻¹	127 kg * ar ⁻¹
HH+ Lang	147 kg * ar ⁻¹	135 kg * ar ⁻¹
HH+ Kurz	144 kg * ar ⁻¹	124 kg * ar ⁻¹
MB lang	-	145 kg * ar ⁻¹
MB kurz	-	107 kg * ar ⁻¹

Varianten mit unzureichender Wasserversorgung wie OB in Hitzejahren (2022) erbrachten verminderte Mengenerträge und die daran gekoppelten Synergieeffekte wie minimiertere Oechsle- und Säuregehalte gingen hervor. Das bläuliche Färben der Trauben bis hin zum Einschrumpeln und Vertrocknen der Beeren sind die „Endstufe“ dieser Symptome (vgl. Abbildung 31 Kap. 5.2).

Innerhalb der halbierten Blattfronten sind keine visuellen Unterschiede bzw. Trockenstr esssymptome wie innerhalb der langen Laubfront (OB) zu verzeichnen. Aus Abbildung 56 geht hervor, dass lediglich für OB im langen Blattwerk ein Wassermangel zum Eintrocknen der Beeren und folglich zu einer verminderten Entwicklung der Beeren

fürte. Reduziertere Traubengewichte resultierten. Varianten mit einem soliden Wasserhaushalt wie HH, HH+ und MB zeigen eine größere Traube mit einer gesteigerten Anzahl an Beeren als OB. Für das kurze Blattwerk kann festgehalten werden, dass bedeckte Versuchsformen (HH und HH+), welche zugleich den verbesserten Wasserhaushalt belegen, das höchste Traubengewicht ermitteln lassen. Dies lässt sich anhand der abgelichteten Trauben bestätigen (Abbildung 54).

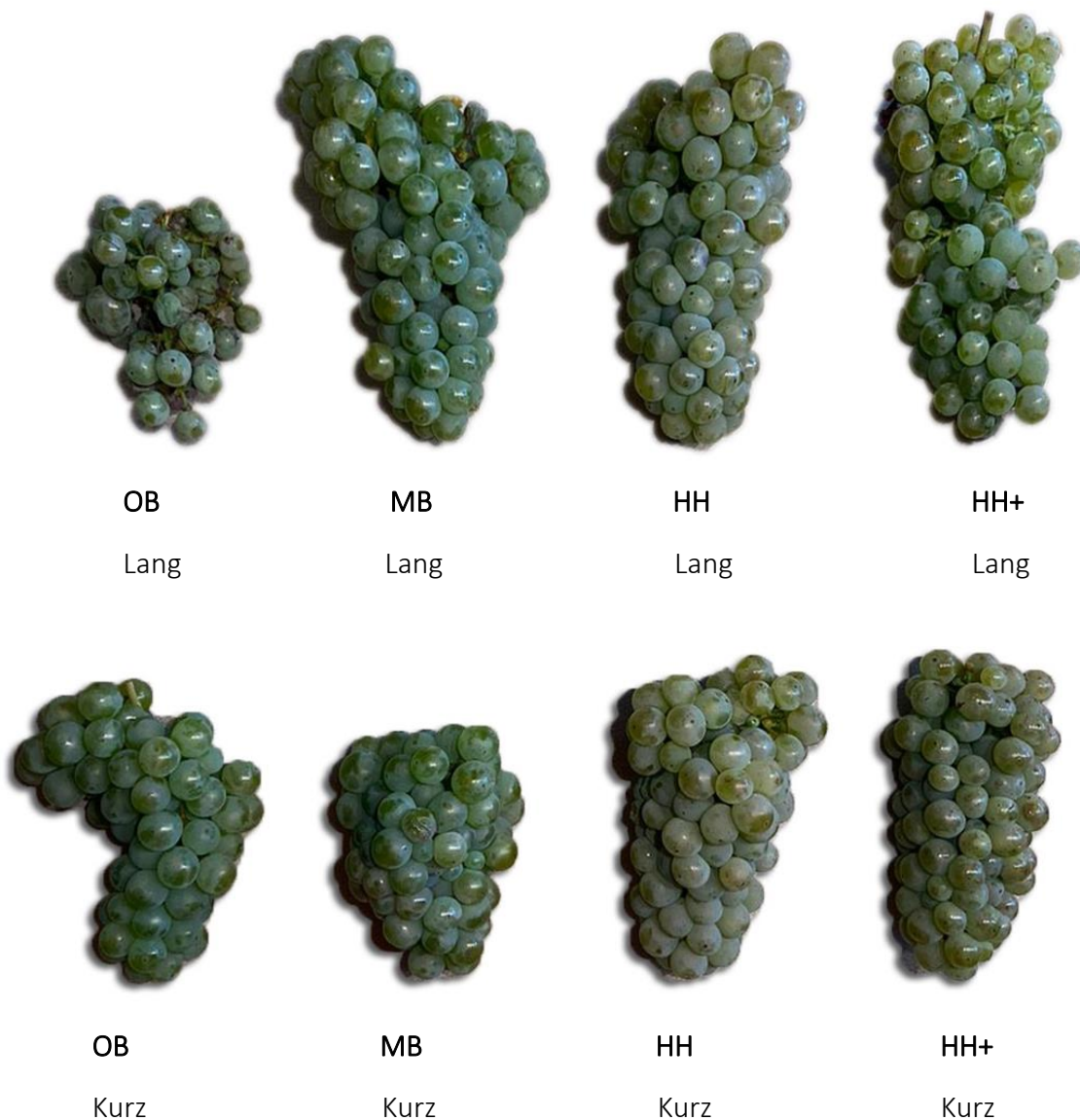


Abbildung 56 *Beerenvarianten der langen und kurzen Laubwand: OB (ohne Bedeckung), MB (moderate Bewässerung), HH (Holzhäcksel Unterstock), HH+ (flächendeckend Holzhäcksel), [Eigene Darstellung 2022].*

Eine gezielte Bewässerung erzielte die höchsten Traubenerträge. Die gegenüberzustellende Unterstockabdeckung hatte verringerte Erträge von $8 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ erbracht. Generell lässt sich eine Bodenbedeckung wie HH als eine deutlich verbesserte Möglichkeit in Sachen Wasserhaushalt gegenüber der Kontrolle (MB) darstellen, was sich letzten Endes im verbesserten Traubenertrag niederschlägt.

5.11 Vegetative Wuchleistung zwischen 2021 und 2022

Abbildung 57 stellt die Kennzeichnung des vegetativen Wachses der Schnittholzgewichte¹⁵ der einzelnen Varianten für die Versuchsjahre 2021 und 2022 dar. Deutlich ist für beide Versuchsjahre das Verhältnis zwischen den unterschiedlichen Erhebungsvarianten und den verschiedenen Laubwandlängen zu erkennen.

Es ist ersichtlich, dass im Erhebungsjahr 2021 (Abbildung 57a) durch eine Unterstockabdeckung (HH) bei beiden Laubwandlängen, HH kurz ($27,90 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) und HH lang ($31,20 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) das vegetative Wachstum der Rieslingreben in direkter Gegenüberstellung zur Kontrollvariante, OB kurz ($22,45 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) und OB lang ($29,80 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$), erhöht wurde. Singifikante Unterschiede lassen sich für 2021 zwischen der Kontrolle und einer bedecketen Holzhäckelvariante aus Abbildung 57a entnehmen. Darüber hinaus erzielte eine flächendeckende Bedeckung nochmals geringfügig gesteigererte Schnittholzgewichte als die der Unterstockvariante sowohl für lange als auch kurze Varianten.

Durch den spürbaren Trockenstress im Versuchsjahr 2022 musste die Bewässerungsvariante MB öfter bewässert werden, was dem Wasserhaushalt im langen Blattwerk ein höheres Wasserniveau verschaffte. Die Auswirkungen der häufigeren Wassergaben lassen sich in den Unterschieden der Holzerträge der Bewässerungsvariante der langen Laubwand im Vergleich zur unbewässerten Kontrolle bzw. der mit Holzhäckseln bedeckten Formen erkennen (Abbildung 57b). Tendenziell wurde im Mittelwert durch die sechsmalige Bewässerung ($30,5 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) der Schnittholzertrag im Vergleich zur Kontrollvariante ($27 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$), zur Unterstock- ($29,1 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) und zur flächendeckenden Variante ($28,85 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) angehoben. Alle Varianten unterschieden sich inmitten ihrer Mittelwerte signifikant von der Kontrolle (Abbildung 57b). Lediglich die flächendeckende- und die moderate Bewässerungsform zeigten gering signifikante Gewichtsunterschiede auf. Alle anderen errechneten Signifikanzkombinationen ergaben keine Signifikanzen. Mit Betracht der kurzen Laubwände zeigten sowohl HH ($26,8 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) als auch HH+ ($27,2 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) höhere Schnittholzgewichte im Vergleich zu OB ($24 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) und MB ($24,1 \text{ kg} \cdot \text{ar}^{-1}$) auf. Die Gewichtsmittelwerte unterschieden sich zwischen der bedeckten- bzw. nicht bedeckten/bewässerten signifikant voneinander (Abbildung 57b).

¹⁵ Das Schnittholzgewicht ist ein Indikator für die Ertragsfähigkeit bzw. Wüchsigkeit eines Rebstocks. Ein hohes Holzgewicht stellt eine verbesserte Wuchskraft dar. Geringe Schnittholzgewichte zeigen hingegen eine schwache Wuchskraft, bspw. durch Stressprobleme, auf (Tischelmayer o.A.b).

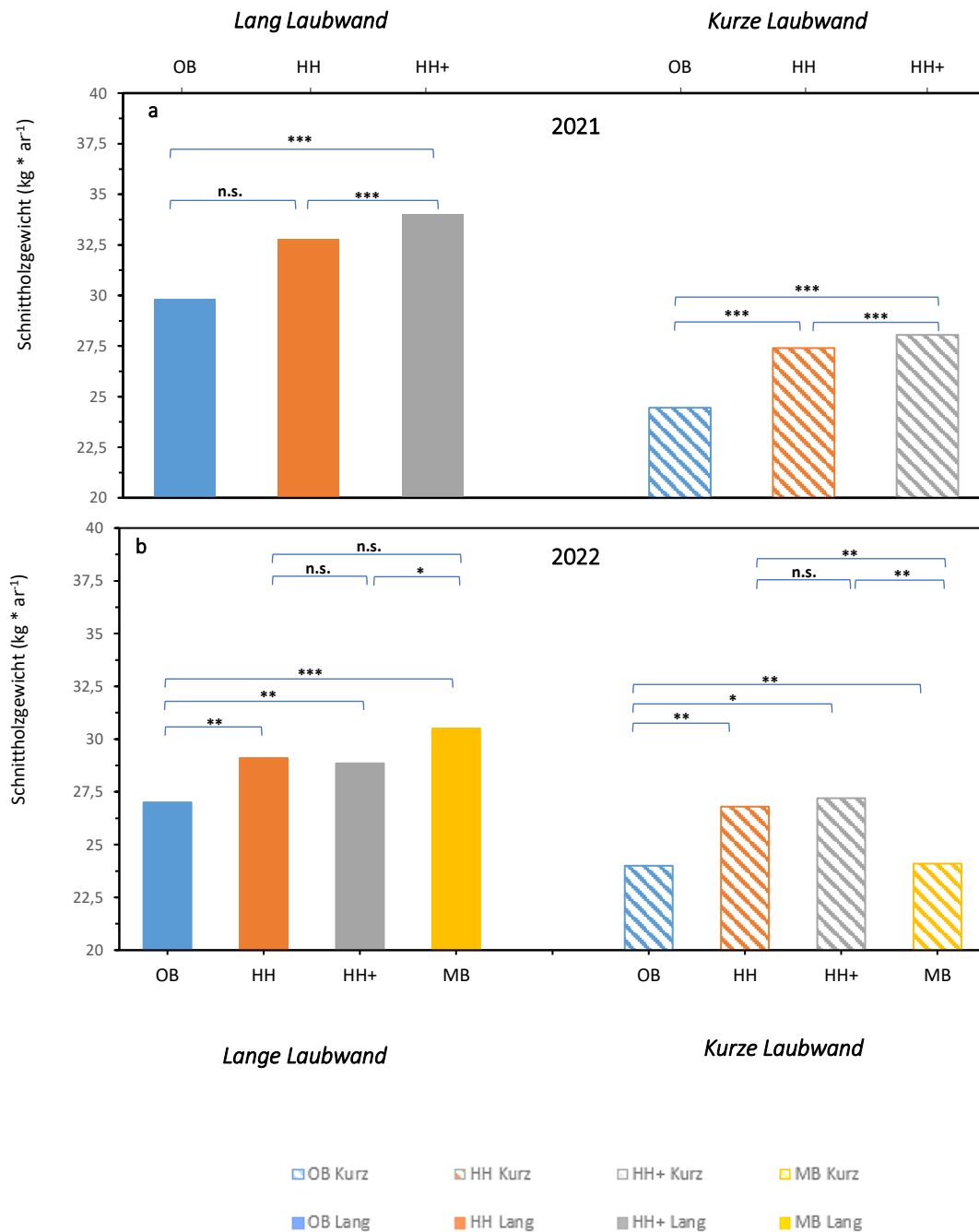


Abbildung 57

Durchschnittliche Schnittholzgewichte der einzelnen Varianten der Versuchsjahre 2021 und 2022 (a-bb) während des Rebschnittes im Dezember ($n = 30$; \pm Standardabweichung); unterschiedliche Sterne zwischen den Varianten innerhalb einer Variante entsprechen signifikanten Unterschieden bei $p < 0,05$ nach Scheffé-Test. Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen Signifikanzen bei $p < 0,001$, $< 0,01$, $< 0,05$ und nicht signifikant OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäckselabdeckung Unterstock, HH+ = Holzhäckselabdeckung flächendeckend, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand

Analog zum Versuchsjahr 2021 zeigte 2022 eine moderate Bewässerung bzw. eine mit Holzhäcksel bedeckte Versuchsform einen deutlichen Einfluss auf den Anstieg des vegetativen Wachstums der Rieslingreben. Darüber hinaus brachten verringerte Laubhöhen ein reduzierteres Schnittholzgewicht mit sich.

6. Kritische Reflexion

Der vom Menschen verursachte Klimawandel beeinflusst sowohl langfristige Klimaprozesse, als auch das aktuelle, kurzfristige Wettergeschehen in allen Regionen der Erde. Er äußert sich in einer Vielzahl an Phänomenen, die sich je nach Klimagebiet unterschiedlich manifestieren lassen und divergierende Auswirkungen mit sich bringen.

Dieses Forschungsvorhaben beschäftigte sich mit dem Wasserhaushalt von Weinreben im Rahmen des rezenten Klimawandels. Ziel des Projektes war es, mittels meteorologisch-hydrologischer Messgrößen ein Messkonzept zu generieren, welches auf alle Weinbauregionen in Rheinland-Pfalz übertragen werden kann, um Winzer*innen die Möglichkeit zu eröffnen, auf natürlicher Art und Weise der Rebe Wasser zugänglich zu machen. Zu diesem Zweck wurde im Versuchsjahr 2021 und 2022 an jeweils sechs Reben pro Versuchsvariante das Ψ_{pd} und Ψ_{stem} mithilfe der Scholander-Druckkammer gemessen. Zusätzlich wurden die ermittelten Wasserpotentialwerte auf Grundlage von viertelstündigen Mittelwerten mit den am Standort erhobenen meteorologischen Daten korreliert. Vergleichende Messungen von bereits etablierten direkten (Wasserpotentialmessung) und indirekten Trockenstressmessungen (Bodenfeuchtigkeit) wurden zudem in Verbindung gebracht. Da vorherrschende Witterungsbedingungen die Messwerte der mittäglichen Potentialmessungen beeinflussen können, wurden diese mit dem VPD der Luft- und oberflächigen Blatttemperatur in Zusammenhang gebracht. Das frühmorgendliche Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) und mittägliche Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) wurde ab dem Austrieb (BBCH 10-19) im Dreitagesrhythmus bis zur Lese ermittelt. Die Versuchsfläche ist in vier verschiedene Parzellen unterteilt worden, in welchen jeweils die Selektierung zwischen normaler (1,40 m) und halbiertes (0,70 m) Laubwandhöhe vorgenommen wurde. Der Beginn einer moderaten Bewässerung ab einem Bewässerungsschwellenwert für Rieslingreben ist ab -0,30 MPa realisiert worden, gemessen als Ψ_{pd} .

Mit Berücksichtigung des Stammwasserpotentials lässt sich hierbei der Bewässerungsschwellenwert bei -1,2 MPa definieren. Aufgrund einer festinstallierten Wetterstation in der Versuchsfläche war es möglich, auf aktuelle Klima-/ Wetterdaten zuzugreifen. Parallel hierzu wurde die Bodenfeuchte mittels wöchentlicher Tiefenbohrung und Messsonde in unterschiedlichen Bodenabschnitten untersucht (FDR-Methode). Mit Beginn der Reife sind zusätzlich die Oberflächentemperatur (Boden-, Blatt- und Beerentemperatur) mittels Infrarotkamera erhoben worden. Durch die Erfassung der Blatttranspirationsrate (nach Stocker) aller Versuchszeilen und der zusätzlichen Unterscheidung zwischen Ost- und Westseite sollten mithilfe von Tagesmessungen der jeweilige Transpirationsverlauf ermittelt werden. Zu den Begriffen der generativen und vegetativen Wuchsleistung zählen die Gesamtsäure, Oechsle, Traubenertrag aber auch das Schnittholz, welche in der Projektdurchführung mit untersucht wurden. Im Erhebungsjahr 2021 konnte keine moderate Tropfbewässerung (MB) durchgeführt werden, aufgrund der nicht bedrohlichen Bodenfeuchte- und Blattwasserpotentialwerte, welche sich demzufolge nicht im zu bewässernden Schwellenwert befanden. Aus diesem Grund wurde die Variante „Flächendeckende Holzhäckselabdeckung (HH+)“ in verschiedenartige Auswertungskapitel

aufgenommen, welche 2022 durch die Variante „Moderate Bewässerung (MB)“ teilweise ersetzt wurde.

