
Optimierung des Landschaftswasserhaushaltes in der Region Krems

Innovative Methoden zur Bewässerungssteuerung im Weinbau

Endbericht 2021-2023

NÖ Landschaftsfonds
Amt der NÖ Landesregierung
Landhausplatz 1
Haus 12
3109 St. Pölten

Ansprechperson: DI Werner Jester

April 2024



Verein Land schafft Wasser
Pollnbergstraße 1
3252 Petzenkirchen
office@landschafftwasser.at
www.landschafftwasser.at
ZVR: 200575196

Inhaltsverzeichnis

1. Zusammenfassung	3
2. Hintergrund und Überblick über die Projektlaufzeit	4
3. Einrichtung der Messstellen	5
3.1 Messstationen Loibenberg und Loiben Tal	5
3.2 Monitoringeinrichtungen.....	7
3.2.1 Matrixpotenzial im Boden.....	7
3.2.2 Saftstromfluss	7
3.2.3 Dendrometermessungen	8
3.2.4 Blattoberflächentemperatur mittels Infrarotkamera.....	9
3.2.5 Topfversuche Weinbauschule Krems.....	9
4. Ergebnisse.....	11
4.1 Bodenkennwerte	11
4.2 Meteorologische Einordnung der Messperioden	11
4.3 Ergebnisse der Messungen an den Versuchsstandorten	14
4.3.1 Frühmorgendliches Blattwasserpotenzial – Scholanderbombe.....	14
4.3.2 Boden (Matrixpotential)	16
4.3.3 Saftflussmessungen	19
4.3.4 Dendrometer	21
4.3.5 Blattwand-Oberflächentemperatur	23
4.3.6 Modellrechnung über einfachen Wasserbilanzansatz	28
4.3.7 Topfversuche	30
5. Schlussfolgerungen für die Bewässerungssteuerung.....	32
5.1 Alternative Messmethoden zur Scholanderbombe	32
5.2 Eignung der Variablen zur Vorhersage von Trockenstress/Trockenperioden	36
5.3 Wochenberichte	40
6. Literatur	41
7. Anhang.....	41
8. Abbildungsverzeichnis	46

1. Zusammenfassung

Der Weinbau in Niederösterreich ist aufgrund des Klimawandels vielen Herausforderungen ausgesetzt. Durch die steigenden Temperaturen und veränderte Niederschlagsmuster steigt der Bedarf an zusätzlicher Bewässerung der Weinreben bei gleichzeitiger zunehmender Wasserknappheit. Derzeit werden in der Praxis kaum systematische Verfahren oder Messungen als Grundlage für eine Bewässerungsempfehlung herangezogen. Im Versuchs- und Beratungsbetrieb der Wein- und Obstbauschule Krems wird seit etlichen Jahren das frühmorgendliche Blattwasserpotenzial, gemessen mit Scholanderbomben, als Grundlage für eine Bewässerungsempfehlung herangezogen. Ziel dieses Projektes war es nun, verschiedene weniger aufwändige und dennoch leistbare Messmethoden zu evaluieren, die generell in der Lage sind, Phasen des Trockenstresses für die Weinreben abzubilden. Darauf basierend soll eine Methodik erarbeitet werden, wie solche Messungen oder auch Berechnungsverfahren für eine Kurzfrist-Prognose des Bewässerungsbedarfs eingesetzt werden könnten. Zu diesem Zweck wurden in Unterloiben in der Wachau sowohl in Tallage (Loiben Tal) als auch am Weinberg (Loibenberg) drei Messtandorte mit Sensoren an den Pflanzen und im Boden versehen und zusätzlich Wetterstationen installiert. Zwei Standorte wurden wie bisher bewässert, am Standort Loibenberg jedoch zusätzlich auch ein unbewässerter Abschnitt untersucht.

Analysiert wurden die zwei Messjahre 2022 und 2023, jeweils mit einem Fokus auf die für den Wein relevante Hauptvegetationsperiode von Mai bis Oktober. In beiden Jahren kam es zu einer Ausbildung von länger anhaltenden Trockenphasen während des Sommers und teilweise auch im Herbst, mit entsprechendem Bewässerungsbedarf. Keine der untersuchten Parameter bildete die Ergebnisse der Blattwasserpotentialmessungen 1:1 ab, dennoch gibt es einige Kennwerte, die, v.a. in Kombination, gut geeignet scheinen Trockenphasen abzubilden, bzw. vorherzusagen. Am besten geeignet für Bewässerungsempfehlungen sind demnach das Matrixpotential im Boden, die klimatische Wasserbilanz, sowie, mit Einschränkungen, die Differenz aus Blattoberflächen- und Lufttemperatur. Zusätzlich zu den Messwerten wurde auch ein Modell berechnet, welches aus Wetterdaten, hydrologischen Bodeneigenschaften und groben Kennwerten zur Pflanzenentwicklung die Wasserbilanz abschätzt. Auch dieses Modell eignet sich grundsätzlich zur Bewässerungssteuerung mit dem Vorteil, dass es ohne großen technischen Aufwand mit anderen Methoden kombiniert werden kann. Die meiste der beobachteten Parameter bringen gewisse Vorteile gegenüber der bisherigen Vorgehensweise, bedürfen zum Teil aber noch weiterer Forschung, vor allem was die genaue Festlegung von Schwellenwerten betrifft.

2. Hintergrund und Überblick über die Projektlaufzeit

In Niederösterreich hat die Kultivierung von Wein eine lange Tradition, demnach wird ihr auch ein sehr hoher Stellenwert, sowohl in der Landwirtschaft, als auch gesellschaftlich zugesprochen. Insbesondere die Wachau stellt einen einzigartigen Natur-, Kultur- und Wirtschaftsraum in Österreich dar. Die landschaftlich von Weinbau geprägte Region an der Donau zeichnet sich seit Jahrzehnten durch Kultivierung von Obst- und Weinbauprodukten höchster Qualitätsgüte aus. Gleichzeitig wird diese Region von seichtgründigen Böden und vorwiegend trockenen Standorten geprägt. Die somit notwendige Bewässerung wird von Bewässerungsgenossenschaften betrieben, wobei das Bewässerungsmanagement vorwiegend nach Wasserverfügbarkeit erfolgt.

Abhängig ist die Weinproduktion unter vielen anderen Faktoren aber immer auch vom jeweiligen Wettergeschehen während der gesamten Vegetationsperiode. Zunehmende Trocken- und Hitzeperioden können die Produktion erschweren (Eitzinger et al., 2013). Während andere Weinproduktionsländer bereits seit Jahrzehnten auf ein forschungsgestütztes Bewässerungsmanagement setzen (Cifre, et al., 2005), ist dieses Forschungs- und Anwendungsfeld in Österreich bisher wenigen Pionieren vorbehalten.

Individuelle Bewässerungsstrategien haben in den letzten Jahren dennoch Aufmerksamkeit erregt, nicht zuletzt auch aufgrund von Veränderungen der Niederschlagsverteilung im Jahresverlauf. Regionale und kleinklimatische Unterschiede in Niederösterreichs Weinbauregionen lassen keine allgemein gültigen Bewässerungsstrategien zu, zudem können verschiedene Rebsorten sehr unterschiedlich auf Hitze- und Trockenstress reagieren (Kührer, 2018). Klimawandel, sozio-ökonomische und ökologische Faktoren steigern zunehmend den Druck auf Landwirte nachhaltige, umwelt- und ressourcenschonende Bewässerungsstrategien einzusetzen. Mittels effizienter Bewässerungssteuerung kann ein hoher Zusatznutzen für die niederösterreichischen Weinbauern durch gesteigerte Qualitäts- und Ertragsicherheit erzielt werden.

Deshalb wurde an einem langjährigen Versuchsfeld der Wein- und Obstbauschule Krems und des Weinguts Knoll in Unterloiben eine Kombination aus verschiedenen Messmethoden installiert, die den Pflanzenwasserstatus und in Folge dessen den Bewässerungsbedarf bestimmen sollen. Um die agroklimatischen Unterschiede der in der Wachau typischen Standorte auf Terrassen und in der Talebene erfassen zu können, wurde jeweils ein Messstandort in diesen beiden Umgebungen festgelegt (Abbildung 1). Die Feldmessstellen wurden bereits 2021 mit zwei identen Wetterstationen versehen. Diese meteorologischen Messstellen liefern seit September 2021 kontinuierlich Daten zu Lufttemperatur, Niederschlag, relative Feuchtigkeit, Globalstrahlung, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Weiters wurden an den Messstandorten Matrixpotentialsensoren in zwei Tiefenstufen (15 und 30 cm) eingebaut. Auch diese Daten sind seit Herbst 2021 verfügbar.

Alle weiteren, auf die Pflanzenphysiologie ausgerichteten Messsensoren wurden erst im März 2022 geliefert und konnten somit zu Beginn der Vegetationsperiode 2022 installiert werden. Nachdem somit für 2022 erst ab dem späteren Frühjahr Daten verfügbar sind, war 2023 das erste Messjahr, das lückenlos erfasst werden konnte.