Frühmorgendliches Blattwasserpotential in Verbindung mit der Bodenfeuchte

Mit stetig fortschreitender Austrocknung des Bodens konnte im Versuchsfeld in den Erhebungsjahren 2021 und 2022 ein Abfall der Ψ_{pd} -Werte ermittelt werden. Unzählige Niederschlagsereignisse ließen 2021 die Wassergehalte ansteigen, was sich bspw. in einem Ausgangsniveau der θ_v in langen Laubwänden wie OB (24,1 %), HH (26,6 %), HH+ (26,8 %) am 14. Juli bis zum Messende in OB (23,6 %), HH (23,4 %), HH+ (24,2 %) in 1,00 m Tiefe ermitteln ließ. 2022 war durch extreme Hitzephasen geprägt, was mit maximalen θ_v -Werten zum Vegetationsbeginn erfasst wurde: OB (21,5 %), HH (26,55 %), HH+ (23,15 %), MB (21,55 %). Bis zum Monatsbeginn September sank in allen Varianten das θ_v -Niveau um 1/3 ab, ehe langersehnte Niederschläge fielen. Was 2021 noch durch fallende Niederschläge innerhalb der Vegetationsperiode relativiert wurde, zeigte 2022 seine deutlichen Auswirkungen in Sachen Bodenaustrocknungen mit den tiefsten Werten:

2021 OB (-0,26 MPa) HH (-0,19 MPa), HH+ (-0,18 MPa)

2022 OB (-0,41 MPa) HH (-0,29 MPa), HH+ (-0,28 MPa), MB (-0,34 MPa)

Die deutlich tiefsten Ψ_{pd} -Werte konnten in der unbewässerten/-unbedeckten Kontrollvariante (OB) gemessen werden. Mittels sechsmaliger-gezielter Bewässerungsmaßnahmen wurde 2022 ein immer wieder tieferes Absinken des Ψ_{pd} verhindert. Alle reduzierten Laubfronten befanden sich weder 2021 noch 2022 im Trockenstress. Dies lässt sich mit dem verminderten Blattaufkommen inmitten der Laubwände erklären, woraus eine geringere Wasserbeanspruchung der Reben resultiert. Teilmessungen des Ψ_{pd} und die des θ_v erbrachten in beiden Erhebungsjahren einen hoch signifikanten Zusammenhang (s. Kap. 5.2.3). Im Versuchsfeld konnte ein Vermindern der Ψ_{pd} -Werte bei sich gleichzeitig vermindernenden θ_v -Werten erhoben werden. Ein sich ähnelndes Ergebnisbild zeigen Myburgh (2011); Pellegrino et al. (2004), welche gleichermaßen einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen sich verringernenden θ_v und niedrigeren Ψ_{pd} ermittelten. Die hierbei sehr hohe Korrelation der beiden Versuchsvariablen bestätigt, dass das Ψ_{pd} dem Ψ_{soil} gleichgültig ist (Schultz 2003a). Versuchsergebnissen zufolge ist das Ψ_{pd} ein Indiz für die trockensten Bodenbereiche (Breda et al. 1995) bzw. steht das Ψ_{pd} mit dem Ψ_{soil} im Gleichgewicht (Maertens et al. 1981).

Als Gegenpart lassen sich die geringeren Zusammenhänge von $R^2 = 0,521$ zwischen Ψ_{pd} und Ψ_{soil} von Williams und Trout (2005) erwähnen.

Blattnitratstielkonzentration

Auch wird in der Literatur bisher nur sehr unzugänglich darüber Auskunft gegeben wie die Blattstielnitratkonzentration sich über eine gesamte Vegetationsperiode verhält. Für die Interpretation der Ergebnisse ist dies allerdings von wichtiger Bedeutung. Die vom DLR Rheinpfalz beschriebene Messmethode wurde bis dato nicht mit statistisch gesicherten Aussagen mit Blick auf einen verlängerten Messzeitraum gesichert. Eine Messkampagne über eine gesamte Vegetationsperiode hingegen, dies haben die Auswertungen

dieser Arbeit gezeigt, ermöglichen es, detaillierte Aussagen über den Nitratgehalt im Blattstiel treffen zu können unter Berücksichtigung des örtlichen Wasserstatus und folglich einer variierenden Nährstoffzufuhr zum Blatt.

Mit zunehmender Austrocknung der Bodenschichten ging sowohl in der ersten als auch zweiten Nitrataufnahmephase eine verringerte NO_3 -Konzentration inmitten des Blattstiels einher. Lange als auch kurze Laubwände aller Varianten zeigten sehr gute Zusammenhänge ($R^2 = 0,710 - 0,865$). MB-lang lässt sich mit einer Korrelation von $R^2 = 0,526$ aufzeigen, was allerdings der immer wieder durchgeführten Bewässerungsmaßnahme geschuldet ist (s. Kap. 5.3). Die Verfügbarkeit von Stickstoff für die Weinrebe steht mit der Wasserversorgung des Bodens in enger Verbindung, da einerseits für eine Stickstoffmineralisation Photosynthese, Transpiration als auch für den Massenfluss zum Wurzelwerk Wasser erforderlich sind (Marschner und Marschner 2012). Der zeitliche Verlauf der Stickstoffaufnahme ist bei Reben von großer Bedeutung, was mit Beginn des Austriebes der Reben einhergeht (Löhnertz 1988). Innerhalb dieses Vegetationsabschnittes existieren zwei Aufnahmemaxima, welche sich zwei Wochen nach der Blüte und wiederum zwei Wochen nach Erreichen des Reifebeginns feststellen lassen. Forschungsergebnisse von Löhnertz (1988) ergaben herabgesetzte und gleichmäßigere Nitratkonzentrationsverläufe in der Rebe. Rupp et al. (1995) bestätigen hingegen, dass die zeitliche Bereitstellung von Stickstoff unter einer kontinuierlichen Dauerbegrünung dem Bedarf der Reben entgegenläuft. Bei reichlicher Bodenfeuchte mithilfe mechanischer Bodenbearbeitungsmaßnahmen wird eine bedarfsgerechte Stickstofffreisetzung impliziert (Fox und Rupp 1999; Arbeitskreis Begrünung im Weinbau 1998a; Perret et al. 1989).

Stammwasserpotential unter klimatischen Bedingungen

Darüber hinaus wurden für 2021 und 2022 zwischen Ψ_{stem} und den klimatischen Parametern wie der Lufttemperatur und dem VPD hoch signifikante Beziehungen erhoben (s. Kap. 5.4). Lediglich die Gegenüberstellung mit der örtlich vorherrschenden Globalstrahlung brachte keine in Verbindung stehenden Erkenntnisse für alle Varianten und Laubwandlängen ($R^2 = 0,245 - 0,424$). Nach Choné et al. (2001b) ist das Ψ_{stem} ein Konglomerat aus der hydraulischen Leitfähigkeit zwischen dem Messpunkt und Boden, der Blatttranspirationsleistung einer Rebe und dem Ψ_{soil} . Infolgedessen wird das Ψ_{stem} der aufgewendeten Kraft gleichgesetzt, mit welcher die Rebe das verfügbare Wasser vom Boden in die Atmosphäre befördert. Weitere Erkenntnisgewinne der beiden zuvor genannten Forscher brachten enge Zusammenhänge zwischen klimatischen Parametern wie der Lufttemperatur und dem Ψ_{stem} ($R^2 = 0,91$). Ein Abflachen des Ψ_{stem} bei VPD-Werten >15 hPa wurde bei Heßdörfer (2015) ermittelt. Dieser Schwellenwert konnte für diese Arbeit nicht bestätigt werden. Eine Stagnation des Ψ_{stem} wurde hingegen erst > 25 hPa erzielt.

CO₂- Blattaufnahme

Dem örtlichen Wasserstatus kommt eine entscheidende Rolle in Sachen Zellatmung zu. Es konnte gezeigt werden, dass bei mittäglich maximaler Lichtintensität eine höchstmögliche CO₂- Aufnahme in Varianten wie MB und HH gewährleistet werden kann, in welchen ein maximal moderater Trockenstress vorherrschte. Wasserknappheit in OB verursachte 2022 ein Schließen der Stomata zum Schutz der Austrocknung. Die Verringerung bzw.

Beendigung der Photosynthese resultierten. Trockenstresssymptome wie Blattwelken und das zusätzliche Eintrocknen der Beeren folgten (s. Kap. 5.5). 2008 konnte Knoll den Einfluss der Wasserversorgung auf die Photosyntheseleistung und folglich auf die CO₂-Aufnahme mit korrespondierenden Messwerten belegen.

Oberflächentemperaturen im Tagesverlauf

Ein weiteres Beispiel dafür, wie sich meteorologische Verhältnisse auf den Wasserhaushalt der entsprechenden Varianten auswirken, wurde mittels 24 h Tagesmessungen bestimmt. 2021 zeigte HH aufgrund seiner Bedeckung im Unterstockbereich eine verringerte Bodenoberflächentemperatur von ca. 15 K, 2022 bis zu 30 K Oberflächentemperaturdifferenzen wie z.B. des Bodens im Vergleich zu nichtbedeckten Unterstockformen (OB, HH+ und MB) auf. Vergleichbare Effekte erzielte Keller (1999) mittels eines mit Folien bedeckten Unterstockbereichs. Einen erstaunlichen Temperatureffekt ergab die oberflächigen Beerentemperaturanalyse. In beiden Erhebungsjahren zeigte HH sowohl im langen als auch kurzen Blattwerk die höchstmöglichen Beerenhauttemperaturen aller Versuchsformen auf (s. Kap. 5.6.2). Dass diese Messergebnisse kein Zufall inmitten dieser Messkampagne waren, zeigen Temperaturunterschiede der Beerenschalen von bis zu 5 K im Jahr 2000 am Standort Assmanshausen von Fricke durch Folienabdeckung.

Mit Blick auf die Oberflächentemperatur der Beeren der Laubwandhöhen zeigten verkürzte Laubwände bei der Rebsorte Riesling in der Versuchsfläche „Johannitergarten“ des DLR Rheinpfalz ebenfalls marginal erhöhte Beerenhauttemperaturwerte auf als deren Gegenspieler der langen Laubwände. Petgen und Rau (2014) nennen hierbei die erhöhten Lufttemperaturen hinter der verdichteten Laubwand bei starkem Sonnenschein als Beweggrund. Sacks et al. (2010) bestätigen ebenfalls diesen Temperatureffekt. Verringerte Beerenhauttemperaturen bei stärkerer Beschattung, wie es inmitten aller kurzen Laubwände vorzufinden war, konnte wie bei Smart (1985) nicht bestätigt werden.

Mit Betracht auf das vorletzte der vier erhobenen Parameter in Sachen Oberflächentemperaturen zeichnete sich in 2021 HH und HH+ als Versuchsform mit den kühlest Blattoberflächentemperaturen sowohl im langen als auch kurzen Blattwerk aus. 2022 triumpierte Variante MB, gefolgt von HH und HH+ als kühlest Erhebungsform. Dies zeigt eindeutig, dass sowohl eine natürliche Bedeckung im Unterstockbereich/flächendeckend als auch eine exakt-gesteuerte Bewässerung den Atmungszyklus des Blattes, definiert durch die Aktivität der Stomata und folglich einer kontinuierlichen Aufnahme an CO₂, dem Stattfinden der Transpiration und letzten Endes dem damit verbundenen Kühlungseffekt, günstig beeinflusst. Zufferey et al. (2015) und Knoll (2008) ermittelten zudem höhere Oberflächentemperaturen der Blätter bei schlechtversorgten und niedrigeren Blattoberflächentemperaturen bei gut versorgten Reben bezüglich des Wassers. Alle kurzen Laubwände zeigten minimal erhöhte Temperaturwerte gegenüber der langen Laubfronten auf. Der Grund liegt hierbei in der verschlechterten Zirkulation inmitten der Laubwand, was durch eine Entblätterung der langen Laubwände zur verbesserten Durchlüftung führte. Dies bringt allerdings auch den Nachteil mit sich, dass alle Reben der 1,40 m hohen Rebengassen aufgrund der verbesserten Windzirkulation gezwungen werden, den Abtransport der Wassermoleküle wieder „aufzufüllen“. Das kontinuierliche Nachliefern an benötigtem

Wasser zur Aufrechterhaltung der Zellatmung und schließlich auch zur Kühlung der Blätter bedeutet einen ausreichenden Wasserspeicher inmitten jeder Variante bereitzustellen. MB, HH und HH+ waren diesem Prozess gewachsen.

Die Oberflächentemperaturen innerhalb der Laubwand definierte sich als vierter und letzter Untersuchungsbaustein der Oberflächentemperaturen. Variante HH zeigte in beiden Jahren leicht erhöhte Blattoberflächentemperaturen im langen und kurzen Blattwerk. Konstant waren Temperaturunterschiede von 0,5 K resultierend. Vergleichbare Temperatureffekte mit Folie im Unterstockbereich bedeckten Boden wurden im Langzeitversuch von Schultz und Deppisch (2003) gemessen.

PAR-Strahlung aus dem Unterstockbereich

Höhere Beerenhaut- und innere Lufttemperaturen der Laubwand veranlassten 2022 zur Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) im Unterstockbereich. Diese Teilmessung sollte die hierzu mögliche Ursache der Beerenhauttemperaturerhöhungen, nämlich die der vermuteten Rückstrahlung der Holzhäcksler belegen. Hierbei wurden eine bedeckte (HH) und eine nichtbedeckte (OB) Variante als vergleichende Formen herangezogen. Mit zunehmender Rückstrahlung aus dem Unterstockbereich resultierten die höchsten Oberflächentemperaturen der Beeren in HH. Es bestehen für jede Erhebungsform bzw. Laubwandlänge sehr enge Zusammenhänge von $R^2 = 0,723$ bis $0,784$ (s. Kap. 5.8). Demzufolge lassen sich Höchstwerte der Beerenhaut- und inneren Lufttemperatur der Laubwand auf das ausgebrachte Holzhäckslergut im Unterstockbereich zurückführen. Untersuchungen mittels der PAR-Erfassung im Unterstockbereich belegen ebenfalls die Abhängigkeit der Rückstrahlung aus dem Unterstockraum (Fricke 2001).

Transpirationsleistung im Tagesverlauf

Die Transpirationsrate wird durch eine Reihe von Faktoren beeinflusst, von welchen die Wasserversorgung eine herausragende Rolle spielt. Bereits Müller Thurgau (1894) und Schanderl (1930) stellten bereits vor über 100 Jahren bei Riesling eine Hemmung der Transpiration und demzufolge herabgesetzte Photosyntheseaktivität durch Trockenheit fest, die mittels abermaliger Untersuchungen unter Berücksichtigung der Lufttemperatur bestätigt wurden (Geisler 1961; Shimomura 1967; Alleweldt et al. 1982). Beide Erhebungsjahre zeigen die engsten Korrelationen ($R^2 = 0,626 - 0,874$) bei anwachsender Blatttranspirationsrate und gleichzeitig emporsteigender Lufttemperaturen in HH und MB auf (vgl. Kap. 5.9.2). Mit Betracht der kurzen Laubfronten war 2022 MB der Form OB gleichzusetzen, da innerhalb der 0,70 m Fronten keine Bewässerung vollzogen wurde.

Die im zuvor dargestellten Abschnitt beschriebenen Oberflächentemperatur der Blätter wurden nun in Verbindung mit der örtlich transpirierenden Rebe gesetzt. Mit zunehmenden Blattoberflächentemperaturen waren enge Zusammenhänge bezüglich der ansteigenden Transpirationsrate zwischen $R^2 = 0,610 - 0,916$ einhergegangen (s. Kap. 5.9.4). Sowohl MB als auch HH konnten aufgrund ihres ausreichenden Wasserhaushaltes eine permanente Blatttranspiration bei hiesigen Lufttemperaturen gewährleisten. Oberflächliche Blatttemperaturen $> 35 \text{ °C}$ in OB führten 2022 inmitten der langen Laubfront zur

Stagnation der Transpirationsrate (s. Kap. 5.9.4). Keine Erhebungsform der kurzen Laubwände zeigte Mangelscheinungen bezüglich einer Reduktion der Rebblatttranspiration.

Von besonderer Bedeutung ist es, dass die ermittelten TR-Daten statistisch valide Ergebnisse gegenüber der Variablen VPD liefern. Differenzen zwischen 2021 und 2022 lassen sich durch gesteigerte VPD-Werten im zweiten Versuchsjahr dokumentieren. Während 2021 das VPD-Maximum bei ca. 30 hPa lag, wurden 2022 rund 55 hPa gemessen. Unter diesen hitzigen klimatischen Bedingungen erzielte MB die größten TR-Werte ($1,52 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$). HH konnte nur eine Transpirationsrate von maximal $1,45 \text{ gH}_2\text{Odm}^{-2}\text{h}^{-1}$ bei gleichen VPD-Kennwerten aufweisen. OB stellte seine Transpirationsrate $> 30 \text{ hPa}$ ein, was für das gesamte lange Blattwerks gilt (s. Kap. 5.9.5). Gleiches Abbild zeigte sich in mitten der verkürzten Laubwände, mit einer TR-Verminderung von 17 %. Für beide Erhebungsjahre wurden hoch signifikante Zusammenhänge sowohl in langer als auch kurzer Laubwand von $R^2 = 0,691$ bis $0,878$ erhoben. Das Abhängigkeitsgefüge dieser Untersuchungsbausteine wurden 2012 von Krato untermauert.