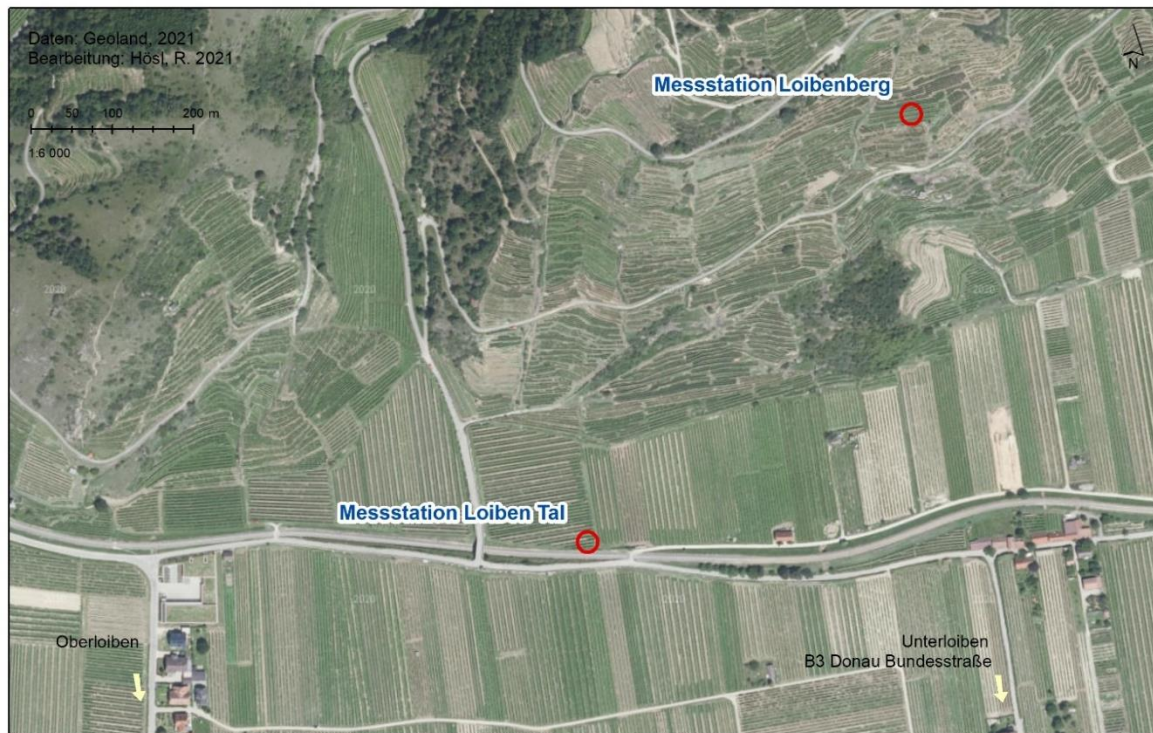


Abbildung 1: Übersicht Messstellen am Weinberg Loibenberg.

3. Einrichtung der Messstellen

3.1 Messstationen Loibenberg und Loiben Tal

Am Terrassenstandort Loibenberg wurden zwei unterschiedliche Teile des Weingartens untersucht. Wie im Großteil der gesamten Wachau waren die Versuchsflächen mit Grünem Veltliner kultiviert. Im Rahmen eines Langzeitversuchs in Zusammenarbeit mit der LFS Krems wurde dort auf einer Terrasse mit drei Pflanzenreihen die Bewässerung für etwa 30 Meter Länge abgeklemmt. So entstand ein direkter Vergleich von bewässerten und unbewässerten Reben am selben Standort. Drei Weinreben im bewässerten Bereich und drei Reben im unbewässerten Bereich wurden mit Sensorik ausgestattet (Abbildung 2). Jede der sechs Weinpflanzen wurde oberirdisch mit je einem Saftstromsensor und einem Dendrometer ausgestattet. Im Boden wurden je zwei Profile mit Matrixpotentialsensoren in den Tiefen 15 cm und 30 cm eingebaut und auf Höhe der Wetterstation wurde jeweils ein Infrarot-Radiometer zur Messung der Blattoberflächentemperatur installiert. Details zum verwendeten Equipment finden sich in Kapitel 2.2.

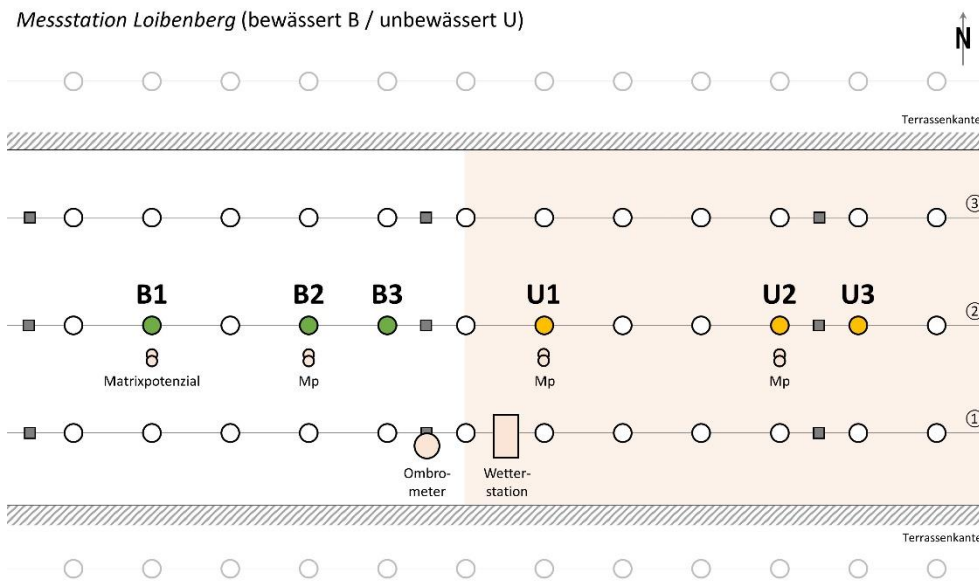


Abbildung 2: Skizze Messstelle Loibenberg. Kreise stellen Weinreben dar, gefüllte Kreise diejenigen Pflanzen, die mit Sensorik ausgestattet wurden. Rot hinterlegt der unbewässerte Bereich.

Eine weitere Messstelle wurde am Hangfuß des Loibensberger Hangs eingerichtet (Abbildung 1, Abbildung 3). Hier werden drei Weinreben ausschließlich in einem an die Bewässerungsanlage angeschlossenen Weingarten untersucht. Die Ausstattung der Messstelle ist ident mit der Messstelle auf der Terrasse, Saftstromsensoren und Dendrometer sind direkt an den Weinpflanzen installiert. Eine Infrarotkamera wurde ebenfalls eingerichtet, alle Sensoren senden über einen Datenlogger der Wetterstation online im 15-Minuten Intervall. Auch hier handelt es sich bei den Weinreben um die Sorte Grüner Veltliner.

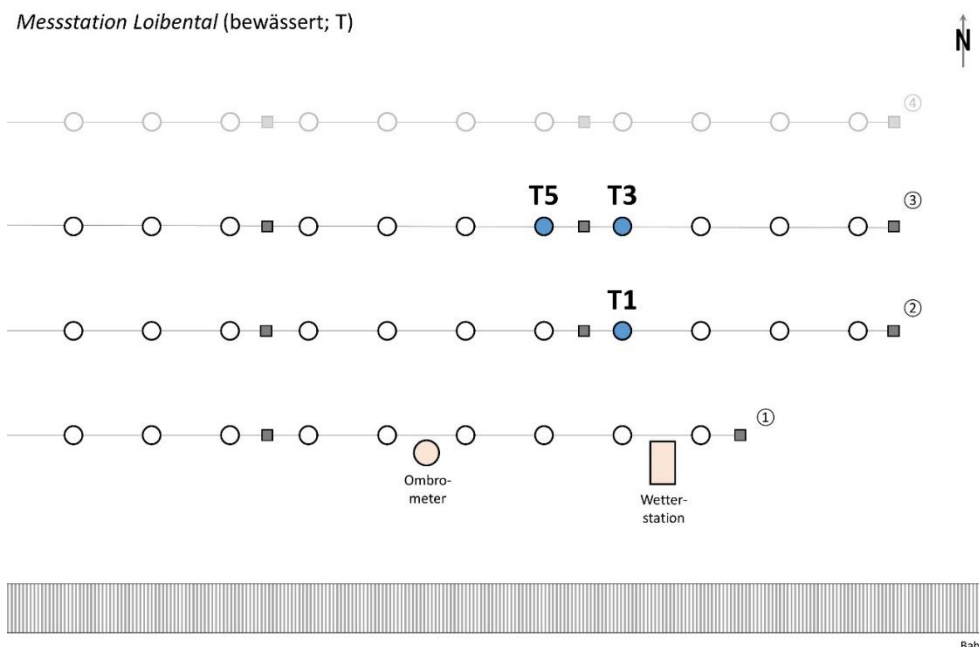


Abbildung 3: Skizze Messstelleneinrichtung Loiben Tal.

3.2 Monitoringeinrichtungen

3.2.1 Matrixpotenzial im Boden

Die Wasserverhältnisse im Boden können vorrangig durch Messungen des volumetrischen Wasseranteils oder des Matrixpotenzials gemessen werden. Während ersterer die Menge an Wasser in einem bestimmten Bodenbereich angibt, bietet zweiteres Auskunft über die Verfügbarkeit des Bodenwassers, zum Beispiel für die Aufnahme durch Pflanzenwurzeln. Für Fragestellungen im Zusammenhang mit Pflanzenwasserversorgung und Bewässerung ist also das Matrixpotenzial die aussagekräftigere Messgröße und wurde deshalb ins Versuchssetup aufgenommen. Die Messung erfolgt durch Sensoren im Boden, die einen Messwert in Hektopascal (hPa) ausgeben. Die Messgröße entspricht also einem Druck, da im Boden jedoch nahezu immer negative Werte gemessen werden, einem Unterdruck, beziehungsweise einer Spannung, die vereinfacht gesagt der Spannung entspricht, die die Pflanzenwurzel aufbringen muss, um Wasser aus dem Boden aufnehmen zu können. Je stärker negativ also dieser Messwert ist, desto geringer ist die Wasserverfügbarkeit im Boden und desto höher die Wahrscheinlichkeit für Wasserstress in der Pflanze.

Aufgrund des eher seichtgründigen Bodens am Loibenberg wurden die Sensoren in 15 cm und 30 cm Tiefe eingebaut. Die Wurzeln der Weinreben dürften in jedem Fall deutlich tiefer reichen und vor allem im Terrassenaufbau sehr unregelmäßig im Umfeld verteilt sein. Somit können die absoluten Messwerte für das Matrixpotenzial nicht direkt auf die Wasserverfügbarkeit für die Weinreben umgelegt werden. Andere internationale Untersuchungen zeigten aber, dass der Großteil des Wassers in den Phasen intensiver Wasseraufnahme (Austrieb, Traubenwachstum), die auch für Ertrag und Qualität maßgeblich sind, aus dem Bereich zwischen der flachen Wurzelzone der krautigen Vegetation (0 – ca. 10 cm) und dem wenig speicherfähigen Untergrund aufgenommen wird (Smart et al., 2006; Savi et al., 2019). Somit kann vor allem der Sensor in 30 cm Tiefe gute Aufschlüsse liefern, in 15 cm Tiefe wird ein gewisser Einfluss der krautigen Vegetation vorhanden sein.

3.2.2 Saftstromfluss

Zur Messung des Saftstroms der Weinpflanzen wurden Sensoren der Firma UGT (SFM-4) verwendet. Es handelt sich dabei um Sensoren, die eine Wärmeimpulsmessung durchführen. Der Sensorkopf besteht aus drei Nadeln. Bei der Installation werden drei Metallhülsen in den Stamm der Pflanze vorgebohrt, in die dann die befehteten (Gleitfett) Sensornadeln gesteckt werden (Abbildung 4). Die mittlere Nadel sendet in regelmäßigen Abständen (15 Minuten) einen Wärmeimpuls, die beiden äußeren Nadeln messen den Temperaturanstieg 60 Sekunden nach dem Hitzeimpuls, sowie die Maximaltemperatur, die nach dem Wärmeimpuls erreicht wird. Mittels mehrerer Rechenschritte werden daraus Saftstromraten berechnet (Genauerer unter ugt-online.de).

Der verwendete Sensor kann den Saftfluss von Bäumen mit einem Stammdurchmesser größer 1 cm messen. Die Stammdurchmesser der beprobten Weinpflanzen am Loibenberg reichen von etwa 2,5 cm bis 4,5 cm. Die Saftflusssensoren wurden, je nach Möglichkeit, auf einer Höhe von 50 cm bis 90 cm (über GOK) angebracht. Dabei wurde darauf geachtet, einen möglichst ebenmäßigen Abschnitt zu wählen, sowie überschüssige Rinde zu entfernen (Abbildung 4).



Abbildung 4: Links: Einbau Metallhülsen, Rinde geschält. Rechts: fertig installierter Saftflusssensor.

3.2.3 Dendrometermessungen

Zur Messung des Stammumfangs wurden Dendrometer der Firma EMS Brno verwendet (Dendrometer PDS40S). Die Sensoren wurden an jeder der neun beprobten Weinpflanzen installiert. Sie messen Veränderungen im Stammdurchmesser im Mikrometerbereich. Durch diese hohe Genauigkeit können nicht nur absolute Stammzuwächse gemessen werden, es wird auch der Tagesgang aufgenommen. Je nach Wasserverfügbarkeit kann so ein Quell- und Schrumpfvorgang im Stamm der Pflanze aufgezeichnet werden. Dieser Vorgang ist umso ausgeprägter, je besser eine Pflanze mit Wasser versorgt ist. Üblicherweise beginnt der Schrumpfvorgang (Sogwirkung des Saftstromes) am Vormittag, erreicht mittags bzw. am frühen Nachmittag sein Maximum und sinkt dann wieder gegen Abend hin. Ein hinlänglich untersuchter Indikator dazu ist die Maximum Daily Shrinkage (MDS; Intriglio et al., 2007). Dieser Wert beschreibt den Unterschied zwischen Tagesmaximum und Tagesminimum der Dendrometerwerte und gibt Auskunft darüber, ob eine Pflanze gut mit Wasser versorgt ist, oder unter Trockenstress leidet.

Die Dendrometer wurden zwischen 60 cm und 75 cm Höhe (über GOK) angebracht. Auch hier wurde, wenn nötig, die Rinde der Weinpflanzen reduziert, um einen möglichst glatten, ebenmäßigen Abschnitt für die Messung zu bekommen (Abbildung 5).



Abbildung 5: Installation Dendrometer.

3.2.4 Blattoberflächentemperatur mittels Infrarotkamera

Für die Ermittlung der Blattoberflächentemperatur wurden drei Infrarot-Radiometer installiert (Apogee Instruments, Typ SI 431 SS; Abbildung 6). Diese ermöglichen die kontaktlose Messung der mittleren Blattoberflächentemperatur über einem Ausschnitt einer geschlossenen Blattwand. Die Radiometer wurden im Juni 2022 montiert und sind so ausgerichtet, dass sie möglichst auf eine geschlossene Blattwand treffen, diese ist in den Weinbergen am Loibenberg etwa im Juni zu erwarten. Vergleicht man die so gemessene Blattoberflächentemperatur mit den Lufttemperaturen, kann so auf ein mögliches Wasserdefizit bei den Weinpflanzen geschlossen werden.



Abbildung 6: Radiometer zur Messung der Blattoberflächentemperatur.

3.2.5 Topfversuche Weinbauschule Krems

Der dritte Messstandort befindet sich bei der Obst- und Weinbauschule Krems. Hier wurden drei junge Weinpflanzen, ebenfalls der Sorte Grüner Veltliner, in Töpfen gepflanzt und auf Wägezellen gestellt (Abbildung 7). Die drei Töpfe befinden sich von der Witterung geschützt im Außenbereich der Fachschule unter Großraumregalen (Abbildung 8). Ihr Fassungsvermögen beträgt 60 Liter, zur

thermischen Dämmung wurden die eigentlichen Pflanztöpfe in größere, weiß lackierte Übertöpfe gestellt und der Zwischenraum wurde mit Blähton gefüllt.



Abbildung 7: Topfversuche, 3 Jungpflanzen, WBS Krems.



Abbildung 8: Topfversuch an der WBS Krems, geschützt vor der Witterung unter Großraumregalen.

Die drei Weinreben wurden im Mai 2022 mit Dendrometern und Matrixpotentialsensoren ausgestattet, für die Saftstrommessungen waren die Stammumfänge der Jungpflanzen zum Zeitpunkt der Pflanzung noch zu klein (< 1 cm). Zu Beginn der Vegetationsperiode 2023 wurde am größten Stamm der drei Topfpflanzen versuchsweise ein erster Saftflusssensor montiert. Die Gießvorgänge und die dazugehörigen Wassermengen sind über die permanenten Messungen der Wiegezellen genau zu verfolgen. Dieser Versuchsaufbau mittels Töpfe auf Wiegezellen soll, als Ergänzung zu den Feldversuchen am Loibenberg, eine Messsituation unter kontrollierten Bedingungen darstellen. Wasser kann hier gezielt gegeben und aufgezeichnet werden. Das Verhalten der Pflanzen bei Wasserdefizit kann Aufschluss über den Trockenstress bei Weinpflanzen geben. Zudem soll dieser Versuchsaufbau die Möglichkeit bieten, die verwendeten Sensoren zu kontrollieren und gegebenenfalls zu kalibrieren.

Alle drei Messstandorte, sowohl die beiden Standorte am Loibenberg, als auch der Topfversuch in der Weinbauschule Krems, sind als Langzeitversuche ausgelegt. Im vorliegenden Projekt können lediglich zwei Vegetationsperioden untersucht werden. Für tieferegreifende Analysen und Prognosen, sowie

Modellrechnungen, die dem Bewässerungsmanagement eine Hilfestellung in der Praxis sein können, wird empfohlen, die Versuche für weiterfolgende Vegetationsperioden fortzuführen.

4. Ergebnisse

4.1 Bodenkennwerte

Zu Projektbeginn wurden Bodenproben an den zwei Messstandorten geworben und auf grundlegende hydrologische Bodenkennwerte im Labor des IKT in Petzenkirchen untersucht (Tabelle 1). Der durchwurzelbare Bereich beträgt an beiden Standorten etwa 50 cm, der Boden wird durch hohe Schluffanteile geprägt und ist somit auch verhältnismäßig gut in der Lage, Wasser zu speichern (hohe nutzbare Feldkapazität; nFK).