Mostgewicht

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zuckereinlagerung in die Beeren nur wenig sensitiv gegenüber moderatem Trockenstress war. Laut Matthews et al. (1987) und Stevens et al. (1995) findet unter maximal moderatem Trockenstress der Reben innerhalb der Reifeperiode eine verringerte Wasseraufnahme bei gleichzeitig verringerter Zuckereinlagerung in die Beeren statt. Dies führt zu unterschiedlichen Zuckergehalten pro Beere. Mit dieser Feststellung korrespondieren die Messergebnisse aus dem moderaten Trockenstressjahr 2021. Der Zuckerertrag der Kontrolle in 2021 war aufgrund des geringeren Ertrages tendenziell niedriger als bei Varianten, welche eine Holzhäckselabdeckung trugen (s. Kap. 5.10.1). Eine Reifeverzögerung der halbierten Laubwände wurde in diesem Erhebungsjahr rund zwei Wochen verzögert erfasst als die herkömmliche Laubwandlänge.

Die Reifeperiode 2022, welche von starkem Trockenstress geprägt war, zeigte signifikant höhere Zuckerakkumulationen in den Beeren durch eine gezielte Tropfbewässerung. Aber auch eine im Unterstockbereich bzw. flächendeckend-befindlichen Holzhäckselbedeckung zeigte annähernd gleiche Mostgewichteffekte (Abbildung 51+52). HH und HH+ konnten allerdings nicht die Oechsle wie die der Variante MB erzielen, was der Wasserknappheit gegen Vegetationsende geschuldet war. 2022 wurde eine Reifeverzögerung von 18 Tagen erhoben. Beide Holzhäckselvarianten zeigten hierbei die größten Zuckererträge auf. Demzufolge können die Ergebnisse den Messresultaten aus den Forschungsarbeiten von Reynolds und Naylor (1994) und dos Santos et al. (2007) unter variierenden klimatischen Gegebenheiten, welche eine Steigerung der Oechsle durch eine Rebenbewässerung feststellen konnten, angenommen werden. In Bezug auf eine Unterstockbedeckung bzw. flächendeckenden Abdeckung finden die vorliegenden Messergebnisse Anklang an denen von Schultz und Deppisch (2003) und Prior (2011). In unter starkem Trockenstress leidenden Reben wie 2022 in OB führt eine begrenzten Photosynthese und hierdurch ein limitierter Zuckertransport von den Blättern in die Beeren zu einer Reduktion der Zuckerakkumulation (Rogiers et al. 2015). Trockengestresste, nichtbedeckte, aber auch unbewässerte Reben können sowohl mit einem verminderten Zuckergehalt im

Most als auch mit einem geringeren Traubenertrag bestimmt werden (Ginestar et al. 1998). Diese Erkenntnis lässt sich innerhalb dieses Projektes für Mostgewichte und Traubenerträge in allen Versuchsformen und Laubwandlängen bestätigen.

Varianten mit einer verringerten Blattfläche und somit einer herabgesetzten Assimilationsfläche wiesen niedrigere Mostgewichte als die Varianten der langen Laubwände auf. Hierbei macht sich die reduzierte Blattfläche bemerkbar. Der Zusammenhang zwischen Zuckerproduktion und der Blattfläche lässt sich ebenfalls durch Forschungsergebnisse wie durch Mehofer et al. (2013) und Stoll et al. (2012) bestätigen. Eine Proportionalität der Mostgewichtsrückgänge zur Blattfläche sind allerdings nicht zu erkennen. Dies lässt sich auf sogenannte Kompensationseffekte der Rieslingrebe zurückführen, d.h. dass hier eine Neubildung der Blattmasse durch eine erhöhte Photosyntheseleistung und Belichtung der hinterbliebenen Rebblätter vonstattengeht. Alle kurzen Varianten verdeutlichen dieses Verhältnis zwischen Ertrag und Mostgewicht. Das Blattfruchtverhältnis (BFV) der kurzen Laubwände beträgt ca. 13 cm²/g und liegt damit unter dem idealen BFV von 18 bis 22 cm²/g (Kadisch und Müller 2008; Petgen 2010; Stoll et al. 2012). Darüber hinaus ermöglicht eine Holzhäckselabdeckung, wie sie im Unterstockbereich oder flächendeckend vollzogen wurde, durch eine gesteigerte Wasserversorgung in der Reifephase eine Mostgewichtssteigerung gegenüber der Kontrolle von bis zu 7° Oechsle ermöglichen.

Traubenertrag

Im Pfeddersheimer-Kreuzblick wurden durch eine Unterstockbedeckung bereits im Jahr 2021 bei der Rebsorte Riesling signifikante Unterschiede in Sachen Traubenertrag beobachtet, was sich 2022 ebenfalls bestätigen lässt. Darüber hinaus erzielte speziell MB eine Gewichtssteigerung von 10 kg * ar⁻¹ im langen Blattwerk gegenüber HH und HH+. Ein Gewichtsunterschied von 35 kg * ar⁻¹ konstatierte zwischen OB und MB.

Internationale Forschungsergebnisse berichten, dass eine Rebenbewässerung zur Traubenertragssteigerung führen und gleichzeitig den Zuckergehalt der Beeren senken kann. Ergebnisse von Rühl und Alleweldt (1985) aus Deutschland zeigen auf, dass eine Rebenbewässerung bis kurz vor der Lese eine Steigerung des Traubenertrages bewirkte, allerdings die Zuckergradation des Traubenmostes nicht beeinflusst wurde. Darüber hinaus zeigen Forschungsversuche von Reynolds et al. (1994,2007) auf, dass einerseits eine Rebenbewässerung als auch eine Fertigation¹⁶ die Beerenanzahl pro Traube steigerte. In deren Erhebungen wurde der Traubenertrag gesteigert und simultan der Ochslegehalt des Mosts um 5,5 °Oechsle verringert.

Diese Forschungsergebnisse entsprechen demnach nur teilweise den in dieser Arbeit erzielten Resultaten. So konnte 2021 und 2022 ermittelt werden, dass eine gezielte schwellenwertbasierte Bewässerung bzw. eine Holzhäckselbedeckung einen signifikanten

¹⁶ Bezeichnung für eine besondere Form der Düngung, der so genannten Beregnungs-Düngung. Das Verfahren wurde in den 1980er-Jahren in den Niederlanden für Obstbäume entwickelt, um Treibwachstum, Blütenknospen-Bildung und Ertrags-Leistung zu steigern. Dabei werden Pflanzen bei einer künstlichen Bewässerung Düngemittel zugeführt. Im Weinbau spricht man hierbei von der gezielten Tropfbewässerung der Rebstöcke (Tischelmayer o. A., a).

Einfluss auf den gesteigerten Traubenertrag und zudem eine Mostgewichtsteigerung herbeiführt (s. Kap. 5.10.5).

Gesamtsäuregehalt

Signifikant höhere Mostsäurewerte wurden in Kanada bei Versuchen von Reynolds et al. (2007) in bewässerten Varianten gegenüber der unbewässerten Kontrollvariante ermittelt. Gleiches Phänomen ereignete sich bei Prior (2011) zwischen einer exakt gesteuerten Tropfbewässerung, der flächendeckenden Holzhäcksel und der unbewässerten Kontrollform. Letztere hatte die niedrigsten Säurewerte. Unter hiesigen Verhältnissen konnten Esteban et al. (1999) bei der Rotweinsorte Tempranillo eine Steigerung des Gesamtsäuregehaltes durch einen verbesserten Wasserhaushalt mittels einer Rebenbewässerung um bis zu $1,5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ bei simultan gesteigertem vegetativen Wachstum erheben.

Innerhalb der individuellen Varianten dieser Untersuchungen ergaben sich Überschneidungen. Sowohl HH als auch HH+ konnten 2021 gegenüber OB einen verbesserten Gesamtsäuregehalt aufzeigen. Gleiches Abbild zeigte sich im Hitzejahr 2022, wobei MB als Gewinner in Anbetracht des Säurehaushaltes zu nennen ist. Alle verkürzten Blattfronten hatten aufgrund ihrer 18 täglichen Reifeverzögerung erst nach diesem Zeitversatz das gleiche Säureniveau erreicht wie die zuvor geernteten langen Laubfronten.

Zu erwähnen bleibt, dass ein Niederschlagsjahr wie 2021 den Säurehaushalt deutlich anhebt. Treten zusätzlich noch Varianten wie HH und HH+ hinzu, welche für eine verbesserten Infiltration bzw. Wasserspeicherung der Niederschläge sorgen, kann der Säurehaushalt stark ansteigen, wohingegen geringere Oechsle erzielt werden. Der Weinjahrgang fällt aus sensorischer Sicht tendenziell säurebetonter aus. Finden Hitzejahre wie 2022 statt, kann eine exakt eingesetzte Tropfbewässerung, speziell eine Bedeckung im Unterstockbereich oder gar auch flächendeckend rar gefallenem Niederschlag im Frühjahr besser speichern und innehalten. Aufgrund der fehlenden Bedeckung kann keine nachhaltig-natürliche Wasserspeicherung wie in OB und MB erzielt werden. Nichts desto trotz können Säuregehalte aufrecht gehalten werden und unterliegen aufgrund des verbesserten Wasserhaushaltes nicht dem schnellen Abbau der Apfelsäure, wohingegen ein gleichzeitiges Emporsteigen der Oechsle innerhalb der Beeren vonstattengeht (vgl. Variante OB). Hohe Alkoholgehalte resultieren, was seitens des Endkonsumenten nicht erwünscht ist. Die Geschwindigkeit des Säureabbaus in den Trauben ist stark temperaturabhängig, weshalb sog. Tropennächte $\geq 20 \text{ }^\circ\text{C}$ während der Reifephase wie 2022 das Säure- und Zucker Verhältnis beeinflussten. Je wärmer die Nächte im Spätsommer und Herbst sind, desto stärker ist die Abnahme der Säure in den Beeren. Niedrige Säuregehalte wie 2022 können im Vergleich zu 2021 zu hohen pH-Werten führen, was die Gefahr einer mikrobiellen Fehlentwicklung im Most erhöht.

Schnittholzgewicht

Der Triebwachstum der Reben ist gegenüber dem Trockenstress sehr anfällig und empfindlich (Matthews et al. 1987; Heßdörfer 2015). Im direkten Vergleich zwischen generativen und vegetativem Wachstum reagiert erstgenanntes deutlich sensibler, so Williams et al. (2005). Unter den europäisch-humiden Witterungsbedingungen werden inmitten

der Vegetationsperiode exorbitante Bodenfeuchten ermittelt. Zugleich steigt bei anwachsenden Bodenwassergehalten während der Wachstumsphase der Rebe der vegetative Wachstum (Hatch et al. 2011). Als Folgeerscheinung kann dies zu emporsteigenden Schnittholzgewichten in Zeiten des saisonalen Rebschnittes in den Wintermonaten führen. Diese Aussagen stehen im Einklang mit den in dieser Forschungsarbeit erzielten Messergebnissen (s. Kap. 5.11).

Mit der Steigerung des Wasserhaushaltes konnte ein linearer Zusammenhang in puncto Schnittholzgewicht ermittelt werden. Bereits im ersten Jahr waren in HH und HH+ gesteigerte Schnittholzgewichte zwischen 10 und 15 % gegenüber OB erkennbar. Gleicher Effekt stellte sich im kurzen Blattwerk dar, allerdings mit einer allgemeinen Gewichtsminde rung in der Versuchsform von ca. 5 kg. Im Hitzejahr 2022 ereignete sich der gleiche Gewichtseffekt, doch ein solches Hitzejahr hinterlässt auch so manche Spuren, was sich im saisonal entwickelten Schnittholz niederschlägt. In diesem Fall mit einer Gewichtsver minderung im Vergleich zum Vorjahr von 3 bis 5 kg in allen Formen. Auffallend ist aller dings, dass Variante MB durch ihre gezielte Bewässerungsmaßnahme zu einer verbesserten Entwicklung des Holzes verhalf, wodurch eine Gewichtssteigerung im Vergleich zu HH und HH+ von durchschnittlich 3 kg gemessen wurde (vgl. Abbildung 57). Für das gesamte verkürzte Laubwerk trat der gleiche Effekt wie 2021 ein. HH und HH+ zeigten sich als Form mit dem höchsten Schnittholzgewicht, gefolgt von OB und MB. Inmitten des kurzen Blattwerkes fand keine Bewässerungsmaßnahme wie in 1,40 m hohen Rebengassen statt, auf grund der nicht unterhalb der Bewässerungsschwelle fallenden Blattwasserpotentiale. Erhöhte Holzerträge resultierten in Steillagenversuchen bei Prior im regenreichen Erhebungs jahr 2010 als im warmen 2009. Individuelle Versuchsformen wie eine flächendeckende Bewässerung und eine gezielte Tropfbewässerung konnten hierbei sich nochmals gezielter mit einer Schnittholzgewichtsteigerung von der Kontrollform abheben.

Die aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass durch eine Unterstockabdeckung mittels Holz häcksel die Rebsorte Riesling in Flachlage feinfühlig reagiert. Zu Beginn jeder Vegetati onsperiode wurde verdeutlicht, dass eine Unterstockbedeckung in der Lage ist, vorherige Niederschläge auf natürliche Art und Weise besser zu speichern als Böden, welche keine Bedeckung innehaben. Unter moderatem Trockenstress wie 2021 konnten kleinteilige Unterschiede bei Mostgewicht und Gesamtsäure zwischen Unterstock- und flächendeckender Bedeckung sowie der nichtbedeckten Kontrolle ermittelt werden. Bei starkem Trockenstress wie 2022 waren größere Disparitäten zwischen bedeckten bzw. bewässerter Variante und der Kontrollform gemessen worden. Eine Erhöhung des vegetativen Wuchses in Versuchsformen mit stark verbessertem Wasserhaushalt resultierte. Folglich muss bei einer Rebsorte wie dem Riesling mit Bedacht in Sachen Bewässerungsmanage ment agiert werden, damit keine unnötige Anregung des vegetativen Wuchses und dadurch eine verschlechterte Reife der Beeren vonstattengeht. Denn gerade bei witterungs ungünstigen Zeiten, wie sie 2021 durch unzählige Niederschlagsereignisse stattfanden, kann ein hohes vegetatives Wachstum der Reben zu einem ansteigenden Risiko für Traubenfäule und schlussendlich zu verminderter Traubenqualität führen.

Es bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse dieser Untersuchung deutlich gemacht haben, wie wichtig Freilandmessungen für die Bestimmung des Wasserstatus von Reben unter

wechselnden klimatischen Bedingungen sind. Außerdem ist es empfehlenswert, diese Messungen über einen Messzeitraum von mindestens einem Jahr durchzuführen, denn nur dadurch können die saisonalen und räumlichen Variationen des Wasserhaushaltes solcher Versuchsformen in einem ausreichenden Maß reflektiert werden. Ebenfalls ist auch bewusst geworden, dass nur die Messung von Blattwasserpotentialen und Bodenfeuchtwerten alleine nicht ausreichen, um die Wasserstatus-Situation tiefgründig untersuchen zu können. 24 h-Messungen sollten ergänzend in die Messkampagne aufgenommen werden, um Teilkomponenten wie Blatttranspirationsrate oder auch verschiedenartige Oberflächentemperaturen mit Blick auf den örtlichen Wasserstatus analysieren zu können.

7. Zusammenfassung

Der Klimawandel ist längst eines der größten Aufgabenfelder und Herausforderungen der Zukunft. Die vorliegende Forschungsarbeit beschäftigte sich mit dem Rebenwandel im Rahmen des rezenten Klimawandels. Grundlegend spielt das Wasserdargebot eine essentielle Rolle im Reifeprozess der Rebe. Demzufolge wurde das Mikroklima der Rebsorte Riesling in der Weinbauregion Rheinhessen, Pfeddersheimer Kreuzblick, des Weinbaubetriebes Ihrig für die Jahre 2021 und 2022 mittels des Einsatzes der Scholander-Druckkammer im 2- bzw. 3-Tages-Rhythmus untersucht. Um Auswertungen fertigen und fundierte Aussagen treffen zu können, wurde mit Beginn des 8. Blattstadiums an verschiedenartigen Wochentagen, Wochenenden und Feiertagen Messungen durchgeführt. Ziel der durchgeführten Arbeit war es, meteorologisch-hydrologischen Messparameter als Anpassungsstrategie zu erproben, die auf alle Weinbauregionen in Rheinland-Pfalz übertragen werden kann, welche im Rahmen des Klimawandels zunehmenden Wasserbedarf verspüren. Inwiefern sich eine Bodenabdeckung im Unterstockbereich bzw. von einer flächendeckenden Abdeckung und moderaten Tropfbewässerung in einer Flachlage unterscheidet, unter Berücksichtigung der Laubwandstruktur, galt es forciert zu untersuchen. Möglichkeiten zur Reduzierung des Wasserverbrauchs und zur Reifeverzögerung (Verminderung des Botrytisbefalls, Verlängerung der Reifedauer, Vermeidung zu hoher Alkoholgehalte) durch kürzere Laubwandhöhe bei Riesling in Flachlage wurden in diesem Projekt erprobt. Themenbereiche wie die Blatttranspiration, Oberflächentemperaturen (Beeren-, Blatt- und Bodentemperaturen), PAR-Strahlung im Unterstock-/Beeren-/Laubwandbereich, Blattstielnitrat-Test, Bodenfeuchte und die CO₂-Messung an Blättern wurden zusätzlich erfasst. Darüber hinaus wurde in allen Versuchsvarianten auch eine Laubwandkürzung ($h = 0,70$ m) durchgeführt.