Tabelle 1: Bodenkennwerte an den Messstandorten; Abkürzungen: S ... Sand, U ... Schluff, T ... Ton – jeweils Anteil an der Gesamtbodenmasse, TOC ... Gehalt an organischem Kohlenstoff, LD ... Lagerungsdichte, EL ... elektrische Leitfähigkeit, Ks ... gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, PV ... Gesamtporenvolumen, nFK ... nutzbare Feldkapazität (Wasserspeicherfähigkeit zwischen Matrixpotenzial von -60 hPa und -15 000 hPa).

Loibenberg

Horizont	Tiefe cm	S %	U %	T %	Grobstoff %	TOC % Masse	LD g / cm ³	pH	EL μS/cm	Ks mm/h	PV %	nFK %
A	0 - 15	18,2	72,9	8,9	15,9	0,7	1,61	7,4	64,7	50,10	40,70	24,00
AC	15 - 30	17,7	74,3	8,0	20,2	0,5	1,59	7,7	75,1	52,17	43,20	25,40
C	30 - 60	15,0	77,9	7,1	10,9	0,5		7,6	89,6			

Loiben Tal

Horizont	Tiefe cm	S %	U %	T %	Grobstoff %	TOC % Masse	LD g / cm ³	pH	EL μS/cm	Ks mm/h	PV %	nFK %
A	0 - 20	16,4	74,3	9,3	21,3	2,1	1,58	7,0	55,0	38,50	39,20	23,10
AC	20 - 50	18,7	74,1	7,1	25,8	0,7	1,61	7,2	57,7	59,58	34,40	18,70

4.2 Meteorologische Einordnung der Messperioden

Für die Einordnung der meteorologischen Bedingungen von Messjahren aus landwirtschaftlicher Sicht werden vor allem die Niederschlagsverteilung und die klimatische Wasserbilanz verwendet. Zweitere ist die Differenz von Niederschlag zur Referenzverdunstung, die vereinfacht gesamt für das Potenzial der oberflächennahen Atmosphäre steht, Wasser durch Verdunstung aufzunehmen. Die Referenzverdunstung wird meist nach den Vorgaben eines Leitfadens der FAO berechnet (Allen et al., 1998), die wesentlichen Eingangsgrößen sind die Temperatur, Windstärke und Einstrahlung.

Ein Vergleich der meteorologischen Daten der Vegetationsperioden 2022 und 2023 am Loibenberg mit den langjährigen Mittelwerten des Vergleichszeitraums 1990-2020 (ZAMG Wetterstation Krems, data.hub.zamg.ac.at) zeigt, dass das erste Quartal 2022 ausgesprochen trocken und warm verlief, von April bis Juni die Niederschläge über dem langjährigen Mittel lagen und die Temperaturen im Sommer deutlich höher als im Mittel waren (Abbildung 9). Durch die geringen Niederschläge zu Beginn des Jahres und anhaltend hoher Temperaturen über den Sommer kam es vor allem im Hoch- und Spätsommer zu einer Periode mit sehr geringen Matrixpotentialwerten und stark negativer klimatischer Wasserbilanz

(KWB), was auf eine Phase mit erheblichen Trockenstress für die Weinpflanzen schließen lässt (Abbildung 10). Erst stärkere Regenfälle im September konnten hier nachhaltige Abhilfe schaffen.

Das Messjahr 2023 startete ebenfalls mit überdurchschnittlich hohen Temperaturen im ersten Quartal, allerdings gefolgt von unterdurchschnittlichen Temperaturen und starken Niederschlägen im April und Mai (Abbildung 9). Ab Juni blieben die Temperaturen aber sehr hoch (2023 war in Österreich und weltweit das wärmste Jahr seit Aufzeichnungsbeginn), was sich in niedrigen Matrixpotentialwerten und einer negativen KWB widerspiegelte (Abbildung 11). Zwischen Mitte Juni und Anfang August kam es daher zu einer Trockenperiode. Durch die anhaltend hohen Temperaturen traten aber auch im Spätsommer und Herbst Trockenperioden auf, die durch Regenereignisse jeweils nur kurzfristig abgemildert wurden.

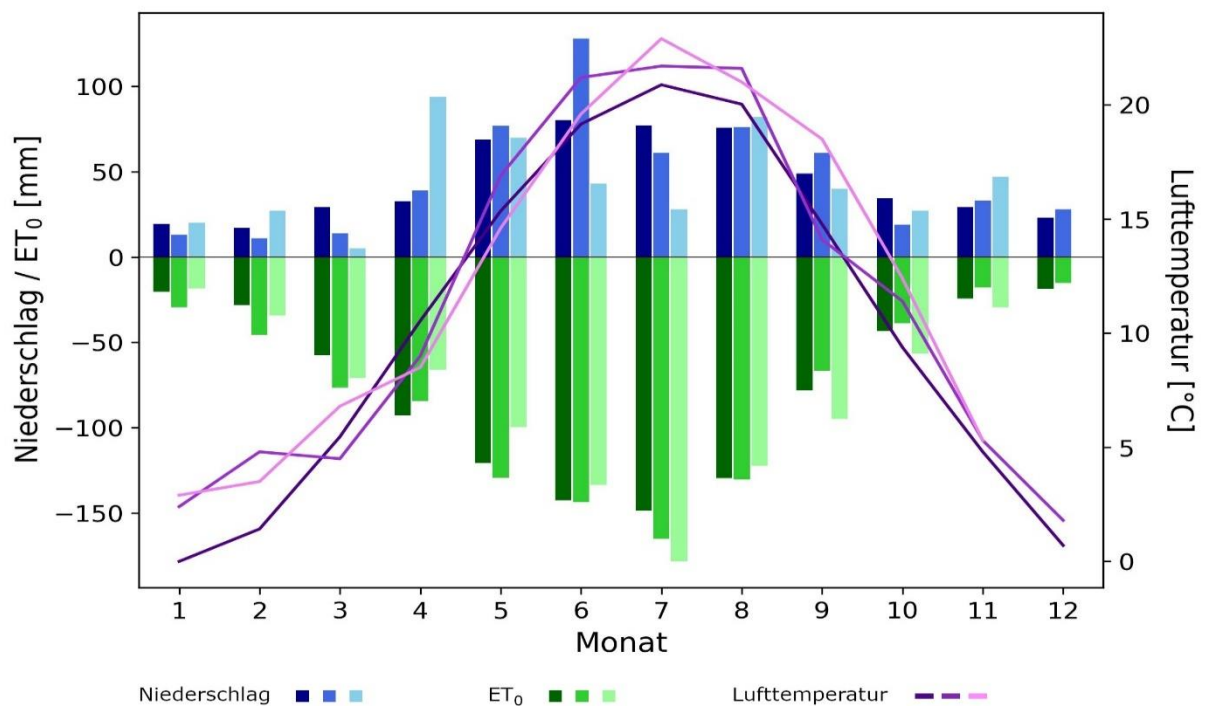


Abbildung 9: Vergleich meteorologische Daten Loibenberg. Dunkle Farben entsprechen dem langjährigen Mittel (1990-2020), mittlere Farben dem Messjahr 2022, helle Farben dem Messjahr 2023.