Am Beispiel des Standortes „Pfeddersheimer-Kreuzblick“ sollten deshalb die auftretenden Trockenstresssituationen in Abhängigkeit verschiedenartiger Einflussgrößen analysiert werden:

*„Untersuchungen meteorologisch-hydrologischer Messgrößen im Weinbau als Anpassungsstrategie an den Klimawandel sowie für eine nachhaltige Wassernutzung von *Vitis vinifera* [cv. Riesling].“*

Die Analyse dieser Freilanduntersuchung sollten anhand folgender Untersuchungsschwerpunkte konkretisiert werden:

1. Wie ist die Trockenheitstoleranz einer Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich anhand wechselnder Witterungsbedingungen einzuschätzen?
2. Welchen Einfluss nimmt eine Holzhäckselabdeckung im Unterstockbereich auf die vegetative und generative Wuchsleistung?

Diese Fragen stehen stellvertretend für die wichtigsten Teilfragen, die zur Klärung des Wassermanagements im flachlagigen Freilandversuch von Interesse sind. Im Erhebungsrahmen werden berücksichtigt:

- Gewährleistung einer saisonalen Bearbeitung der offenen Gassen durch eine im Herbst eingesäte Herbst- und Winterbegrünung
- Einkürzung der Laubwand soll eine Reifeverzögerung hervorrufen
- Minimierung von Stressfaktoren der Weinreben:
 - Wasserstress
 - Geringere Öchsle
 - Aufrechterhaltung der Säure
 - Sicherung der Erträge
 - Herabsetzung der oberflächigen Boden-, Beeren- und Blatttemperatur

Für diese Freilanduntersuchung wurden insgesamt vier Erhebungsvarianten eingeteilt: MB = Moderate Bewässerung, OB = Ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock, HH+ = Holzhäcksel flächendeckend. Fiel das frühmorgendliche Blattwasserpotential unterhalb des zu bewässernden Schwellenwertes von -0,30 MPa, wurde am Abend die 24-stündige Tropfbewässerung gestartet. Nach Beendigung dieser wurde am darauffolgenden Tag eine Wasserpotentialmessung durchgeführt, um eine mögliche Erholung der zuvor wassergestressten Reben zu erfassen.

Mittels der Messergebnisse der Blattwasserpotential-, Bodenfeuchte-, Nitrat-, Blatttranspirations-, Oberflächentemperatur- wie Blatt, Boden und Beeren und CO₂-Messungen konnte nachgewiesen werden, dass eine Unterstockbedeckung gegenüber nichtbewässerten Formen deutlich verbesserte Kennwerte liefert. Eine solche Bedeckung kann in direkter Gegenüberstellung zur punktuell-gezielten Tropfbewässerung über den gesamten Zeitraum der Vegetationsperiode unter Berücksichtigung der oben genannten Parameter deutlich standhalten. Allerdings wird auch ersichtlich, dass eine solch natürliche Bedeckung an ihre Grenzen stößt (s. Kap. 5.2). Bemerkenswert ist die Tatsache, dass Beerenhaut- und innere Laubwandtemperaturen höhere Werte aufwiesen, als in nicht im Unterstockraum bedeckten Varianten. Der Auslöser dieser Erwärmung wurde maßgeblich von den ausgebrachten Holzhäcksel verursacht. Sie lassen sich als eine Art Spiegel beschreiben, welche aufgrund ihrer hellen Materialfarbe die einfallende Sonnenstrahlung in den Beerenbereich reflektiert.

Die signifikant saisonalen Unterschiede des generativen Wachstums wie Mostgewicht, Gesamtsäure und Traubenertrag konnte mittels der Unterstockbedeckung sowohl auf qualitativer und quantitativer Ebene sichergestellt werden. Bezüglich Ertrags- und Mostgewichtsleistung stellt die Rebe zu unterschiedlichen Entwicklungsstadien verschiedenartige Ansprüche.

Eine zu hohe Wasserversorgung kann zu einer erhöhten Ertragssteigerung führen, wodurch ebenfalls Mostgewichtrückgänge resultieren können. Bewässerungsmaßnahmen sind nur bei deutlicher Trockenheit und einer bedarfsgerechten Steuerung der Wassergaben zu begründen. Auch kann eine Bodenabdeckung auf einen ertragssteigernden Effekt zu Beginn der Beerenentwicklung zurückgeführt werden. Während der Reifephase sinkt weitestgehend der Bodenwasservorrat, wodurch eine Unterstockbedeckung eine ausreichende Wasserversorgung sicherstellen konnte und infolge eine aufrechterhaltende Photosyntheseleistung und letztlich eine Mostgewichtsicherung/-steigerung erzielte.

Ebenfalls wurde ersichtlich, dass die Wuchskraft (vegetativ: Schnittholzgewicht) mittels Unterstockbedeckung stärker gefördert wurde als inmitten der Kontrolle. Gleicher Effekt entstand innerhalb der Tropfbewässerungsform. Die besondere Wuchskraftförderung der Holzhäckselabdeckungen lässt sich durch eine ausgeprägte und flächendeckende Verbesserung der Wasserversorgung bereits in frühen Vegetationsphasen erklären, in welcher die Bewässerung noch nicht eingesetzt wurde, allerdings das Haupttriebwachstum stattfand. Weiterhin erfolgt eine qualitätsbewusste Bewässerung nur bis zu einer „moderaten“ Wasserversorgung, wohingegen der Einfluss einer Holzhäckselabdeckung nicht steuerbar ist und demzufolge je nach Witterung auch zu einer erhöhten Wasserversorgung und Wuchskraft führen kann.

Durch eine Laubwandeinkürzung aller Versuchsformen konnten Reifeverzögerungen von bis zu 18 Tagen erzielt werden. Allerdings sollte hierbei eine Laubwandkürzung immer auf das im Frühjahr angepasste Wassermanagement angepasst werden, da ein mögliches Reifen der Beeren nicht vollendet werden kann, was sich im „Nichterreichen“ bspw. der optimalen Oechsle niederschlagen kann. Für die Rebsorte Riesling liegt hierbei der mindest Oechsleschwellenwert bei ca. 80 °Oechsle. Es bleibt daher immer unter Vorbehalt mit den jährlichen Witterungsgegebenheiten „zusammenzuarbeiten“, damit kein unreifes und suboptimales Lesegut resultiert.

Der Versuch zeigte auf, dass eine natürliche Unterstockbedeckung eine verbesserte Infiltration bzw. Wasserspeicherung bei der Rebsorte Riesling in Flachlage hervorruft. Diese kann der moderaten Bewässerung als Medium der nachhaltigen Wasserspeicherung absolut Paroli bieten.

8. Empfehlungen für den praktischen Weinbau

Werden die detailliert dargestellten Kennwerte auf den praktischen Weinbau übertragen, so sind in erster Linie folgende Stellschrauben als Empfehlungen aus dieser Arbeit für Winzer*innen aus Sicht der einfachen Handhabung am geeignetsten, um mit der Ressource Wasser am ökonomischsten und ökologischsten wirtschaften zu können:

1. Reduzierung der Laubwandhöhe

Im heutigen Technologiealltag ermöglichen weinbauliche Laubschneider bereits individuelle Laubwandhöhe zu realisieren. Eine weitere Möglichkeit, eine reduzierte Laubfront zu erhalten, bietet die Rebstockerziehung.

→ Verlängerte Rebstockerziehung

Durch einen höher erzogenen Rebstock (ca. 1,30 m) durch den winterlichen Rebschnitt bietet sich ebenfalls langfristig eine reduzierte Laubwandhöhe an. Die Oberkante der Laubwand befindet sich wie bei herkömmlichen Laubfronten bei ca. 2 m. Somit wird eine verringerte Laubwandhöhe von etwa 0,70 m ermöglicht, was letztlich den Voraussetzungen dieser Arbeit gleicht.

2. Ausbringung von Holzhäcksel

Als zweite und vorletzte Handlungsmaßnahme ist das Ausbringen der Holzhäcksel in herkömmlicher Laubwandlänge zu empfehlen. Hierzu kann eine Blockverteilwagen eingesetzt werden, welcher die Holzschnitzel bei Befahren der Rebengassen in den Unterstockbereich auswirft. Holzschnitzel lassen allerdings die betrieblichen Ausgaben ansteigen, wohingegen diese Variante als „dritte“ Möglichkeit gelistet wird. Beide zuvor genannten Handlungsempfehlungen lassen sich bereits sofort aufgrund der in jedem Betrieb vorzufindenden infrastrukturellen Maschinen bewerkstelligen.

3. Gezielte Tropfbewässerung

Die letzte Handlungsmaßnahme, welche Winzer*innen durchführen sollten ist die der punktuell notwendigen Bewässerung. Empfehlende Wassergaben sind hierbei 10 l/Rebe zu nennen. Der Grund, weshalb diese Maßnahme als letzte Handlung durchgeführt werden sollte, ist die des nichtgewollten langfristigen Anzapfen des immer weiter absinkenden Grundwasserspiegels, was definitiv nicht im Ermessen des Weinbaus ist.

Ansatzpunkte für zukünftige Projekte

Das Naturprodukt „Wasser“, welches zur Bewässerung von Agrokulturen eminent wichtig ist, gewinnt von Tag zu Tag immer mehr an Bedeutung. Aus diesem Grund sollte es von höchster Priorität sein, individuelle Bewässerungssteuerungen aber auch die nachhaltige

Wassernutzung inmitten der landwirtschaftlichen Kulturen stetig voranzutreiben und zu verbessern. In junger Vergangenheit wurde die Sensibilität der Bewässerungssteuerung verschärft, was durch auftretenden Klimakatastrophen abermals in den Mittelpunkt unseres Alltages gerückt wird.

Mit den Versuchsergebnissen aus diesem Projekt ist das höchste Credo, Synergieeffekte nutzbar zu machen und anwendbare bzw. praxisgerechte Handreichungen für Winzer*innen zur Verfügung zu stellen, um hieraus den zusätzlichen Wasseraufwand je Rebparzelle so gering wie möglich zu halten. Ein „natürliches“ Wassermanagement und nicht das weitere Absenken des Grundwasserspiegels sollten im Interesse aller stehen.

Aus diesem Grund dienen diese Forschungsergebnisse als Grundbaustein für zukünftige Forschungsarbeiten. In erster Linie wäre von wichtigem Interesse zu untersuchen, inwieweit sich eine Unterstockbedeckung bei weiteren Weißwein- und Rotweinsorten auf den entsprechenden Wasserhaushalt auswirkt. Mit Augenmerk auf den Untergrund der Reben wäre darüber hinaus wichtig zu erfahren, wie sich diese ausgewählten Messgrößen auf Böden wie Kalk, Schiefer oder bspw. sandigen Böden verhalten.

Im Steillagenweinbau wie der Moselregion fand die vorliegende Forschungsarbeit bereits großen Anklang. Mögliche Synergieeffekte der Unterstockbedeckung sollen zukünftig im Weinanbaugebiet der Mosel erprobt und praktiziert werden, um ein innovatives Konzept für eine praxisgerechte und nachhaltig-natürliche Wassernutzung zu gewährleisten.

Südliche Weinbauregionen wie Spanien, Portugal oder Italien verspüren den Klimawandel nochmals verstärkter als im mitteleuropäischen Weinbau. Daher wäre es interessant zu wissen, ob sich die „Superlativ-Variante“ kurze Laubwand mit ausgebrachten Holzhäcksel im Unterstockbereich auch in diesen Weinbaugebieten bewähren kann.

Grundsätzlich sollte das Augenmerk der zukünftigen Projekte darauf ausgerichtet sein, wie mit der verknüpften Ressource Wasser schonend umgegangen werden soll. Hierzu sollte der Forschungsfokus auf Möglichkeiten ausgerichtet werden, welche weiterhin den Weinanbau an Standorten wie in Flach- und Steillage, aber auch das Sortenspektrum von Weiß- und Rotweinsorten auf unterschiedlichsten Bodenbeschaffenheiten weiterhin ermöglichen. Denn ein gezielter und richtiger Umgang mit landwirtschaftlich genutztem Wasser wird wegen der sich stetig verschärfenden Klimaveränderungen und durch das Absinken des Grundwassers immer wertvoller. Qualitäts- und Quantitätssicherung haben durch eine natürliche Unterstockbedeckung und das Reduzieren der Laubwandhöhe aufgezeigt, dass sich diese Art von Wasserspeicherung als besonders effektiv darbieten lässt.

Literaturverzeichnis

- Alleweldt, G.; Eibach, R.; Rühl, E. (1982): Untersuchungen zum Gaswechsel der Rebe I. Einfluß von Temperatur, Blattalter und Tageszeit auf Nettphotosynthese und Transpiration. 93 Pages / VITIS - Journal of Grapevine Research, Vol. 21 No. 2 (1982): Vitis.
- Ameglio, T.; Archer, P.; Cohen, M.; Valancogne, C.; Daudet, F. A. (1999): Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. In: *Plant and Soil* (207), S. 155–167.
- Arbeitskreis Begrünung im Weinbau (Hg.) (1998a): Beeinflussung der Stickstoffdynamik von Grasmulch mit einem Mulchbodenlockerungsgerät. Internationales Kolloquium Begrünung im Weinbau. Unter Mitarbeit von K. Bauer. AK Begrünung im Weinbau. Krems, Österreich.
- Arbeitskreis Begrünung im Weinbau (Hg.) (1998b): Rindenmulchabdeckung - Eine Alternative zur Begrünung in Steillagen? XII. Kolloquium des internationalen Arbeitskreises Begrünung im Weinbau. Unter Mitarbeit von A. Schwab. AK Begrünung im Weinbau. Vogtsburg-Oberrotweil i. K. und Sigolsheim/Elsaß.
- Arnon, D. I.; Allen, M. B.; Whatley, F. R. (1954): Photosynthesis by isolated chloroplasts. In: *Nature* 174 (4426), S. 394–396.
- Atkins, P. W.; Paula, J. de (2012): Physikalische Chemie. 4., vollst. überarb. Aufl., 2. Nachdr. Weinheim: Wiley-VCH.
- Backes, J.; Böhm, P.; Gröber, H.; Spies, E.-D. (2013): Weinbergsböden in Rheinland-Pfalz. Steine. Böden. Terroir. Hg. v. Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz. Mainz.
- Bauer, K.; Amann, H. (2002): Weinbau. 7., aktualisierte Aufl. Leopoldsdorf: Österr. Agrarverl. (AV-Fachbuch).
- Bayrhuber, H.; Kull, U. (Hg.) (2005): Linder-Biologie. Lehrbuch für die Oberstufe. Unter Mitarbeit von Horst Bayrhuber und Ulrich Kull. 22., neu bearb. Aufl, Dr.A,1. Braunschweig: Schroedel.
- Begg, J.-E.; Turner, C. (1970): Water Potential Gradients in Field Tobacco. In: *Plant Physiol.* (46), S. 343–346.
- Bilger, W.; Dauborn, B.; Dietz, K. J.; Gollmack-Brockhausen, D.; Groß-Hardt, R.; Munk, K. (2008): Taschenlehrbuch Biologie: Botanik. 1. Auflage. Stuttgart: Thieme (Taschenlehrbuch Biologie).
- Blackman, F. F. (1905): Optima and Limiting Factors. In: *Annals of Botany* 19 (2), S. 281–296.
- Blaich, R. (2000): Vorlesung Weinbau 1 (Produktion). Teil des Moduls H2287. Universität Hohenheim. Hohenheim.

- Blancquaert, E. H.; Oberholster, A.; Ricardo-da-Silva, J. M.; Deloire, A. J. (2019): Effects of Abiotic Factors on Phenolic Compounds in the Grape Berry – A Review. In: *SAJEV* 40 (1).
- Bock, A.; Sparks, T.; Estrella, N.; Menzel, A. (2011): Changes in the phenology and composition of wine from Franconia, Germany. In: *Clim. Res.* 50 (1), S. 69–81.
- Bonada, M.; Sadras, V. O. (2015): Review: critical appraisal of methods to investigate the effect of temperature on grapevine berry composition. In: *Australian Journal of Grape and Wine Research* 21 (1), S. 1–17.
- Bowsher, C. G.; Steer, M. W.; Tobin, A. K. (2008): Plant biochemistry. Unter Mitarbeit von Caroline Bowsher und Alyson Tobin. New York: Garland Science.
- Brandt, M.; Scheidweiler, M.; Rauhut, D.; Patz, C. D.; Will, F.; Zorn, H.; Stoll, M. (2019): The influence of temperature and solar radiation on phenols in berry skin and maturity parameters of *Vitis vinifera* L. cv. Riesling. In: *OENO One* 53 (2).
- Buttrose, M. S. (1969): Fruitfulness in Grapevines: Effects of Light Intensity and Temperature. In: *Botanical Gazette* 130 (3), S. 166–173.
- Centeno, A.; Baeza, P.; Lissarrague, J. R. (2010): Relationship between Soil and Plant Water Status in Wine Grapes under Various Water Deficit Regimes. In: *Horttech* 20 (3), S. 585–593.
- Chaves, M. M. (1991): Effects of Water Deficits on Carbon Assimilation. In: *J Exp Bot* 42 (1), S. 1–16.
- Choné, X.; van Leeuwen, C.; Chéry, P.; Ribéreau-Gayon, P. (2001a): Terroir influence on water status and nitrogen status of non-irrigated Cabernet Sauvignon (*Vitis vinifera* L.). Vegetative development, must and wine composition (Example of a Medoc Top Estate Vineyard, Saint Julien Area, Bordeaux, 1997). In: *South African Journal of Enology and Viticulture* (22 (1)), S. 8–15.
- Choné, X.; van Leeuwen, C.; Dubourdieu, D.; Gaudillere, J. P. (2001b): Stem Water Potential is a Sensitive Indicator of Grapevine Water Status. In: *Annals of Botany* 87 (4), S. 477–483.
- Crawford, N. M.; Forde, B. G. (2002): Molecular and developmental biology of inorganic nitrogen nutrition. In: *The arabidopsis book* 1.
- Cubasch, U. (2013); Wuebbles, D.; Chen, D.; Facchini, M. C.; Frame, D.; Mahowald, N.; Winther, J-G. (2013): Introduction. In: *Climate Change 2013: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, S. 119–158.
- Currle, O. (1983): *Biologie der Rebe. Aufbau, Entwicklung, Wachstum.* Neustadt an der Weinstraße: Meininger.
- DLR Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (Hg.) (2013): *Bodenpflege im Weinbau – Versuchsergebnisse und neue Entwicklungen.* Unter Mitarbeit von Oswald Walg. 57. Kreuznacher Wintertagung. Bad Kreuznach, 2013.

- D'Odorico, P.; Chiarelli, D. D.; Rosa, L.; Bini, A.; Zilberman, D.; Rulli, M. C. (2020): The global value of water in agriculture. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117 (36), S. 21985–21993.
- dos Santos, T. P.; Lopes, C. M.; Rodrigues, L. M.; Souza, C. R. de; Ricardo-da-Silva, J. M.; Maroco, J. P. et al. (2007): Effects of deficit irrigation strategies on cluster microclimate for improving fruit composition of Moscatel field-grown grapevines. In: *Scientia Horticulturae* 112 (3), S. 321–330.
- Duchne, E.; Schneider, C. (2005): Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. In: *Agron. Sustain. Dev.* 25 (1), S. 93–99.
- Eibach, R.; Alleweldt, G. (1984): Einfluß der Wasserversorgung auf Wachstum, Gaswechsel und Substanzproduktion traubentragender Reben II. Der Gaswechsel. In: *Vitis; Journal of Grapevine Research* (23), Artikel 1, S. 10–20.
- Eitzinger, J.; Heilig, M. (Hg.) (2021): Klimafitte Landwirtschaft. Herausforderungen im Kontext des globalen Wandels: LÓVÉR-PRINT Nyomdaipari Kft.
- Engelmann, Th. W. (1883): Ein Beitrag zur vergleichenden Physiologie des Licht- und Farbensinnes. *Bacterium photometricum*. In: *European Journal of Physiology* (30), Artikel 1, S. 95–124.
- Esteban, M.; Villanueva, MJ.; Lissarrague, JR. (1999): Effect of irrigation on changes in berry composition of tempranillo during maturation. Sugars, organic acids, and mineral elements. In: *Amercian Journal of Enology and Viticulture* (50(4)), S. 418–434.
- Fohrer, N.; Bormann, H.; Miegel, K.; Casper, M.; Bronstert, A.; Schumann, A. H.; Weiler, M. (Hg.) (2016): Hydrologie. 1. Auflage. Bern: Haupt Verlag (UTB basics, 4513).
- Fox, R.; Rupp, D. (1999): Die Dauerbegrünung als Regelinstrument zur Stickstoffversorgung der Reben. In: *Rebe & Wein* 1999 (5), S. 180–182.
- Fricke, E. (2001): Einsatz reflektierender Unterstockfolien bei Riesling und Spätburgunder in Hanglagen. Wiesbaden/Geisenheim: 78 S. Dipl.-Arbeit. Geisenheim, Wiesbaden/Geisenheim.
- Füri, J.; Kozma, F. (1977): Der Wasserverbrauch und –bedarf der Reben während der Vegetationsperiode. (2).
- Geisler, G. (1961): Untersuchungen zum Pfropfeinfluß auf die Transpiration im Zusammenhange mit der Unterlagenzüchtung bei Reben. In: *Der Züchter* 31 (1), S. 8–14.
- Ginestar, C.; Eastham, J.; Gray, S.; Iland, P. (1998): Use of Sap-Flow Sensors to Schedule Vineyard Irrigation. II. Effects of Post-Veraison Water Deficits on Composition of Shiraz Grapes. In: *Am J Enol Vitic.* 49 (4), S. 421–428.
- Glawion, R. (2012): Physische Geographie. Ein Lehr- und Übungsbuch. 2., stark überarb. Aufl., Druck B 1. Braunschweig: Westermann (Das geographische Seminar).

- Gouot, J. C.; Smith, J. P.; Holzzapfel, B. P.; Walker, A. R.; Barril, C. (2019): Grape berry flavonoids: a review of their biochemical responses to high and extreme high temperatures. In: *J Exp Bot* 70 (2), S. 397–423.
- Graf, B. A.; Milbury, P. E.; Blumberg, J. B. (2005): Flavonols, flavones, flavanones, and human health: epidemiological evidence. In: *Journal of medicinal food* 8 (3), S. 281–290.
- Gruber, B. R.; Schultz, H. R. (2006): Unverdünnte Qualität mit Tropfbewässerung. In: *Der Deutsche Weinbau* (11), S. 18–21.
- Grüner, E. (2012): Die Reproduzier- und Vergleichbarkeit von Messdaten unterschiedlicher Messgeräte zur Messung der Transpiration und des Wasserdampfdiffusionswiderstandes. Diplomarbeit. Universität Wien, Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie.
- Haas, F.; Struffi, I.; Hanni, E.; Raifer, B.; Pedri, U. (2014): Traubenreife durch Laubwand steuern. Die höheren Temperaturen bei der Lese führen zu einer raschen Einlagerung des Zuckers in die Beeren und zu einem stärkeren Säureabbau. Eine kurze Laubwand steuert dem entgegen. Das erhöht aber den Stress für die Reben und birgt deshalb Risiken. In: *Südtiroler Landwirt* (7), S. 34–36.
- Hannemann, W. (1961): Die Wirkung der Wasser-, Luft- und Temperaturverhältnis im Weinberg auf das Wachstum der Reben. In: *Deutscher Weinbau*, 16(23), S. 895–902.
- Hatch, T. A.; Hickey, C. C.; Wolf, T. K. (2011): Cover Crop, Rootstock, and Root Restriction Regulate Vegetative Growth of Cabernet Sauvignon in a Humid Environment. In: *American Journal of Enology and Viticulture* 62 (3), S. 298–311.
- Heckathorn, S. A.; DeLucia, E. H. (1995): Ammonia volatilization during drought in perennial C4 grasses of tallgrass prairie. In: *Oecologia* 101 (3), S. 361–365.
- Heckathorn, S. A.; DeLucia, E. H.; Zielinski, R. E. (1997): The contribution of drought-related decreases in foliar nitrogen concentration to decreases in photosynthetic capacity during and after drought in prairie grasses. In: *Physiol Plant* 101 (1), S. 173–182.
- Heßdörfer, D. (2015): Untersuchungen zur kontinuierlichen Wasserpotentialmessung sowie des Einflusses verschiedener Tropfbewässerungssysteme auf die generative und vegetative Wuchsleistung von *Vitis vinifera* (cv. Silvaner). Dissertation, Geisenheim.
- Heßdörfer, D. (2020a): Anpassungsmöglichkeiten an den Klimawandel. Trockenstress und fette Weine sind zwei Probleme, die heißere Sommer mit sich bringen. Eine Lösung könnte eine stark reduzierte Blattfläche sein. In: *Rebe & Wein* 07/2020 (07), S. 12–14.
- Heßdörfer, D. (2020b): Zukunftswerkstatt Weinberg. Der Klimawandel verlangt eine Anpassung. In: *Das Deutsche Weinmagazin*, 2020 (16/17), S. 37–39.

- Hölzl, J. (1955): Über Streuung der Transpirationswerte bei verschiedenen Blättern einer Pflanze und bei artgleichen Pflanzen eines Bestandes. Hg. v. Pflanzenphysiologisches Institut Wien. Wien.
- Hoppmann, D. (2010): Terroir - Wetter, Klima und Boden im Weinbau. Mit 63 Tabellen. Stuttgart: Ulmer.
- Hüster, H.: A long-term simulation of the soil water budget in tilled and grass covered vineyards. In: Wein-Wissenschaft, Bd. 48, S. 127–129.
- Ihrig, C. (2020): Klimawandel im Weinbau. „Inwiefern hat der Klimawandel Einfluss auf die phänologische und ökologische Nische im größten Anbaugebiet Rheinland-Pfalz (Rhein Hessen) genommen und wie reagieren die Winzer im Wonnegau darauf?“. TU Kaiserslautern, Kaiserslautern. Fachbereich Raum- und Umweltplanung.
- Jakob, L. (2012): Lexikon der Önologie. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Jaleel, C. A.; Manivannan, P.; Wahid, A.; Farooq, M., Al-Juburi, H.; Somasundaram, R.; Panneerselvam, R. (2009): Drought Stress in Plants: A Review on Morphological Characteristics and Pigments Composition. In: *International Journal of Agriculture & Biology* (11), S. 100–105.
- Jones, G. V.; White, M. A.; Cooper, O. R.; Storchmann, K. (2005): Climate Change and Global Wine Quality. In: *Climatic Change* 73 (3), S. 319–343.
- Kadereit, J. W.; Körner, C.; Kost, B.; Sonnewald, U. (2014): Strasburger, Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften. 37. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
- Kadisch, E.; Müller, E. (Hg.) (2008): Weinbau. 3., vollst. neu bearb. Aufl. Stuttgart: Ulmer (Der Winzer, 1).
- Kastanek, F.; Zartl, A.; Cepuder, P.; Loiskandl, W. (Hg.) (2001): Prinzip und Praxis des virtuellen Lysimeters. In: BAL-Bericht über die 9. Gumpensteiner Lysimetertagung. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft. Irdning: BALGumpenstein.
- Keller, K. P. (1999): Einfluss von reflektierenden Folien auf das Traubenzonenmikroklima, die Inhaltsstoffzusammensetzung und den optimalen Lesezeitpunkt vom Spätburgunder. Diplomarbeit, FH Wiesbaden/Geisenheim.
- Knoll, M. (2008): Fotosyntheseleistung von Zweigelt-Reben (*Vitis vinifera* L.) im pannonischen Klimaraum. Einfluss von Wasserversorgung, Blattalter und Kaliumversorgung. Dissertation, Wien. Institut für Pflanzenschutz, DAPP, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Koohafkan, P. (2011): The state of the world's land and water resources for food and agriculture. Managing systems at risk. Abingdon: Earthscan.
- Koundouras, S.; van Leeuwen, C.; Seguin, G.; Glories, Y. (1999): Influence of water status on vine vegetative growth, berry ripening, and wine characteristics in

- Mediterranean zone (example of Nemea, Greece, variety Saint-George, 1997). In: *International Journal of Vine and Wine Sciences* (33), S. 149–160.
- Larcher, W. (1995): Larcher, W. (Hrsg.): Ökophysiologie der Pflanzen. In: *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* (2), S. 207.
- Laville, P. (1993): Unités de terroir naturel et terroir. Une distinction nécessaire pour redonner plus de cohérence au système d'appellation d'origine. In: *Bulletin de l'O.I.V.*, 66 (745-746), S. 227–251.
- Lenz, E. (2021): Weinbergsbewässerung: So viel müssen Iphofens Winzer zahlen. Wer übernimmt die Rechnung für das größte Infrastrukturprojekt der Stadtgeschichte? Bis zu 20 Millionen Euro! Winzer und Stadt finden eine Lösung, die beide Seiten als fair beurteilen. In: *Main Post*, 12.07.2021.
- Leser, H. (Hg.) (2011): Diercke Wörterbuch Geographie. Raum - Wirtschaft und Gesellschaft - Umwelt. 15., völlig überarb. Aufl. Braunschweig: Westermann.
- Löhnertz, O. (1988): Untersuchungen zum zeitlichen Verlauf der Nährstoffaufnahme bei *Vitis vinifera* C. V. Riesling. Gießen, Univ., Diss., 1988. Geisenheim: Ges. zur Förderung d. Forschungsanst. Geisenheim (Geisenheimer Berichte, 1).
- Loose, S.; Strub, L. (2021): Wenig Wasser, hohe Kosten. Klimawandel. Welche Auswirkungen Ertragsverluste durch Trockenheit auf die Erzeugungskosten haben. 14/21 (14), S. 14–18.
- Lorenz, D. H.; Eichhorn, K. W.; Bleicholder, H.; Klose, R.; Meier, U.; Weber, E.: Phänologische Entwicklungsstadien der Weinrebe (*Vitis vinifera* L. ssp. *vinifera*). In: *Vitic. Enol. Sci.*, Bd. 49, S. 66–70.
- Maertens, C.; Blanchet, R.; Ahmadi, N.; Lobgre, G.; Salez, P. (1981): Influence des caractères hydriques du milieu racinaire et aérien sur le potentiel de l'eau dans les feuilles de quelques types variétaux de soja et confrontation à leur comportement agronomique. In: *Agron. Sustain. Dev.* 1 (3), S. 199–206.
- Marschner, H.; Marschner, P. (Hg.) (2012): Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3rd ed. London, Waltham, MA: Academic Press.
- Matthews, M. A.; Anderson, M. M.; Schultz, H. R. (1987): Phenologic and growth responses to early and late season water deficits in Cabernet franc. 26(3), S. 147–160.
- Mehofer, M.; Schmuckenschlager, B.; Hanak, K.; Vitovec, N.; Prinz, M. (2013): Zweijährige Untersuchungen zum Einfluss der Laubwandhöhe auf Blattfläche und Reifeparameter der Rebsorten 'Grüner Veltliner' und 'Zweigelt. Klosterneuburg (63).
- Meinke, M. (1982): Langjährige Erfahrungen mit der Strohabdeckung in Hang- und Steillagen. In: *Der Badischer Winzer* 1982 (11), S. 523–524.
- Michael, T. (2016): Diercke - Weltatlas. Braunschweig: Westermann.

- Mohotti, A. J.; Lawlor, D. W. (2002): Diurnal variation of photosynthesis and photoinhibition in tea: effects of irradiance and nitrogen supply during growth in the field. In: *J Exp Bot* 53 (367), S. 313–322.
- Mohr, H.; Schopfer, P. (1992): Pflanzenphysiologie. Mit 144 Tabellen. 4., völlig Neubearb. und aktualisierte Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer (Springer-Lehrbuch).
- Mott, K. A.; Buckley, T. N. (1998): Stomatal heterogeneity. In: *Journal of Experimental Botany* (49 Special Issue), S. 407–417.
- Mühr, B. (2021): Der Übergang zur neuen Bezugsperiode 1991 – 2020 und die klimatologischen Verhältnisse im Jahr 2020 in Deutschland. Hg. v. Karlsruhe Institute of Technology. Karlsruhe Institute of Technology.
- Müller, C. (2014): Effects from climate change, adaptations and greenhouse gas reduction at 2050. Programmbeschreibung. Department of Geography Giessen, Geisenheim.
- Müller, E. (2006): Bewässerung – die Antwort auf den Klimawandel? - Bodenkundliche und pflanzenphysiologische Grundlagen. 50. Kreuznacher Wintertagung 2006. Kreuznach.
- Müller, E. (Hg.) (2019): Der Winzer 1. Weinbau.
- Müller, M. (1990): Die Bodenfruchtbarkeit und deren Beeinflussung durch den Menschen. Schweizerische Gesellschaft für Phytomedizin, bodenkundliche Gesellschaft der Schweiz-nationales Forschungsprogramm «Boden». 14. Aufl. Forschungsanstalt für landwirtschaftlichen Pflanzenbau. Neuenburg.
- Myburgh, P. A. (2011): Response of *Vitis vinifera* L. cv. Merlot to Low Frequency Irrigation and Partial Root Zone Drying in the Western Cape Coastal Region – Part II. Vegetative Growth, Yield and Quality. In: *SAJEV* 32 (1).
- Niggli, C. (2011): Bodenbedeckung und Bewässerung im Weinbau. In: *Ithaka Journal*, S. 108–112.
- Niggli, C. (2012): Der Wasserhaushalt der Weinrebe 1, S. 71–74.
- Ojeda, H.; Deloire, A.; Carbonneau, A. (2001): Influence of water deficits on grape berry growth. In: *Vitis* (40 (3)), 141-146.
- Oren, R.; Sperry, J. S.; Katul, G. G.; Pataki, D. E.; Ewers, B. E.; Phillips, N.; Schäfer, K. V. R. (1999): Survey and synthesis of intra- and interspecific variation in stomatal sensitivity to vapour pressure deficit. In: , Bd. 22, S. 1515–1526.
- Pachauri, R. K.; Mayer, L. (Hg.) (2015): Climate change 2014. Synthesis report. Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Patzel, N.; Sticher, H.; Karlen, D. L. (2000): Soil Fertility — Phenomenon and Concept. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163 (2), S. 129–142.
- Patzwahl, W. (2007): Bewässerung im Weinbau. Stuttgart: Ulmer (Rebe & Wein).