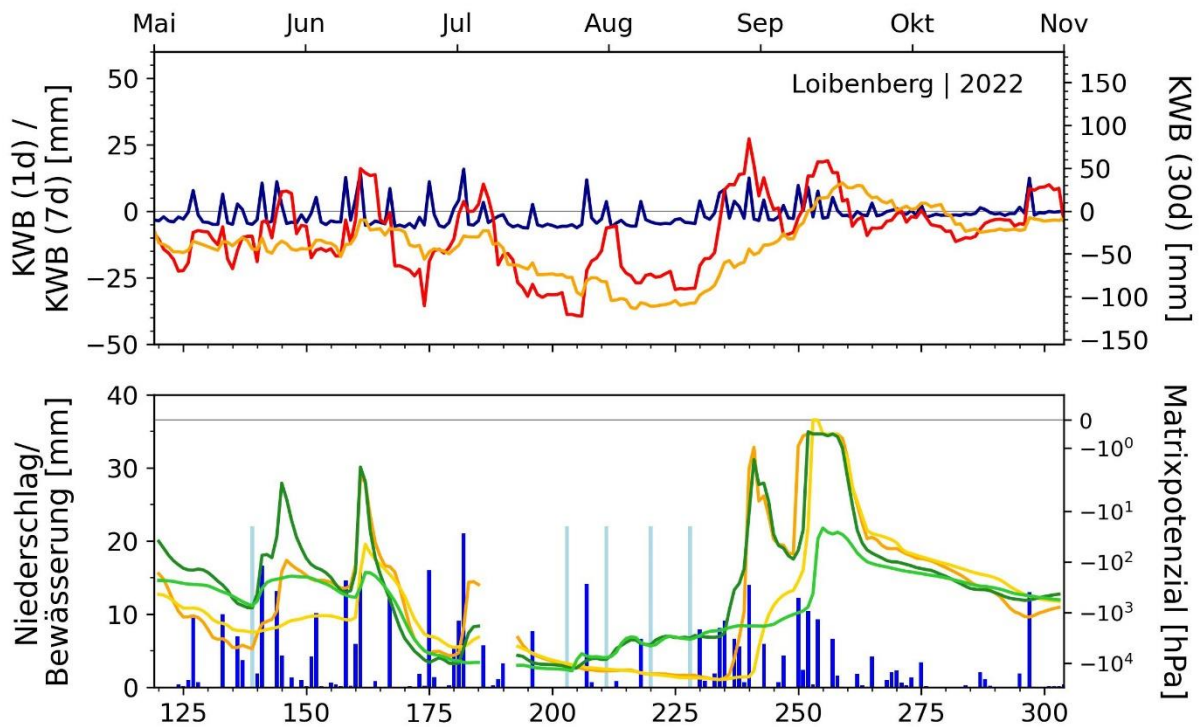


Abbildung 10: Klimatische Wasserbilanz (KWB; oben), Niederschlagsmuster und Verlauf des Matrixpotenzials im Boden (unten). Zur oberen Abbildung: Die dunkelblaue Linie gibt den Verlauf der KWB für den jeweiligen Tag an (1d), die rote Linie den Verlauf der KWB berechnet über ein gleitendes Mittel der letzten sieben Tage (7d), die orange Linie mit einem gleitendem Mittel über die letzten 30 Tage (30d). Zur unteren Abbildung: Blaue Balken geben die Niederschlagssumme pro Tag an, hellblaue Linien sind künstliche Wassergaben (Bewässerung). Die grünen (bewässert) und gelben Linien (unbewässert) geben das Matrixpotenzial in 15 cm (dunklere Farben) und 30 cm Tiefe (hellere Farben) an – beim Matrixpotenzial stehen stark negative Werte für Trockenheit, das heißt in der Grafik: unten ist trocken, oben ist feucht.

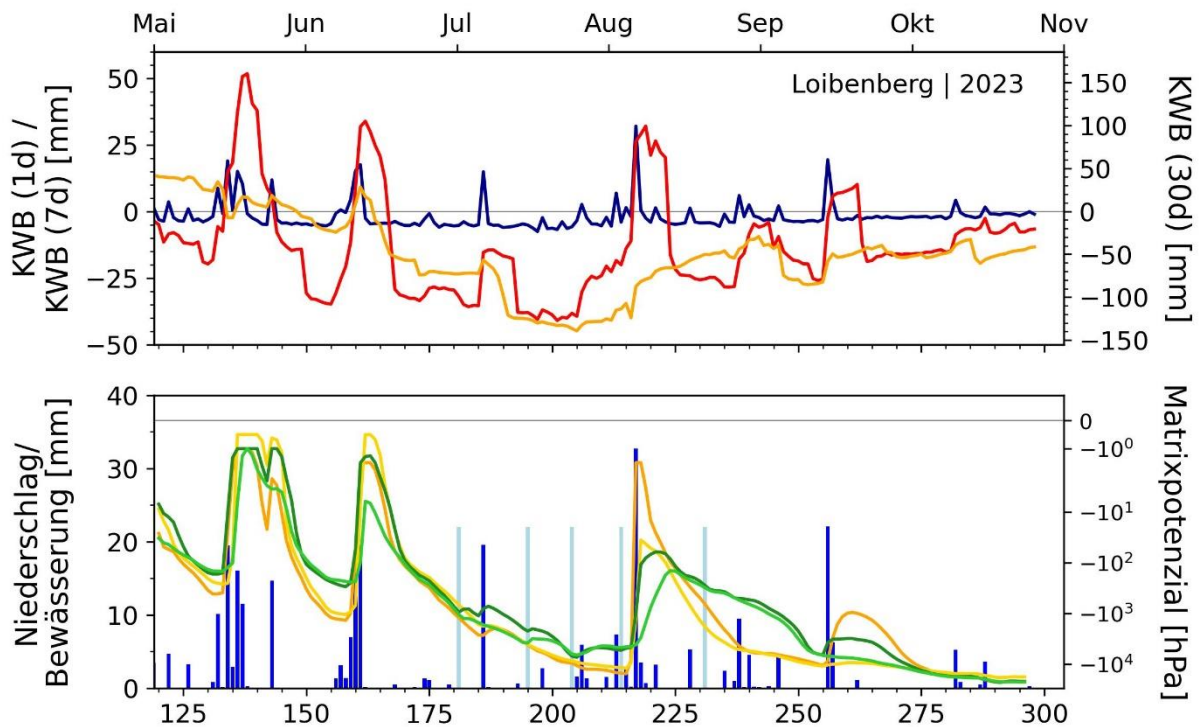


Abbildung 11: Klimatische Wasserbilanz (KWB; oben), Niederschlagsmuster und Verlauf des Matrixpotenzials. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 10.

4.3 Ergebnisse der Messungen an den Versuchsstandorten

4.3.1 Frühmorgendliches Blattwasserpotenzial – Scholanderbombe

Die Wein- und Obstbauschule Krems erhebt bereits seit Jahrzehnten das frühmorgendliche Blattwasserpotenzial (BWP) am Loibenberg. Dabei wird während der Hauptvegetationsperiode (Juni-August) einmal pro Woche mit der Scholanderbombe das Wasserpotenzial an ausgereiften Weinblättern erhoben. Diese Werte werden unter anderem für die Bewässerungssteuerung herangezogen.

Es ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den bewässerten und unbewässerten Weinreben (Abbildung 12). Während durch die Bewässerung an beiden Standorten und Messjahren das BWP unter oder knapp über dem Schwellenwert von 3 bar gehalten werden konnte, so wurde dieser bei den unbewässerten Reben oftmals klar überschritten. Das ist besonders am Standort Loibenberg im Messjahr 2022 zu sehen, mit sehr hohen BWP-Messungen während der Trockenperiode Mitte August (Abbildung 12).

Der Einfluss des Standortes, bzw. des Bodens zeigt sich besonders im Jahr 2022. Trotz annähernd gleicher Niederschlagsmengen, wurde der Schwellenwert am Standort Loibenberg öfter und deutlicher überschritten als am Standort Loiben Tal, was mit den tiefgründigeren Böden und der besseren Wasserverfügbarkeit zusammenhängt. 2023 war dieser Einfluss allerdings weit weniger prägnant. Grund hierfür ist vermutlich die generell bessere Wasserversorgung zu Beginn der Saison, aufgrund der überdurchschnittlich hohen Niederschläge in der ersten Jahreshälfte (Abbildung 9).

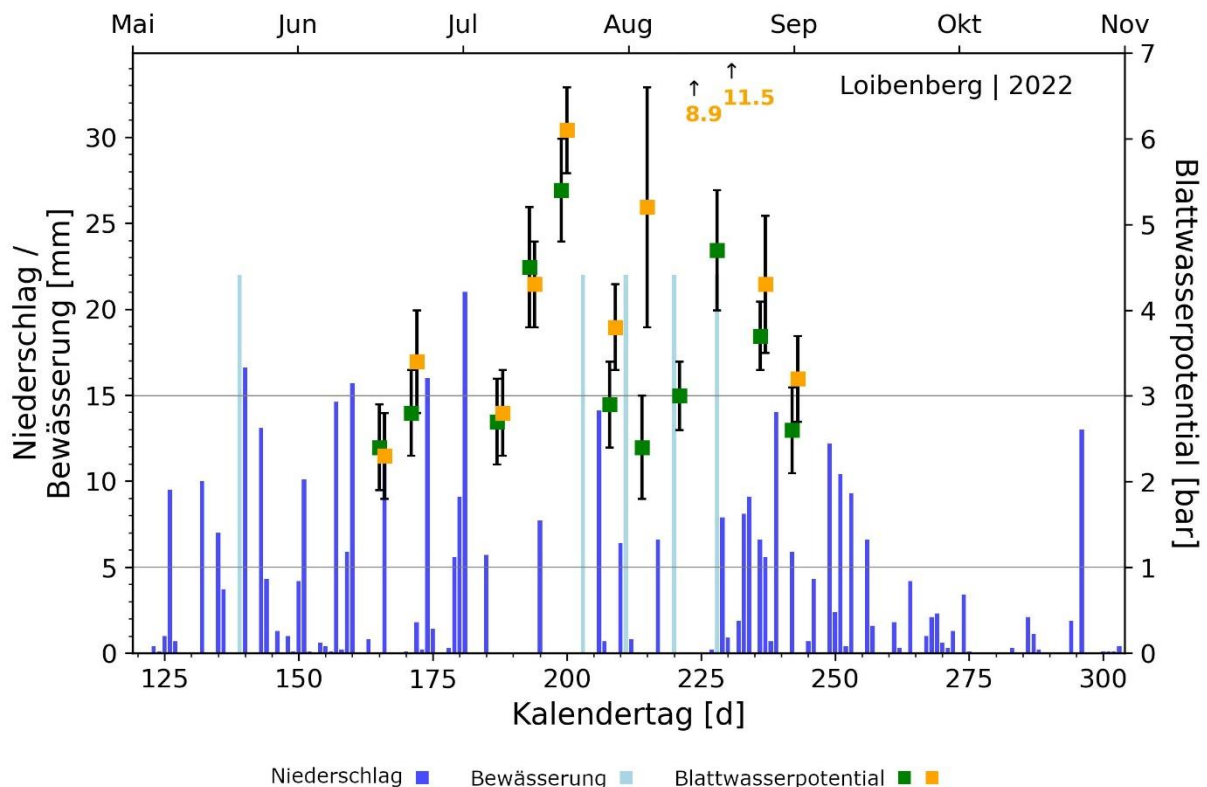


Abbildung 12: Frühmorgendliches Blattwasserpotenzial (BWP). Grün – bewässerte Weinreben; orange – unbewässerte Weinreben. Die grauen horizontalen Linien geben den optimalen Bereich an; liegt das BWP über dem Schwellenwert ist eine Bewässerung indiziert.

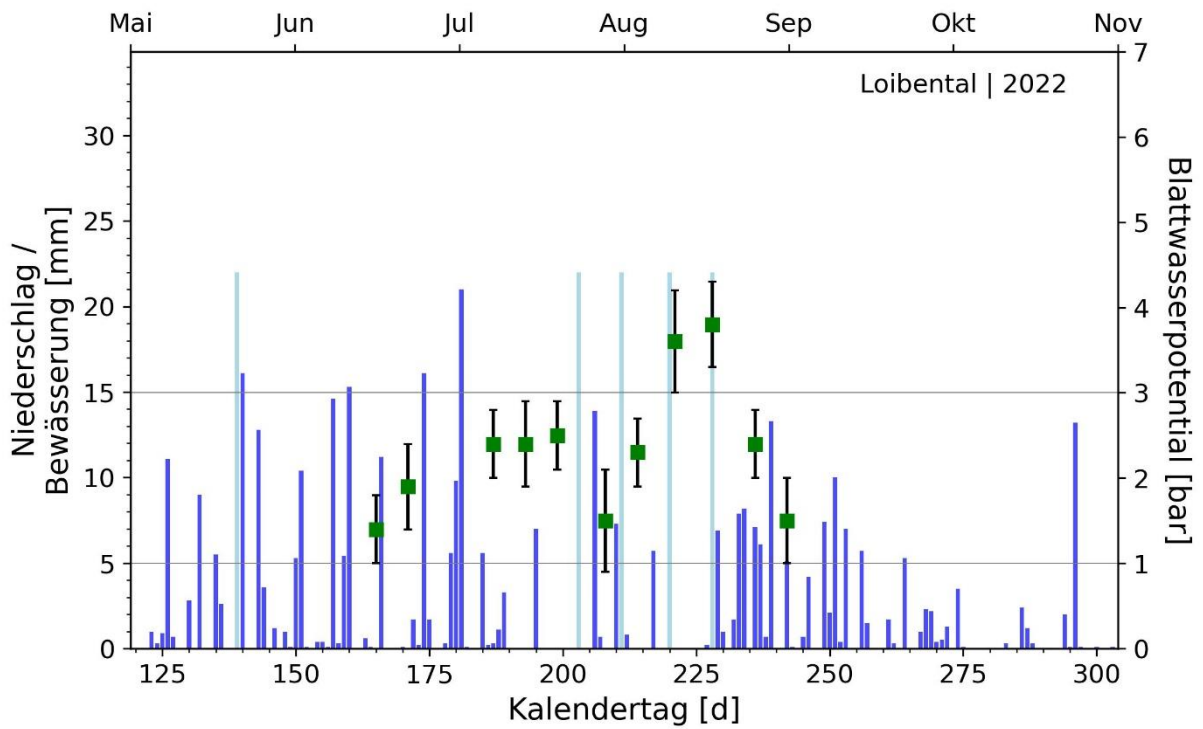


Abbildung 13: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.

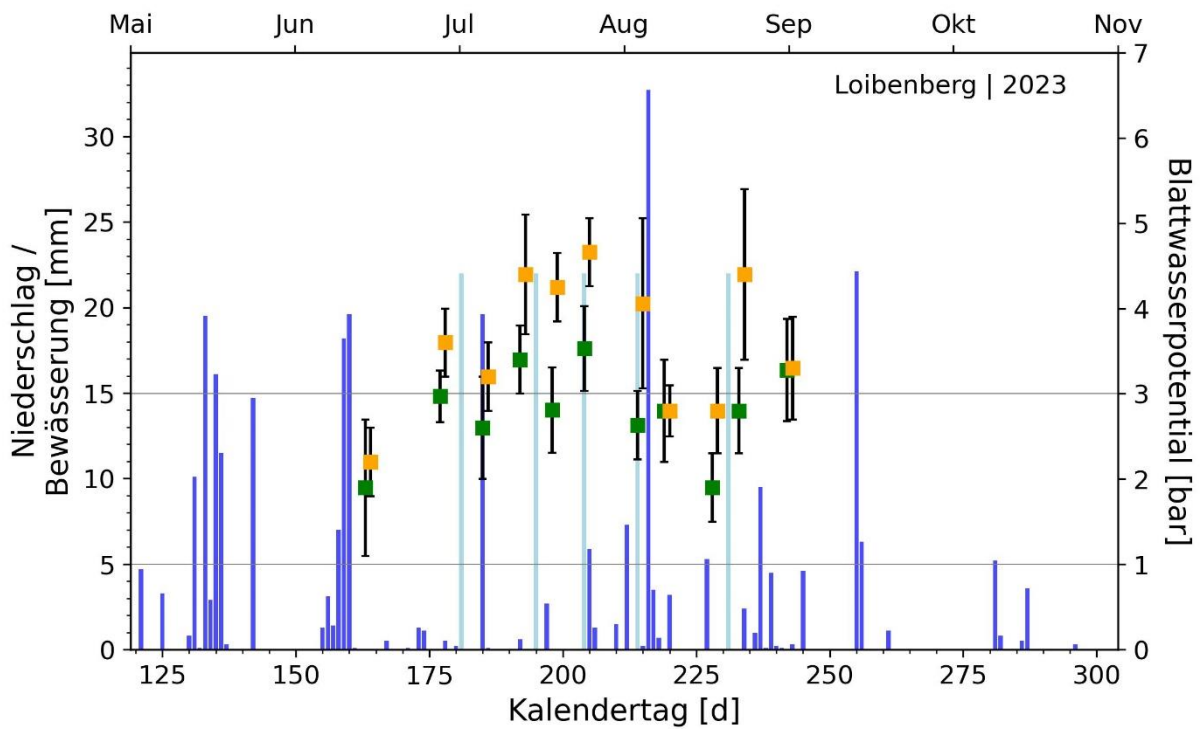


Abbildung 14: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.

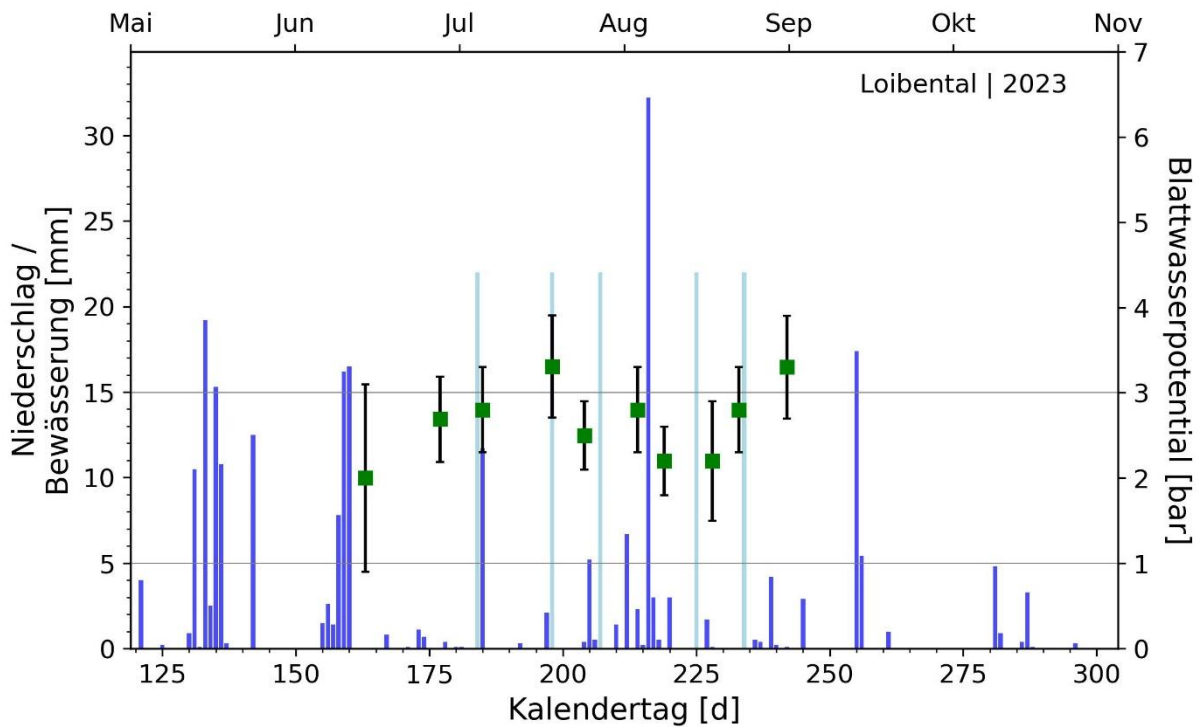


Abbildung 15: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.