- Pellegrino, A.; Lebon, E.; Voltz, M.; Wery, J. (2004): Relationships between plant and soil water status in vine (*Vitis vinifera* L.). In: *Plant Soil* 266 (1-2), S. 129–142.
- Perret, P.; Koblet, W.; Haab, M. (1989): Bodenpflegemaßnahmen zur Steuerung des zeitlichen Stickstoffangebotes im Rebbau. In: *Zeitschrift für Obst- und Weinbau* 1989 (125), S. 616–626.
- Petgen, M. (2010): Die Natur lenken - Mit welchen weinbaulichen Strategien lässt sich der Zuckerertrag regulieren? 63. Weinbautage. Hg. v. Neustadt DLR Rheinpfalz. Neustadt.
- Petgen, M. (2015): Zur Biologie der Rebe: Was passiert bei Wasserstress? DLR Rheinpfalz Abteilung Weinbau und Oenologie. DLR Rheinpfalz.
- Petgen, M.; Rau, M. (2014): Reifereduzierende Maßnahmen. Wie könnte eine erfolgsversprechende Anpassungsstrategie auf den Klimawandel aussehen? Teil II. Hg. v. Das Deutsche Weinmagazin. DLR Rheinpfalz, Abteilung Weinbau und Oenologie Neustadt (10).
- Pretty, J.; Sutherland, W. J.; Ashby, J.; Auburn, J.; Baulcombe, D.; Bell, M. et al. (2010): The top 100 questions of importance to the future of global agriculture. In: *International Journal of Agricultural Sustainability* 8 (4), S. 219–236.
- Priewe, J. (2017): Wein - Die große Schule. München: ZS Verlag GmbH.
- Prior, B. (2003): Qualitätssicherung im Weinbau durch gezielte Bewässerung. Erste Erfahrungen aus Rheinhessen im Jahr 2003.
- Prior, B. (2005): Tropfbewässerung zur Qualitäts- und Ertragssicherung im Weinbau. - Grundlagen und erste Versuchsergebnisse aus Rheinhessen. In: *Das Deutsche Weinmagazin*, (8), S. 32–37.
- Prior, B. (2006a): Bewässerung und Qualität – was sagen die Versuche aus Rheinhessen? Kreuznach. Papierform (pdf).
- Prior, B. (2006b): Was bringt eine Tropfbewässerung? In: *Der Deutsche Weinbau* (5), S. 14–17.
- Prior, B. (2011): Einfluss der Wasserversorgung auf Wuchs, Ertrag, Mostgewicht und Botrytisbefall. Versuchsjahre 2009 und 2010. In: *Das Deutsche Weinmagazin* (9), S. 10–16.
- Prior, B. (2012): Einfluss von Bodenpflegesystem und Tropfbewässerung (Riesl.). Hg. v. Neustadt DLR Rheinpfalz.
- Prior, B. (2014): Wasserversorgung von Weinbergsböden. Einflussfaktoren und standortangepasste Bodenpflege. In: *Das Deutsche Weinmagazin*, 2014 (7), S. 24–30.
- Redl, H.; Ruckenbauer, W.; Traxler, H. (1996): Weinbau heute. Handbuch für Beratung, Schulung und Praxis. 3., völlig neu bearb. Aufl. Graz, Stuttgart: Stocker (Praxisbuch Weinbau).
- Reynolds, A. G.; Lowrey, W. D.; Savigny, C. (2005): Influence of Irrigation and Fertigation on Fruit Composition, Vine Performance, and Water Relations of Concord and

- Niagara Grapevines. In: *American Journal of Enology and Viticulture* 2005 (56(2)), 110-128.
- Reynolds, A. G.; Lowrey, W. D.; Tomek, L.; Hakimi, J.; Savigny, C. de (2007): Influence of Irrigation on Vine Performance, Fruit Composition, and Wine Quality of Chardonnay in a Cool, Humid Climate. In: *American Journal of Enology and Viticulture* (58(2)), S. 217–228.
- Reynolds, A. G.; Naylor, A. P. (1994): 'Pinot noir' and 'Riesling' Grapevines Respond to Water Stress Duration and Soil Water-holding Capacity. In: *HortSci* 29 (12), S. 1505–1510.
- Richter, H. (1977): Saugspannung und Wasserbilanz: ein Beitrag zu Ihrer Interpretation 1976 (18), S. 29–41.
- Robinson, J. (2015): *The Oxford Companion to Wine*. Unter Mitarbeit von Julia Harding. 4th ed. Oxford: Oxford University Press Incorporated (Oxford Companions Ser).
- Rodrigues, P.; Pedroso, V.; Gouveia, J. P.; Martins, S.; Lopes, C.; Alves, I. (2012): Influence of soil water content and atmospheric conditions on leaf water potential in cv. "Touriga Nacional" deep-rooted vineyards. In: *Irrig Sci* 30 (5), S. 407–417.
- Rogiers, S. Y.; Hatfield, J. M.; Keller, M. (2015): Irrigation, nitrogen, and rootstock effects on volume loss of berries from potted Shiraz vines. 1 Pages / *VITIS - Journal of Grapevine Research*, Vol. 43 No. 1 (2004): Vitis.
- Rosenzweig, C.; Hillel, D. (1998): Climate Change and the Global Harvest: Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. *Carbon Dioxide, Climate Change and Crop Yields*, S. 70–100.
- Rowell, D. L.; Munch, J. C. (1997): *Bodenkunde. Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen*. Berlin: Springer.
- Rühl, E.; Alleweldt, G. (1985): Investigations into the influence of time of irrigation on yield and quality of grape-vines. In: *Acta Hort.* (171), S. 457–462.
- Rupp, D. (2005): Topfbewässerung: Mehrjährige Ergebnisse. In: *Der Deutsche Weinbau* (5), S. 14–17.
- Rupp, D.; Fox, R.; Tränkle, L. (1995): Die Sicherung der Stickstoffversorgung von Reben durch Eingriffe in die Dauerbegrünung - Fazit 5jähriger Untersuchungen. In: *Rebe & Wein* 1995 (4), S. 119–124.
- Sacks, G. L.; Pan, B.; Ennahli, S.; Tarlton, L.; Wise, A.; Lerch, S. D. et al. (2010): Impact of Severity and Timing of Basal Leaf Removal on 3-Isobutyl-2-Methoxypyrazine Concentrations in Red Winegrapes. In: *Am J Enol Vitic.* 61 (3), S. 358–364.
- Schanderl, H. (1930): Untersuchungen über die Photosynthese einiger Rebsorten, speziell des Rieslings, unter natürlichen Verhältnissen. *Wiss. Arch. Landwirtsch., Abt. A, Pflanzenbau.* In: Bd. 3, S. 529–560.

- Schiefer, H. C.; Gunnar, T. (2018): Wird durch eine höhere Laubwand die Traubenqualität besser? Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg. Weinsberg.
- Scholander, P. F.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A.; Hammel, H. T. (1965): Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. In: *Science (New York, N.Y.)* 148 (3668), S. 339–346.
- Schönthaler, K.; Andrian-Werbung, S. von (2015): Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Hg. v. Umweltbundesamt. Dessau-Roßlau.
- Schopfer, P. (1976): Experimentelle Pflanzenphysiologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Schopfer, P. (1989): Einführung in die Anwendungen. Berlin, Heidelberg: Springer (Experimentelle Pflanzenphysiologie, 2).
- Schopfer, Peter; Brennicke, Axel (1999): Pflanzenphysiologie. 5th ed. 1999. Berlin: Springer Heidelberg; Imprint Springer.
- Schubert, S. (2018): Pflanzenernährung. 3., vollständig überarb. Auflage. Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer (UTB Agrarwissenschaften, 2802).
- Schultz, H. R. (2005): Physiologische Veränderungen im Wasserhaushalt der Rebe und der Traube bei Trockenheit. XV. Kolloquium Internationaler Arbeitskreis Begrünung im Weinbau. Vortrag beim XV. Kolloquium des Internationaler Arbeitskreis für Bodenbewirtschaftung und Qualitätsmanagement im Weinbau, Weinsberg, FA Geisenheim. Geisenheim.
- Schultz, H. R. (1997): Structure and care of the canopy. In: *Obstbau Weinbau* (34), S. 214–215.
- Schultz, H. R.; Deppisch, C. (2003): Technischer Einsatz und Eignung von reflektierenden Unterstockfolien zur Produktion von hochwertigen Weinen in Hang- und Direktzuglagen. Abschlussbericht zum ATW-Vorhaben 121. Hg. v. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL) Darmstadt. ATW – Ausschuss für Technik im Weinb. Darmstadt.
- Schultz, H. R.; Hoppmann, D.; Hofmann, M. (2012): Der Einfluss klimatischer Veränderungen auf die phänologische Entwicklung der Rebe, die Sorteneignung sowie Mostgewicht und Säurestruktur der Trauben. Beitrag zum Integrierten Klimaschutzprogramm des Landes Hessen (InKlim 2012) des Fachgebiets Weinbau der Forschungsanstalt Geisenheim. Hg. v. Forschungsanstalt Geisenheim. Fachbereich Weinbau.
- Schultz, H. R.; Matthews, M. A. (1997): High vapour pressure deficit exacerbates xylem cavitation and photoinhibition in shade-grown *Piper auritum* HB & K. during prolonged sunflecks. In: *Oecologia* (11), Artikel 3, S. 312–319.

- Schultz, H. R.; Steinberg, B. (2002a): Wasserhaushalt der Rebe und Möglichkeiten der Tropfbewässerung. In: *Das Deutsche Weinmagazin* (21), Artikel Teil 1, S. 30–35.
- Schultz, H. R.; Steinberg, B. (2002b): Wasserhaushalt der Rebe und Möglichkeiten der Tropfbewässerung. In: *Das Deutsche Weinmagazin* (26), Artikel Teil 2., S. 16–21.
- Schultz, H. R.; Stoll, M.; Hofmann, M. (2016): Klimawandel und Weinbau. In: *Geographische Rundschau*, Bd. 3, S. 20–26.
- Schwab, A. (1998a): Rindenmulchabdeckung - Eine Alternative zur Begrünung in Steillagen? In: *Der Badischer Winzer* 1998a (12), S. 488–490.
- Sharkey, T. D.; Seemann, J. R. (1989): Mild water stress effects on carbon-reduction-cycle intermediates, ribulose biphosphate carboxylase activity, and spatial homogeneity of photosynthesis in intact leaves. In: *Plant physiology* 89 (4), S. 1060–1065.
- Shimomura, K. (1967): Effects of soil moisture on the growth and nutrient absorption of grapes · Acta Agron. Acad., Kawaguchi-City, Chiba, Japan. Aoki-Cho.
- Siebert, S.; Döll, P. (2007): Irrigation water use—A global perspective. In: *Global Change - Enough Water for All?*, S. 104–107.
- Smart, R. E. (1985): Principles of Grapevine Canopy Microclimate Manipulation with Implications for Yield and Quality. A Review. In: *American Journal for Enology and Viticulture* (36(3)), S. 230–239.
- Smirnoff, N. (1993): The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation. In: *The New phytologist* 125 (1), S. 27–58.
- Smirnoff, N.; Stewart, G. R. (1985): Nitrate assimilation and translocation by higher plants: Comparative physiology and ecological consequences. In: *Physiol Plant* 64 (2), S. 133–140.
- Stevens, R. M.; Harvey, G.; Aspinall, D. (1995): Grapevine growth of shoots and fruit linearly correlate with water stress indices based on root-weighted soil matric potential. In: *Aust J Grape Wine Res* 1 (2), S. 58–66.
- Stoll, M.; Tittmann, S.; Schultz, H. R. (2012): Laubwand -so viel wie nötig. In: *Der Deutsche Weinbau* (11), S. 22–24.
- Szalay, D.; Eitzinger, J.; Palocz-Andresen, M.; Csoknyai, T. (2021): Klimafitte Landwirtschaft. Herausforderungen im Kontext des globalen Wandels. Hg. v. Dora Szalay, Josef Eitzinger, Michael Palocz-Andresen und Tamas Csoknyai. Stiftung Aktion Österreich-UNgarn (AÖU). Ungarn.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; Murphy, A. (2015): *Plant physiology and development*. Sixth Edition. Sunderland, Mass.: Sinauer Assoc.
- Tamhane, A. C. (1977): Multiple comparisons in model i one-way anova with unequal variances. In: *Communications in Statistics - Theory and Methods* 6 (1), S. 15–32.

- Tenhunen, J. D.; Lange, O. L.; Gebel, J.; Beyschlag, W.; Weber, J. A. (1984): Changes in photosynthetic capacity, carboxylation efficiency, and CO₂ compensation point associated with midday stomatal closure and midday depression of net CO₂ exchange of leaves of *Quercus suber*. In: *Planta* 162 (3), S. 193–203.
- Tenhunen, J. D.; Lange, O. L.; Harley, P. C.; Beyschlag, W.; Meyer, A. (1985): Limitations due to water stress on leaf net photosynthesis of *Quercus coccifera* in the Portuguese evergreen scrub. In: *Oecologia* 67 (1), S. 23–30.
- Tyree, M. T.; Sperry, J. S. (1988): Do woody plants operate near the point of catastrophic xylem dysfunction caused by dynamic water stress?: answers from a model. In: *Plant physiology* 88 (3), S. 574–580.
- van Leeuwen, C.; Trégoat, O.; Choné, X.; Bois, B.; Pernet, D.; Gaudillère, J. P. (2009): Vine water status is a key factor in grape ripening and vintage quality for red Bordeaux wine. How can it be assessed for vineyard management purposes? In: *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin* 43 (3), S. 121–134.
- Vogt, E.; Schruft, G.; Becker, N. (2000): Weinbau. 100 Tabellen. 8., völlig neu bearb. Aufl. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Vršič, S.; Vodovnik, T. (2012): Reactions of grape varieties to climate changes in North East Slovenia. In: *Plant Soil Environ.* 58 (No. 1), S. 34–41.
- Wachendorf, M.; Buerkert, A.; Graß, R. (Hg.) (2022): Ökologische Landwirtschaft. Eugen-Ulmer-Verlag. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- Walg, O. (2011): Minimalschnitt im Spalier: Eine neue Erziehung mit Zukunft? In: *Der Winzer* (12), S. 15–18.
- Walter, H. (1962): Einführung in die Phytologie. Grundlagen des Pflanzenlebens. In: *Einführung in die Phytologie*, 172 ff.
- Waring, R. H. (1970): Die Messung des Wasserpotentials mit der SCHOLANDER-Methode und ihre Bedeutung für die Forstwissenschaft. In: *Forstw Cbl* 89 (1), S. 195–200.
- Weigel, H.-J. (2005); Manderscheid, Remi; Pacholski, Andreas; Burkart, Stefan; Jansen, Gisela: Mehr CO₂ in der Atmosphäre: Prima Klima für die Landwirtschaft? Effekte auf Pflanzenwachstum und -qualität. In: Forschungs Report, S. 14–17.
- Wiegand, C. L.; Namken, L. N. (1966): Influences of Plant Moisture Stress, Solar Radiation, and Air Temperature on Cotton Leaf Temperature 1. In: *Agronomy Journal* 58 (6), S. 582–586.
- Williams, L. E.; Dokoozlian, N. K. (1994); Wample, R.: Handbook of environmental physiology of fruit crops. Volume 1: Temperature Crops. Unter Mitarbeit von Larry E. Williams, Nick K. Dokoozlian, Robert Wample. In: Boca Raton, S. 85–133.
- Williams, L. E.; Trout, T. J. (2005): Relationships among Vine- and Soil-Based Measures of Water Status in a Thompson Seedless Vineyard in Response to High-Frequency Drip Irrigation. In: *Am J Enol Vitic.* 56 (4), S. 357–366.

- Wisser, D.; Frolking, S.; Douglas, E. M.; Fekete, B. M.; Vörösmarty, C. J.; Schumann, A. H. (2008): Global irrigation water demand: Variability and uncertainties arising from agricultural and climate data sets. In: *Geophys. Res. Lett.* 35 (24).
- Zufferey, V.; Verdenal, T.; Spangenberg, J. E.; Lorenzini, F.; Spring, J.-L.; Viret, O. (2015): Effect of fertilisation timing on the partitioning of foliar-applied nitrogen in *Vitis vinifera* cv. Chasselas: a ¹⁵N labelling approach. In: *Australian Journal of Grape and Wine Research* 21 (1), S. 110–117.