4.3.2 Boden (Matrixpotential)

Wie bereits bei der meteorologischen Einordnung erwähnt, kam es im Messjahr 2022 zu einer länger anhaltenden trockenen Periode die am Standort Loibenberg von etwa Mitte Juni bis Mitte August dauerte (Abbildung 16), am Standort Loiben Tal von Ende Juni bis Ende Juli (Abbildung 17). Die damit einhergehenden niedrigen Matrixpotentiale wurden auch durch stärkere Regenereignisse gegen Ende Juni nur leicht und kurzfristig gehoben. Die niedrigen Werte während des Sommers sind zum einen natürlich den hohen Temperaturen und ausbleibenden Niederschlägen geschuldet, andererseits aber auch durch den Wasserbedarf der Pflanzen bedingt, der während dem Laubaustrieb im Frühling stetig ansteigt, in der Phase der vollen Belaubung und Fruchtentwicklung im Sommer am höchsten ist und im Herbst wieder abnimmt.

Wie zu erwarten waren die Matrixpotentiale am unbewässerten Standort bis auf wenige Ausnahmen deutlich niedriger als am bewässerten Standort. Vergleichbare Potentiale stellten sich nur in niederschlagsreichen Phasen ein (etwa Anfang Juni oder Ende August/Anfang September). Am Standort Loibenberg ist auch deutlich erkennbar, dass tiefere Schichten erst durch länger anhaltende feuchte Perioden erreicht werden. So ist von den beiden Spitzen die sich im oberflächennahen (15 cm Tiefe) Matrixpotential im Frühling und Spätsommer zeigen, stets nur die zweite Spitze auch in tieferen Schichten (30 cm) abgebildet. Das bedeutet, dass bei unzureichenden Niederschlägen das meiste Wasser bereits in den ersten Zentimetern gespeichert, bzw. rasch verbraucht wird. Am Standort Loiben Tal ist das nicht zu beobachten, hier ist das Matrixpotential in 30 cm Tiefe nur leicht abgeschwächt, bzw. im Sommer interessanterweise sogar teilweise höher als in 15 cm Tiefe (Abbildung 17). Ebenso ist die Länge und Intensität der Trockenperiode am Standort Loiben Tal vermindert. Das lässt sich durch die tiefgründigeren Böden, bzw. allgemein bessere Wasserspeicherung und -verfügbarkeit erklären.

Dadurch hatten auch die Bewässerungen einen stärkeren Effekt als am Standort Loibenberg, wo diese die Matrixpotentiale nur leicht erhöhen konnten.

Im Messjahr 2023 zeigte sich am Standort Loibenberg ebenfalls eine längere Trockenperiode, die von etwa Ende Juni bis Anfang August andauerte (Abbildung 18). Auch hier hatte die Bewässerung nur einen relativ geringen Effekt, während am Standort Loiben Tal das Matrixpotential, v.a. in Oberflächennähe, fast durchgehend auf einem moderaten Niveau gehalten werden konnte (Abbildung 19). Durch die unterdurchschnittlichen Regenfälle von Mai bis Oktober, die nur von einem einzelnen Starkregenereignis im August unterbrochen wurde (Abbildung 9), kam es aber auch im Verlauf des Herbstes zu einer weiteren Trockenperiode die sich an beiden Standorten zeigte. Auffällig ist, dass sich der bewässerte und der unbewässerte Abschnitt, sowie auch die Tiefenstufen weniger unterschieden als im Messjahr 2022. Das ist vermutlich einer besseren Wasserversorgung während des Frühjahrs mit überdurchschnittlichen Regenmengen, vor allem im April, geschuldet (Abbildung 9).

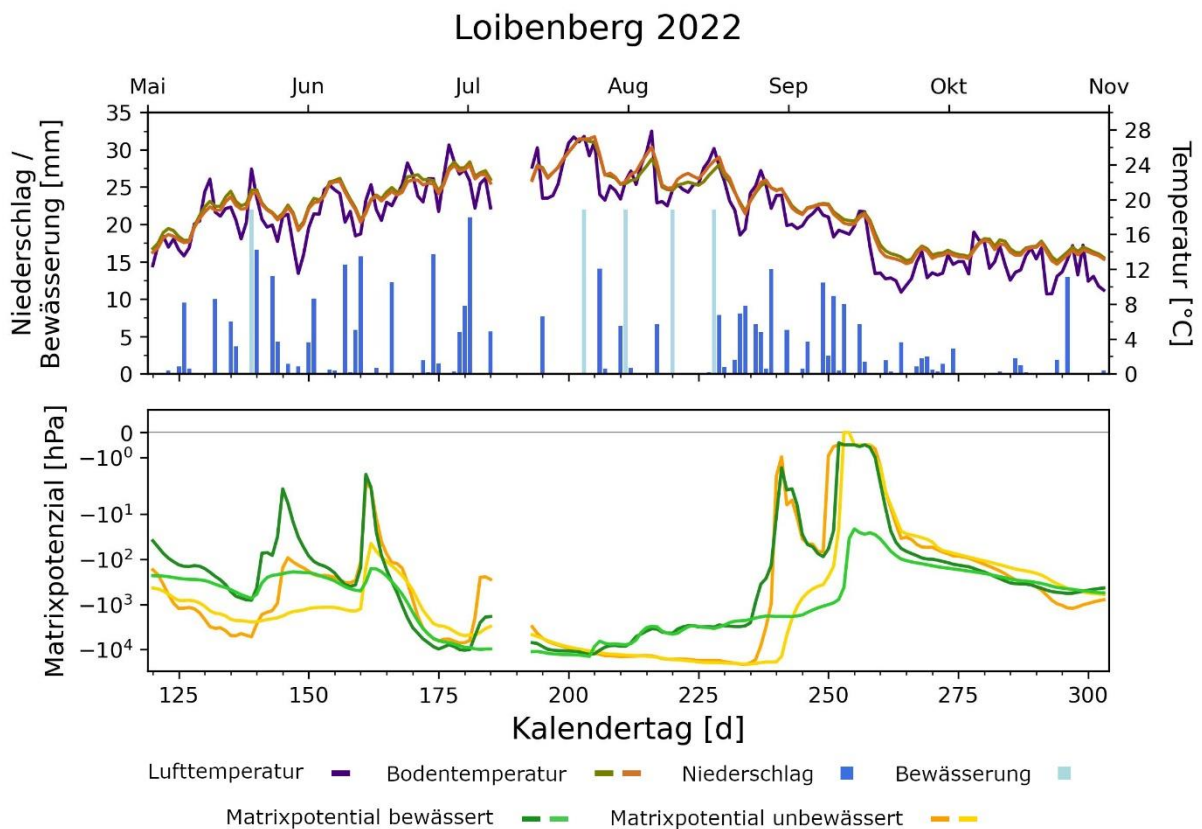


Abbildung 16: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Die dunkleren Farben bei den Matrixpotential-Verläufen entsprechen jeweils einer Messtiefe von 15 cm, die helleren Farben entsprechen 30 cm.

Loibental 2022

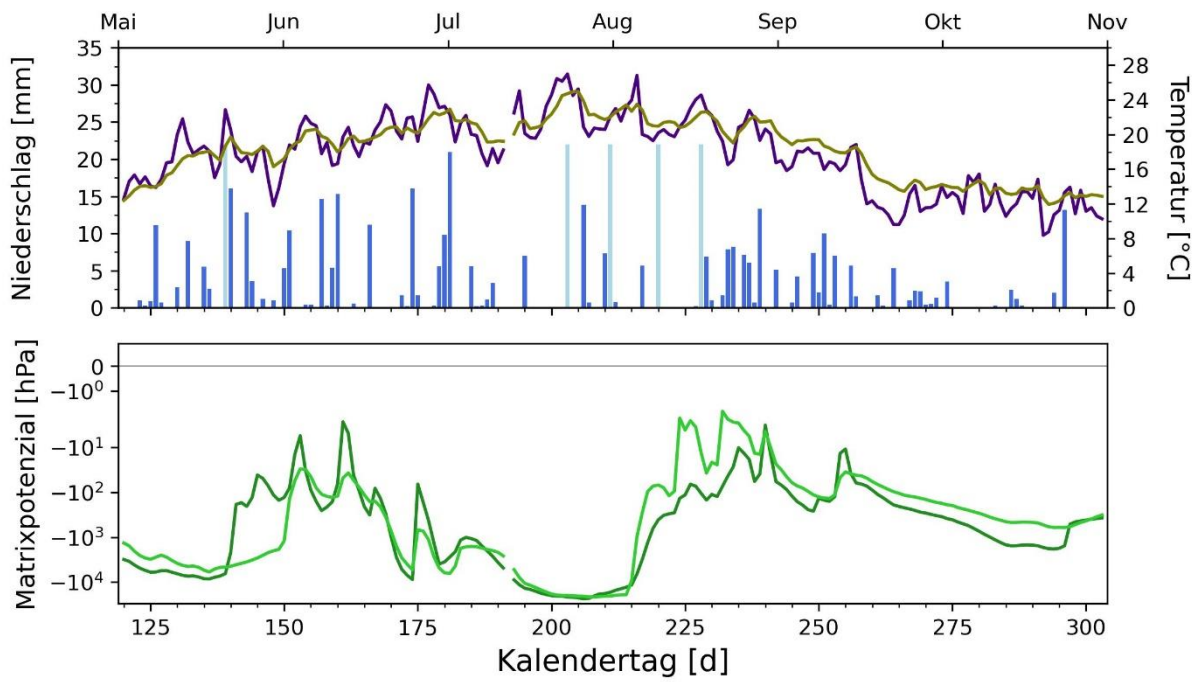


Abbildung 17: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.