Internetquellen

- Agrarmeteorologie Rheinland-Pfalz (2023): Sonnenscheindauer Rheinhessen. Fundstelle: <https://www.dlr.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/cc619a07ed6c4634c1257800003dca56/e1bac07ca3c5cf92c1257171002e8a33?OpenDocument&TableRow=2.1.2,2.6#2.1.>, zuletzt geprüft am 02.08.2023.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2014): Bioabfallverordnung und Hinweise zum Vollzug der novellierten Bioabfallverordnung (2012). Fundstelle: <https://www.bmu.de/gesetz/bioabfallverordnung-und-hinweise-zum-vollzug-der-novellierten-bioabfallverordnung-2012/>, S. 1–105, zuletzt geprüft am 14.03.2022.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2014): Bioabfallverordnung und Hinweise zum Vollzug der novellierten Bioabfallverordnung (2012). Fundstelle: <https://www.bmu.de/gesetz/bioabfallverordnung-und-hinweise-zum-vollzug-der-novellierten-bioabfallverordnung-2012/>, S. 1–105, zuletzt geprüft am 03.06.2021.
- Copernicus Climate Change Service, C3S (2021): 2020 war das wärmste Jahr in Europa seit Beginn der Aufzeichnungen; auch weltweit war es das Wärmste gleichauf mit 2016. Bologna, Italien. NURIA LOPEZ. Online verfügbar unter <https://climate.copernicus.eu/2020-warmest-year-record-europe-globally-2020-ties-2016-warmest-year-recorded>, zuletzt geprüft am 23.09.2021.
- Deutscher Wetterdienst: Vieljährige Mittelwerte. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/vielj_mittelwerte.html, zuletzt geprüft am 29.04.2023.
- Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück 2023: Jahresmittelwerte Rheinhessen. Online verfügbar unter <https://www.dlr.rlp.de/Internet/AM/NotesAM.nsf/cc619a07ed6c4634c1257800003dca56/e1bac07ca3c5cf92c1257171002e8a33?OpenDocument&TableRow=2.1.2,2.6#2.1.>, zuletzt geprüft am 25.07.2023.
- Helmholtz-Zentrum Hereon (2023): Bodenmatrix. Online verfügbar unter https://www.gerics.de/cgi-bin/fts_cms21.pl?SEARCH=Bodenmatrix&HTML-NR=cms21_de&lingua=de&dg=all, zuletzt geprüft am 17.04.2021.
- Heldt, Hans Walter; Piechulla, Birgit (2014): Pflanzenbiochemie. 5. Aufl. 2015. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflicht-1609064>, zuletzt geprüft am 10.11.2021.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (2013): Climate change 2013. The physical science basis ; summary for policymakers, a report of Working Group I of the IPCC, technical summary, a report accepted by Working Group I of the IPCC

- but not approved in detail and frequently asked questions ; part of the Working Group I contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Intergovernmental Panel on Climate Change. Online verfügbar unter <http://www.ipcc.ch/>, zuletzt geprüft am 23.06.2022.
- Microsoft: Auswählen der besten Trendlinie für Ihre Daten. Hg. v. Microsoft. Microsoft. Redmond, WA 98052-6399, USA. Online verfügbar unter <https://support.microsoft.com/de-de/office/ausw%C3%A4hlen-der-besten-trendlinie-f%C3%BCr-ihre-daten-1bb3c9e7-0280-45b5-9ab0-d0c93161daa8>, zuletzt geprüft am 26.04.2023.
- Miehle-Huang, R. (2009): Sehlicht versus Wuchslicht. Augsburg. Online verfügbar unter https://www.hereinspaziert.de/Sehlicht_2009/Vorwort.htm, zuletzt geprüft am Juli 2009.
- Nibelungenstadt Worms 2023: Worms-Pfeddersheim. Hg. v. Nibelungenstadt Worms. Worms. Online verfügbar unter <https://www.worms.de/neude/stadtteil/pfeddersheim/Ueber-Pfeddersheim.php>, zuletzt geprüft am 12.06.2023.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 202: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Hg. NOAA. Washington, D.C., Vereinigte Staaten. Online verfügbar unter <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>, zuletzt geprüft am 25.07.2023.
- Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2020): Klimawandel Vergangenheit. Entwicklung der Sonnenscheindauer in der weinbaulichen Vegetationszeit (April-Oktober). Hg. v. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität. Mainz. Online verfügbar unter https://www.kwis-rlp.de/daten-und-fakten/klimawandel-vergangenheit/#user_download_pi1-researcharea, zuletzt geprüft am 09.09.2021.
- Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen (2021): Witterungsrückblick. Jahr 2020. Hg. v. Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen. Trippstadt. Online verfügbar unter <https://www.kwis-rlp.de/fr/service/witterungsrueckblick/>, zuletzt geprüft am 22.04.2022.
- Tischelmayer, Nobert (o. A.a): Fertigation. Hg. v. Nobert Tischelmayer. Erlangen. Online verfügbar unter <https://glossar.wein.plus/fertigation>, zuletzt geprüft am 27.04.2023.
- Tischelmayer, Nobert (o.A.b): Schnittholzgewicht. Hg. v. Nobert Tischelmayer. Erlangen. Online verfügbar unter <https://glossar.wein.plus/schnittholzgewicht>, zuletzt geprüft am 29.05.2023.
- Tischelmayer, Nobert (o.A.c): Verrieseln. Hg. v. Nobert Tischelmayer. Erlangen. Online verfügbar unter <https://glossar.wein.plus/verrieseln>, zuletzt geprüft am 06.05.2022.

Tischelmayer, Nobert (2021): Kober 5 BB. Hg. v. Nobert Tischelmayer. Erlangen. Online verfügbar unter <https://glossar.wein.plus/kober-5-bb>, zuletzt geprüft am 12.06.2023.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Wasserhaushaltswaage der Rebe (Niggli 2012), verändert – [Eigene Darstellung 2021].....	-16-
Abbildung 2	Wasserpotentiale im Boden-Pflanze-Atmosphäre System (Schopfer & Brennicke 2010, verändert).....	-19-
Abbildung 3	Temperaturabhängigkeit von Photosynthese und Atmung, Strasburger et. al (1988) – verändert nach Larcher (1980).	-29-
Abbildung 4	Verlauf der Stickstoffaufnahme bei ausreichender Feuchte und vorherrschender Trockenheit, verändert nach Fox 2000.....	-32-
Abbildung 5	Stickstoffaufnahme und -gehalt von Reben im Jahresverlauf, Müller 2019	-34-
Abbildung 6	Anbauregion Wonnegau, (Deutsches Weininstitut o. A.), verändert.....	-35-
Abbildung 7	Stadtbezirke der kreisfreien Stadt Worms, (Alicke 2009), verändert.....	-35-
Abbildung 8	Eingrenzung der Versuchsparzelle (rot) – Luftbildaufnahme – Pfeddersheimer Kreuzblick, [Eigene Darstellung 2021]	-37-
Abbildung 9	Pfeddersheimer-Kreuzblick, Versuchsparzelle für 2021 und 2022 der Rebsorte Riesling; [Eigene Darstellung 2021].....	-38-
Abbildung 10	Versuchsvarianten V 1-3: Unterstockabdeckung, flächendeckende Abdeckung und Kontrollvariante, Pfeddersheim 2021-2022, [Eigene Darstellung 2021].....	-39-
Abbildung 11	Versuchsvariante V4: moderate Tropfbewässerung; Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand, [Eigene Darstellung 2021]	-40-

Abbildung 12	Schematischer Aufbau einer Scholander-Druckkammer (Matyssek & Herppich 2017, verändert).....	-43-
Abbildung 13	Scholander-Druckkammer – Armatur, Pfeddersheim, [Eigene Darstellung 2021]......	-44-
Abbildung 14	Monatsmitteltemperatur (a+aa), Niederschlagssummen (b+bb) und Sonnenschein-stunden (c+cc) der Versuchsjahre 2021 und 2022 der Agrarmeteorologie RLP- Station Worms-Leiselheim (ca. 3 km Entfernung zum Versuchsstandort) im Vergleich zum langjährigen Mittel (1990-2020), (Deutscher Wetterdienst, DWD)	-54-
Abbildung 15	Verlauf der Bodenfeuchtigkeit θ_v (%v/v) von 0,10 m bis 1,00 m Bodentiefe und Verlauf der täglichen Niederschlagssummen (mm) innerhalb der Kontrollvarian-te (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) zwischen Juni und Oktober des Versuchsjahr 2021 (a-ee). Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand. θ_v entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.	-57-
Abbildung 16	Verlauf der Bodenfeuchtigkeit θ_v (%v/v) von 0,10 m bis 1,00 m Bodentiefe und Verlauf der täglichen Niederschlagssummen (mm) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderater Bewässerung (MB) zwischen Mai und Oktober des Versuchsjahr 2022 (a-ee). Unterscheidung zwischen langer und kurzer Laubwand. θ_v entspricht dem Durchschnittswert aus $n = 4$ Messwerten.....	-59-
Abbildung 17	Einblick: Bodenfeuchtemessung in der Variante: Unterstockabdeckung, Pfeddersheim 2022, [Eigene Darstellung 2022].	-60-
Abbildung 18	Verlauf der Bodenfeuchte (θ_v , a+aa) bis 1,00 Meter Bodentiefe, Verlauf des Blattwasserpotentials (Ψ_{pd} , b+ bb) und der Verlauf der Niederschläge (c+cc) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und einer flächendeckenden Abdeckung (HH+) im Zeitraum 15. Juni bis 01. Oktober. Kurze (0,70 m) und lange (1,40 m) Laubwand. θ_v gleicht dem Durchschnittswert aus 4 Messwerten, Ψ_{pd} setzt sich aus dem Durchschnittswert von $n = 4$ Messwerten zusammen.	-63
Abbildung 19	Verlauf der Bodenfeuchte (θ_v , a+aa) bis 1,00 Meter Bodentiefe, Verlauf des Blattwasserpotentials (Ψ_{pd} , b+bb) und der Verlauf der Niederschläge (c+cc) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und einer flächendeckenden Abdeckung (HH+) im Zeitraum 30. Mai bis 14. Oktober.	

- Unterscheidung zwischen kurzer (0,70 m) und langer (1,40 m) Laubwand. Θ_v gleicht dem Durchschnittswert aus 4 Messwerten, Ψ_{pd} setzt sich aus dem Durchschnittswert von n = 4 Messwerten zusammen. -66-
- Abbildung 20 Zusammenhang zwischen dem frühmorgendlichen Wasserpotential (Ψ_{pd}) und dem Bodenwassergehalt (Θ_v) bis 1,00 m Bodentiefe in 2021 und 2022. Θ_v und Ψ_{pd} entsprechen dem Durchschnittswert von n = 4 Messwerten. Regressionsgleichung im Anhang. -68-
- Abbildung 21 Blattstiel-Nitratkonzentrationsverlauf für 2022. Erste Nitrataufnahmephase (Blüte bis Fruchtansatz), zweite Nitrataufnahmephase (Traubenschluss bis Reifebeginn), MB = moderate Bewässerung, HH = Unterstock Holzhäcksel, OB = ohne Bedeckung. -70-
- Abbildung 22 Zusammenhang zwischen der Blattstielnitratkonzentration ($\text{mg NO}_3/\text{L}$) und dem frühmorgendlichen Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) des Versuchsjahr 2022 im Versuchsfeld "Pfeddersheimer Kreuzblick". $C_{\text{mgNO}_3/\text{L}}$ entspricht dem Durchschnittswert aus n = 15 Messwerten, Ψ_{pd} entspricht dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten. -71-
- Abbildung 23 Tagesgänge von Stammwasserpotentialmessungen: Lange u. kurze Laubwand (Ψ_{stem} , a + b), Niederschlag (c), VPD, (Wasserdampfsättigungsdefizit d), Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (e) vom 15. Juni bis zum 01. Oktober 2021 (15-minütige Werte als gemittelte Tageswerte). Ψ_{stem} entspricht dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten. -75-
- Abbildung 24 Tagesgänge von Stammwasserpotentialmessungen: Lange u. kurze Laubwand (Ψ_{stem} , a + b), Niederschlag (c), Wasserdampfsättigungsdefizit (VPD, d), Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (e) vom 30. Mai bis zum 14. Oktober 2022 (15-minütige Werte als gemittelte Tageswerte). Ψ_{stem} entspricht dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten. -78-
- Abbildung 25 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und der Lufttemperatur 2 m ü. Gr. vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04.00 und 22.00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen. Regressionsgleichung s. Anhang. -80-
- Abbildung 26 Stammwasserpotentialmessung: Rebenblatt in lichtundurchlässige PVC-Tüte, hier: HH – kurze Laubwand, Pfeddersheim 2021. -81-

- Abbildung 27 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotential- gradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und der Lufttemperatur 2 m ü. Gr. vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04.00 und 22.00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen (a-bb). Regressionsgleichung s. Anhang. -82-
- Abbildung 28 Zusammenhang zwischen dem Stammwasserpotential (Ψ_{stem}) sowie dem Stammwasserpotentialgradienten ($\Delta\Psi_{\text{stem}}$) und der Lufttemperatur 2 m ü. Gr. vom 17. Juni bis zum 19. Juni 2021 bzw. 23. August bis zum 26. August 2022 zwischen 04.00 und 22.00 Uhr unter variierenden Witterungsbedingungen (a-bb). Regressionsgleichung s. Anhang. -83-
- Abbildung 29 CO₂-Abnahme (ppmv/s) 2022 innerhalb eines Messzeitraumes von 5 Minuten. CO₂ – und Licht- sensor samt Rebenblatt luftdicht in einer 2l Plastiktüte ver-packt. Messwerte zwischen 12:00 und 13:30 Uhr ermittelt. Kontrollvariante (OB), moderate Bewässerung (MB), Holzhäcksel Unter stock (HH). CO₂-Daten entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten. -86-
- Abbildung 30 Zusammenhang zwischen dem CO₂ -Aufnahme (ppmv/s) sowie dem Blattwasserpotential (Ψ_{pd}) und vom 19. Juni bis 04. September 2022 zwischen 12:00 und 13:30 Uhr. Messung innerhalb lichtdurchlässiger Plastiktüten. Mittelwerte entsprochen n = 4 Messwerten, Regressionsgleichung s. Anhang. -88-
- Abbildung 31 Trockenstress: Vitalität von Blatt und Beeren für die Varianten der langen Laubwände im Versuchsjahr 2022: OB, MB und HH, Pfeddersheim 27. August 2022, [Eigene Darstellung 2022]. -89-
- Abbildung 32 Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a+b) der Oberflächentemperatur des Bodens (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächige Bodentemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten..... -92-
- Abbildung 33 Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a+b) der Oberflächentemperatur des Bodens (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockbedeckung (HH), flächendeckenden Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB) in den Versuchsjahren 2021 und 2022. Bodenoberflächentemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.. -93-

Abbildung 34	Bodentemperaturen, Bodenbedeckung versus nichtbedeckter Variante, Infrarotaufnahme und Originalbild, 15:00 Uhr, Pfeddersheim 28. August 2022, [Eigene Darstellung 2022]	-94-
Abbildung 35	Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb) der Oberflächentemperatur der Beeren (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächentemperatur der Beeren (°C) entspricht dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.	-97-
Abbildung 36	Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) der Oberflächenbeeren-temperatur (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB) im Versuchsjahr 2022. Oberflächentemperatur der Beeren (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.....	-100-
Abbildung 37	Beerentemperaturen, Bodenbedeckung versus nichtbedeckte Varianten, Infrarotaufnahme und Originalbild, 15:00 Uhr, Pfeddersheim 25. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].	-102-
Abbildung 38	Tagesgang am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb) der Oberflächentemperatur des Blattes (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+) im Versuchsjahr 2021. Oberflächige Blatttemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten.....	-105-
Abbildung 39	Tagesgang am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) der Oberflächentemperatur des Blattes (°C) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderater Bewässerung (MB). Oberflächige Blatttemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten	-108-
Abbildung 40	Oberflächentemperatur der Blätter, Bodenbedeckung versus nichtbedeckte Varianten, Infrarotaufnahme und Originalbild, 15:00 Uhr, Pfeddersheim 23. August 2022, [Eigene Darstellung 2022].	-110-
Abbildung 41	Tagesgang der inneren Lufttemperatur (°C) der Laubwand am 21. Juli und 15. August 2021 (-bb) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH) und flächendeckender Abdeckung (HH+). Innere Laubwandtemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten	-113-

- Abbildung 42 Tagesgang der inneren Lufttemperatur (°C) der Laubwand am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb) zwischen der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckender Abdeckung (HH+) und moderaten Bewässerung (MB). Innere Laubwandtemperaturen (°C) entsprechen dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten. -115-
- Abbildung 43 Zusammenhang zwischen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) und der Beerenoberflächentemperatur im Versuchsjahr 2022 (a+b). Tagesmessung (19. Juli und 04. August) von 06:00-22:00 Uhr. OB = Ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock. PAR entspricht dem Durchschnittswert aus n = 4 Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang -117-
- Abbildung 44 Tagesgang von Lufttemperatur und der Transpirationsrate zweier Tagesmessungen (21. Juli und 15. August 2021, a-bb) innerhalb der Kontrollvariante (OB) und Unterstockabdeckung (HH), Unterscheidung zwischen langer (1,40 m) und kurzer (0,70 m) Laubwand. TR entspricht dem Durchschnittswert von n = 4 Messwerten. Lufttemperatur besteht aus 15-minütig gemittelten Werten..... -120-
- Abbildung 45 Tagesgang von Lufttemperatur und der Transpirationsrate zweier Tagesmessungen (19. Juli und 04. August 2022, a-bb) innerhalb der Kontrollvariante (OB), Unterstockabdeckung (HH), flächendeckenden Abdeckung (HH+), moderaten Bewässerung (MB). Unterscheidung zwischen langer (1,40 m) und kurzer (0,70 m) Laubwand. TR entspricht dem Durchschnittswert von n = 4 Messwerten. Lufttemperatur setzt sich aus 15-minütig gemittelten Werten zusammen -122-
- Abbildung 46 Zusammenhang zwischen der Transpirationsrate und der Lufttemperatur im Versuchsjahr 2021 und 2022. Tagesmessung (21. Juli und 15. August 2021; 19. Juli und 04. August 2022, a-bb) von 08:00-22:00 Uhr. TR entspricht dem Durchschnittswert aus West- und Ostseiten mit jeweils n = 4 Messwerten. Regressionsgleichung s. Anhang. -124-
- Abbildung 47 Tagesgang der Blattoberflächen-/ Lufttemperatur und Transpirationsrate am 21. Juli und 15. August 2021 (a-bb), Blatttranspiration = Säulendiagramm, Lufttemperatur = grüne Verlaufslinie, Blattoberflächentemperatur = durchgezogene/gestrichelte Verlaufslinie, OB-O = Ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = Ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, Blatttemperatur und -transpiration entsprechen dem Mittelwert aus n = 4 Messwerten, Lufttemperatur ergibt sich aus 15-minütig gemittelten Werten..... -128-

- Abbildung 48 Tagesgang der Blattoberflächen-/ Lufttemperatur und Transpirationsrate am 19. Juli und 04. August 2022 (a-bb), Blatttranspiration = Säulendiagramm, Lufttemperatur = grüne Verlaufslinie, Blatttemperatur = durchgezogene/gestrichelte Verlaufslinie, OB-O = Ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = Ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite, Blatttemperatur und -transpiration entsprechen dem Mittelwert aus $n = 4$ Messwerten, Lufttemperatur ergibt sich aus 15-minütig-gemittelten Werten..... -130-
- Abbildung 49 Zusammenhang zwischen Transpirationsrate (TR) und Oberflächentemperatur Blatt am 21. Juli und 15. August 2021 bzw. 19. Juli und 04. August 2022 zwischen 8:00 und 20:00 Uhr (a-bb). Unterscheidung zwischen kurzer und langer Laubwand bzw. Ost- und Westseite; TR: $n = 4$; Oberflächentemperatur Blatt: $n = 4$; HH = Unterstock – Holzhäcksel, OB = Ohne Bedeckung; MB = moderate Bewässerung; Regressionsgleichung s. Anhang. -132-
- Abbildung 50 Zusammenhang zwischen Transpirationsrate (TR) und dem Wasserdampfsättigungsdefizit (VPD) im Versuchsjahr 2021 und 2022 (a-bb). Tagesmessung (21. Juli und 15. August 2021; 19. Juli und 04. August 2022) von 08:00 – 22:00 Uhr (a-bb). TR entspricht dem Durchschnittswert aus West- und Ostseiten $n = 4$ Messwerten. Regressionsgleichung im Anhang. -135-
- Abbildung 51 Verlauf der Mostgewichtsmessungen ($^{\circ}$ Oechsle) der jeweiligen Varianten und des Versuchsjahres 2021 während der Reifephase ($n = 4$; \pm Standardabweichung). OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock, HH+ = flächendeckend Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand..... -136-
- Abbildung 52 Verlauf der Mostgewichtsmessungen ($^{\circ}$ Oechsle) der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2022 während der Reifephase ($n = 4$; \pm Standardabweichung). OB = Ohne Bedeckung, HH = Holzhäcksel Unterstock, HH+ = Holzhäcksel flächendeckend, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand. -140-
- Abbildung 53 Verlauf des Säuregehaltes im Most (gemessen als Weinsäure) der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2021 während der Reifephase. Säure entspricht dem Durchschnittswert aus ($n = 4$) \pm Standardabweichung. OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckend Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand -143-

- Abbildung 54 Verlauf der Säuremessungen der jeweiligen Varianten des Versuchsjahres 2022 während der Reifephase (n = 4; ± Standartabweichung). OB Kurz = Ohne Bedeckung kurze Laubwand, HH Kurz = Holzhäcksels Unterstock kurze Laubwand, HH+ Kurz = Holzhäcksels flächendeckend kurze Laubwand, OB Lang = Ohne Bedeckung lange Laubwand, HH Lang = Holzhäcksels Unterstock lange Laubwand, HH+ Lang = Holzhäcksels flächendeckend lange Laubwand, MB Kurz = moderate Bewässerung kurze Laubwand, MB Lang = moderate Bewässerung kurze Laubwand.. -147-
- Abbildung 55 Mittlerer Traubenertrag der einzelnen Varianten der Versuchsjahre 2021 und 2022 (a-bb) nach der zu Lese (n = 4 ± Standartabweichung); signifikante Unterschiede bei p < 0,001 nach Scheffé Test. Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen Signifikanzen bei p < 0,001, < 0,01, < 0,05 und nicht signifikant OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäckselsabdeckung Unterstock, HH+ = Holzhäckselsabdeckung flächendeckend, MB = moderate Bewässerung -150-
- Abbildung 56 Beerensorten der langen und kurzen Laubwand: OB (ohne Bedeckung), MB (moderate Bewässerung), HH (Holzhäcksels Unterstock), HH+ (flächendeckend Holzhäcksels), [Eigene Darstellung 2022]. -152-
- Abbildung 57 Durchschnittliche Schnittholzgewichte der einzelnen Varianten der Versuchsjahre 2021 und 2022 (a-bb) während des Rebschnittes im Dezember (n = 4; ± Standartabweichung); unterschiedliche Sterne zwischen den Varianten innerhalb einer Variante entsprechen signifikanten Unterschieden bei p < 0,05 nach Scheffé-Test. Kennzeichnung: ***, **, * und n.s. entsprechen Signifikanzen bei p < 0,001, < 0,01, < 0,05 und nicht signifikant OB = ohne Bedeckung, HH = Holzhäckselsabdeckung Unterstock, HH+ = Holzhäckselsabdeckung flächendeckend, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand -154-

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Charakterisierung der Projektfläche [Eigene Darstellung 2021]- 37 -
Tabelle 2	Weinbergsbodentextur des Versuchsstandortes "Pfeddersheimer Kreuzblick" von 0 - 100 cm Tiefe, in Gew.- %. Analyseergebnisse durch Herrn Harke; verändert 2021.- 42 -
Tabelle 3	Zusammenfassung der Bodenfeuchtwerte bis zum 14. Juli 2021- 62 -
Tabelle 4	Zusammenfassung der Bodenfeuchtwerte bis zum 30. Juni2022- 65 -
Tabelle 5	Maximale Beerenoberflächentemperaturen am 15. August 2021. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, Messwerte aus n = 4, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+ O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+ W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite; Oberflächentemperatur der Beeren besteht aus n = 4 Messwerten- 99 -
Tabelle 6	Maximale Beerenoberflächentemperaturen am 04. August 2022. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, Messwerte aus n = 4 Messwerten, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bedeckung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite; Oberflächentemperatur der Beeren besteht aus n = 4 Messwerten.- 102 -
Tabelle 7	Maximale Blattoberflächentemperaturen am 15. August 2021. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, Messwerte aus n = 4, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bewässerung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock Westseite, HH+O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckend Westseite, Oberflächentemperaturen der Blätter bestehen aus n = 4 Messwerten- 107 -
Tabelle 8	Maximale Blattoberflächentemperatur am 04. August 2022. Unterscheidung von kurzer und langer Laubwand, OB-O = ohne Bedeckung Ostseite, OB-W = ohne Bewässerung Westseite, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH-W = Holzhäcksel Unterstock, HH-O = Holzhäcksel Unterstock Ostseite, HH+O = Holzhäcksel flächendeckend Ostseite, HH+-W = Holzhäcksel flächendeckende Westseite, MB-O = moderate Bewässerung Ostseite, MB-W = moderate Bewässerung Westseite, Oberflächentemperatur der Blätter bestehen aus n = 4 Messwerten.- 110 -
Tabelle 9	Übersicht über Mostgewichtsmessungen der einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.- 139 -

- Tabelle 10 Übersicht über Mostgewichtsmessungen 2022, mittlere Mostgewichte (Oechsle °) der einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.- 142 -
- Tabelle 11 Übersicht über Säuremessungen des Versuchsjahres 2021, mittlere Mostgewichte (Oechsle °) der einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand.- 146 -
- Tabelle 12 Übersicht über Säuremessungen des Versuchsjahres 2022, mittlere Säurewerte (Säure g*L⁻¹) der einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = lange Laubwand, Kurz = kurze Laubwand .- 149 -
- Tabelle 13 Übersicht über Traubenertrag (kg + ar⁻¹) der Versuchsjahre 2021 und 2022 für einzelnen Varianten (n=6), OB = ohne Bedeckung, HH = Unterstock Holzhäcksel, HH+ = flächendeckende Holzhäcksel, MB = moderate Bewässerung, Lang = Lange Laubwand, Kurz = Kurze Laubwand- 152 -

Anhang

Tabelle 1 Regressionsgleichungen zu den Abbildungen 20 – 50 mit Bestimmtheitsmaßen und Versuchsformen für 2021 und 2022

Abb. Nr.	Laubwandlänge	Variante	Regressionsgleichung	R ²
Abb. 20 a	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0054x^2 + 0,2324x - 2,6414$	0,730
		HH	$y = -0,0025x^2 + 0,1238x - 1,6096$	0,866
		HH+	$y = -0,0018x^2 + 0,0972x - 1,3345$	0,858
		MB	$y = -0,0036x^2 + 0,1687x - 2,0948$	0,754
Abb. 20 b	Kurze Laubwand	OB	$y = -0,0018x^2 + 0,0939x - 1,282$	0,846
		HH	$y = -0,0014x^2 + 0,0798x - 1,1434$	0,856
		HH+	$y = -0,0014x^2 + 0,0776x - 1,1131$	0,869
		MB	$y = -0,0023x^2 + 0,1134x - 1,4878$	0,913
Abb. 22 a	Lange Laubwand	OB	$y = -1E-05x^2 + 0,0041x - 0,4379$	0,805
		HH	$y = -2E-05x^2 + 0,006x - 0,4836$	0,712
		MB	$y = -1E-07x^2 + 0,0009x - 0,3008$	0,526
Abb. 22 b	Kurze Laubwand	OB	$y = -1E-05x^2 + 0,0037x - 0,3666$	0,865
		HH	$y = -1E-05x^2 + 0,0041x - 0,3456$	0,830
		MB	$y = -1E-05x^2 + 0,0037x - 0,3685$	0,882
Abb. 25 a	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0005x^2 - 0,0149x - 0,2225$	0,906
		HH	$y = -0,0018x^2 + 0,0529x - 0,8636$	0,896
		HH+	$y = -0,0022x^2 + 0,0758x - 1,1343$	0,816
		MB	$y = -0,0017x^2 + 0,0479x - 0,7624$	0,965
Abb. 25 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = -0,0008x^2 + 0,0053x - 0,355$	0,863
		HH	$y = -0,0019x^2 + 0,0684x - 1,0294$	0,875
		HH+	$y = -0,0019x^2 + 0,0684x - 1,0044$	0,875
		MB	$y = 0,0001x^2 - 0,0438x + 0,2144$	0,949
Abb. 25 b	Lange Laubwand	OB	$y = 0,0005x^2 + 0,0155x - 0,1054$	0,877
		HH	$y = 0,0011x^2 - 0,0236x + 0,3134$	0,916
		HH+	$y = 0,0016x^2 - 0,0502x + 0,6427$	0,841
		MB	$y = 0,0014x^2 - 0,0379x + 0,4043$	0,962

Abb. 25 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = -4E-05x^2 + 0,0345x - 0,3097$	0,854
		HH	$y = 0,0012x^2 - 0,0355x + 0,4752$	0,812
		HH+	$y = 0,0012x^2 - 0,0318x + 0,4213$	0,803
		MB	$y = -0,0004x^2 + 0,054x - 0,5911$	0,932
Abb. 27 a	Lange Laubwand	OB	$y = 0,0004x^2 - 0,0344x - 0,7511$	0,890
		HH	$y = 3E-05x^2 - 0,0216x - 0,3987$	0,942
		HH+	$y = -3E-05x^2 - 0,0193x - 0,3766$	0,893
		MB	$y = 8E-05x^2 - 0,0241x - 0,2851$	0,948
Abb. 27 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = 0,0002x^2 - 0,0246x - 0,4537$	0,910
		HH	$y = -0,0001x^2 - 0,0111x - 0,3944$	0,897
		HH+	$y = -0,0001x^2 - 0,0114x - 0,3689$	0,902
		MB	$y = 0,0004x^2 - 0,0347x - 0,3502$	0,955
Abb. 27 b	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0003x^2 + 0,0281x + 0,5171$	0,667
		HH	$y = -2E-07x^2 + 0,0153x + 0,2295$	0,887
		HH+	$y = 5E-05x^2 + 0,0133x + 0,2149$	0,851
		MB	$y = -2E-05x^2 + 0,019x + 0,0581$	0,942
Abb. 27 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = -0,0002x^2 + 0,0198x + 0,3052$	0,783
		HH	$y = 8E-05x^2 + 0,009x + 0,2409$	0,737
		HH+	$y = 7E-05x^2 + 0,0093x + 0,2345$	0,717
		MB	$y = -0,0004x^2 + 0,0337x + 0,0755$	0,945
Abb. 28 a	Lange Laubwand	OB	$y = 9E-08x^2 - 0,0005x - 1,1094$	0,308
		HH	$y = 4E-07x^2 - 0,0007x - 0,6512$	0,324
		HH+	$y = 3E-07x^2 - 0,0007x - 0,6328$	0,245
		MB	$y = 4E-07x^2 - 0,0008x - 0,642$	0,364
Abb. 28 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = 3E-07x^2 - 0,0006x - 0,7186$	0,341
		HH	$y = 3E-07x^2 - 0,0007x - 0,5521$	0,324
		HH+	$y = 3E-07x^2 - 0,0007x - 0,5271$	0,324
		MB	$y = 3E-07x^2 - 0,0007x - 0,7733$	0,424
Abb. 28 b	Lange Laubwand	OB	$y = -3E-09x^2 + 0,0003x + 0,7903$	0,301
		HH	$y = -3E-07x^2 + 0,0006x + 0,407$	0,368

		HH+	$y = -2E-07x^2 + 0,0005x + 0,4029$	0,261
		MB	$y = -3E-07x^2 + 0,0007x + 0,3596$	0,360
Abb. 28 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = -2E-07x^2 + 0,0005x + 0,4999$	0,370
		HH	$y = -2E-07x^2 + 0,0005x + 0,3483$	0,357
		HH+	$y = -2E-07x^2 + 0,0005x + 0,3435$	0,350
		MB	$y = -2E-07x^2 + 0,0005x + 0,4764$	0,414
Abb. 30 a	Lange Laubwand	OB	$y = 0,1148x^2 + 0,0052x - 0,3991$	0,956
		HH	$y = -0,0833x^2 + 0,462x - 0,639$	0,817
		MB	$y = 0,0886x^2 + 0,0217x - 0,3869$	0,779
Abb. 30 b	Kurze Laubwand	OB	$y = -0,2185x^2 + 0,8343x - 0,9059$	0,856
		HH	$y = -0,3203x^2 + 1,2191x - 1,221$	0,774
		MB	$y = -0,2227x^2 + 0,8507x - 0,9127$	0,845
Abb. 43 a	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0021x^2 + 0,4185x + 17,349$	0,784
		HH	$y = -0,0015x^2 + 0,3543x + 18,188$	0,770
Abb. 43 b	Kurze Laubwand	OB	$y = -0,0019x^2 + 0,3918x + 19,059$	0,738
		HH	$y = -0,0012x^2 + 0,3178x + 19,443$	0,723
Abb. 46 a	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0008x^2 + 0,1137x - 1,19$	0,874
		HH	$y = -0,0002x^2 + 0,0777x - 0,8255$	0,822
Abb. 46 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = 0,0517x - 0,6867$	0,871
		HH	$y = 0,0018x^2 - 0,0335x + 0,5653$	0,851
Abb. 46 b	Lange Laubwand	OB	$y = 0,0036x^2 - 0,1739x + 2,7667$	0,785
		HH	$y = 0,8819\ln(x) - 2,2379$	0,668
		MB	$y = 0,0042x^2 - 0,216x + 3,5791$	0,713
Abb. 46 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = 1,3198\ln(x) - 3,9633$	0,678
		HH	$y = 0,0052x^2 - 0,2811x + 4,3506$	0,819
		MB	$y = 0,0053x^2 - 0,2866x + 4,5097$	0,626
Abb. 49 a	Lange Laubwand	OB	$y = 1,3012\ln(x) - 3,1052$	0,775
		HH	$y = 0,0552x - 0,0052$	0,676
Abb. 49 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = 0,0416x - 0,3914$	0,916
		HH	$y = 0,0481x - 0,2035$	0,740

Abb. 49 b	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0014x^2 + 0,1092x - 1,1537$	0,860
		HH	$y = 0,0005x^2 + 0,0007x + 0,3971$	0,610
		MB	$y = 0,0007x^2 - 0,0077x + 0,5843$	0,658
Abb. 49 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = 0,001x^2 - 0,0333x + 0,6168$	0,719
		HH	$y = 0,0023x^2 - 0,1099x + 1,89$	0,631
		MB	$y = 0,0024x^2 - 0,1083x + 1,8979$	0,687
Abb. 50 a	Lange Laubwand	OB	$y = 0,4895\ln(x) - 0,2545$	0,691
		HH	$y = -6E-05x^2 + 0,0422x + 0,5879$	0,796
Abb. 50 aa	Kurze Laubwand	OB	$y = 0,0001x^2 + 0,0305x + 0,1766$	0,749
		HH	$y = -8E-05x^2 + 0,0355x + 0,402$	0,758
Abb. 50 b	Lange Laubwand	OB	$y = -0,0002x^2 + 0,0259x + 0,1771$	0,645
		HH	$y = 0,0003x^2 + 0,0008x + 0,5316$	0,818
		MB	$y = 0,0204x + 0,2704$	0,757
Abb. 50 bb	Kurze Laubwand	OB	$y = 3E-05x^2 + 0,0134x + 0,0925$	0,754
		HH	$y = 0,0006x^2 - 0,0232x + 0,8065$	0,878
		MB	$y = 0,0006x^2 - 0,0257x + 0,9074$	0,748

Lebenslauf

Aktuelle Tätigkeit

seit 2021

- fachwissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Physische Geographie, FB Raum- und Umweltplanung, RPTU Kaiserslautern-Landau; Prof. Dr. rer. nat. Sascha Henninger
- promotionsbegleitend: Mitarbeiter in der Winzergenossenschaft Monsheim
- promotionsbegleitend ab 2022: Mitarbeiter im Weingut Keller in Flörsheim-Dalsheim

Berufspraxis

2018 - 2020

Honorarlehrkraft: Realschule Plus in Bobenheim-Roxheim

2017 - 2018

Studentische Hilfskraft: Energieunternehmen EWR AG in Worms

Bildungsweg

2015 - 2020

Studium: Geographie und Sport, TU Kaiserslautern;
Abschluss: Master

2015

Abitur, Eleonoren-Gymnasium Worms