Loibenberg 2023

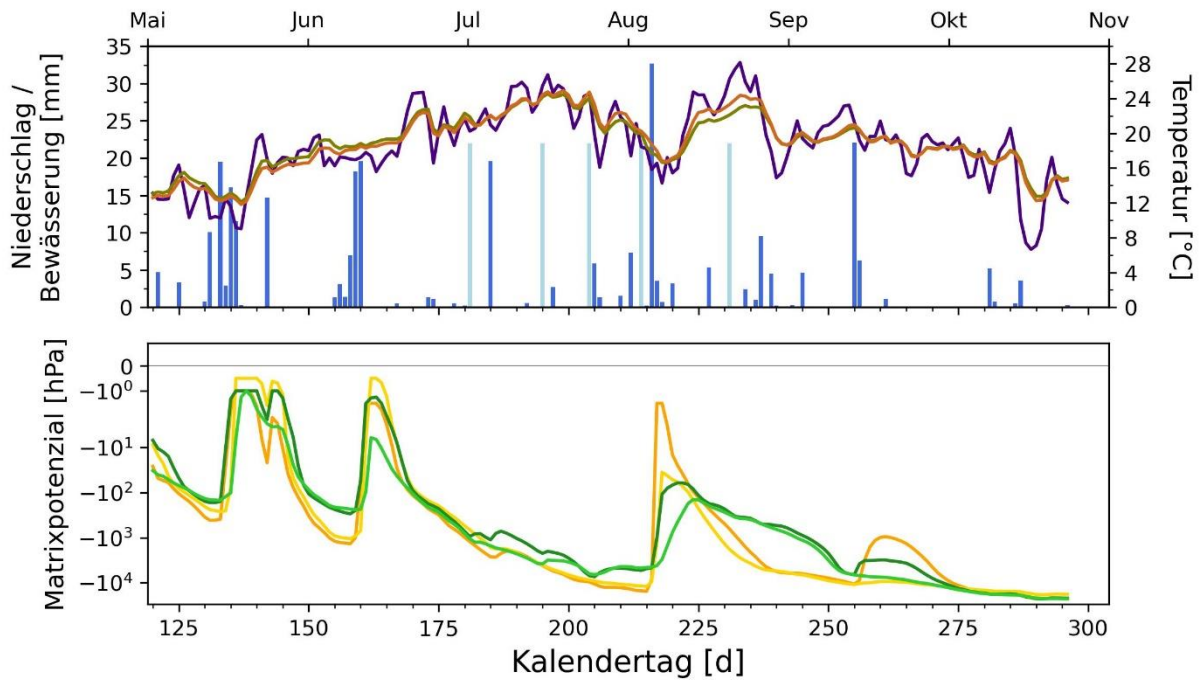


Abbildung 18: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.

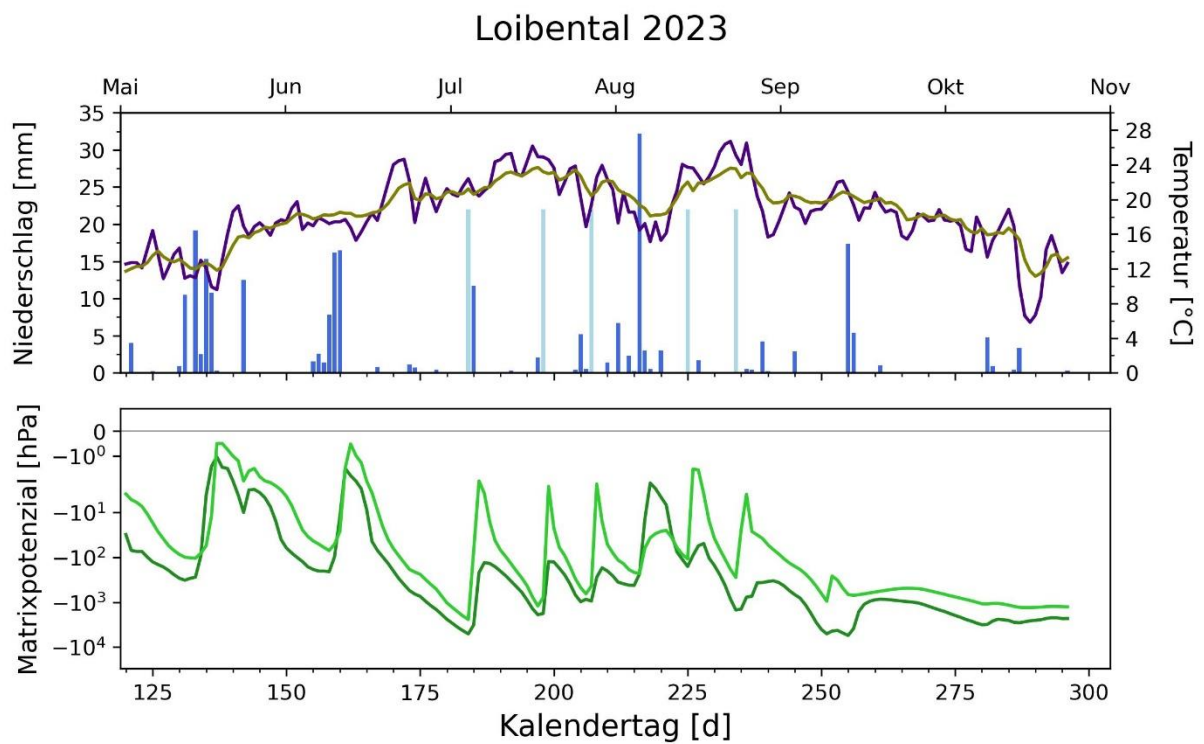


Abbildung 19: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.

4.3.3 Saftflussmessungen

Der Saftfluss in den Weinreben zeigte in beiden Messjahren einen ähnlichen Verlauf wie die Evapotranspiration und stieg nach Regenfällen, bzw. Bewässerungen merkbar an (Abbildung 20-Abbildung 23). Am Standort Loiben Tal kommt es allerdings zu einer deutlich ausgeprägteren Saisonalität als am Standort Loibenberg, wo die Saftstrommessungen während der gesamten Vegetationsperiode relativ hoch blieben.

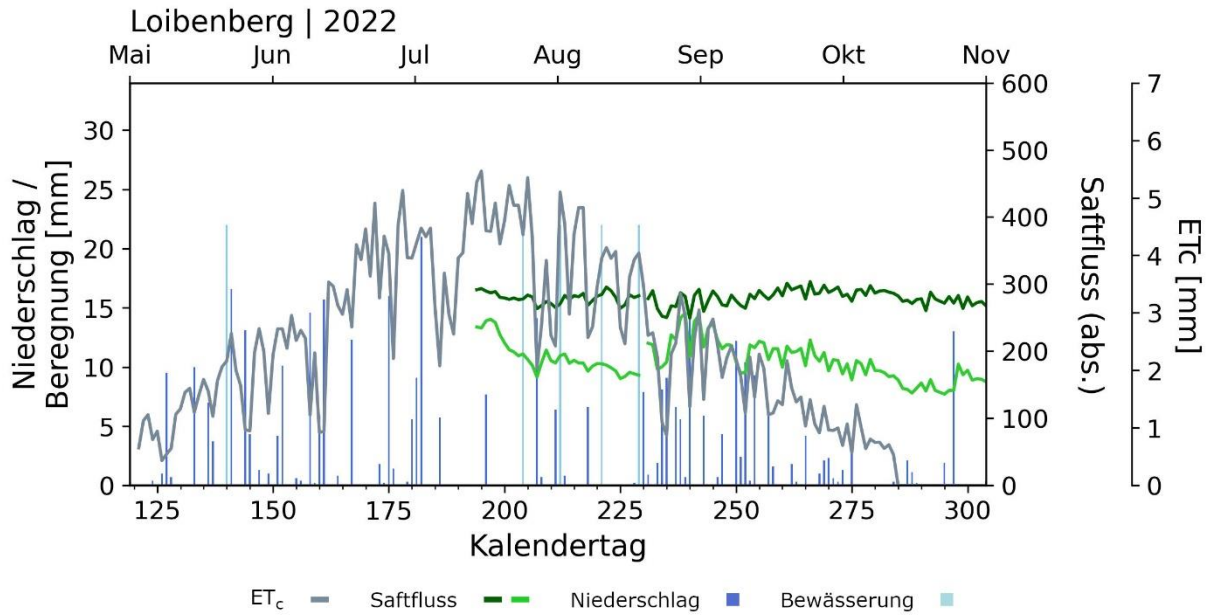


Abbildung 20: Evapotranspiration und Saftfluss. Die dunkle Linie bei den Saftstrom-Verläufen entspricht dem Mittelwert der bewässerten Reben, die helle Farbe den unbewässerten Reben.

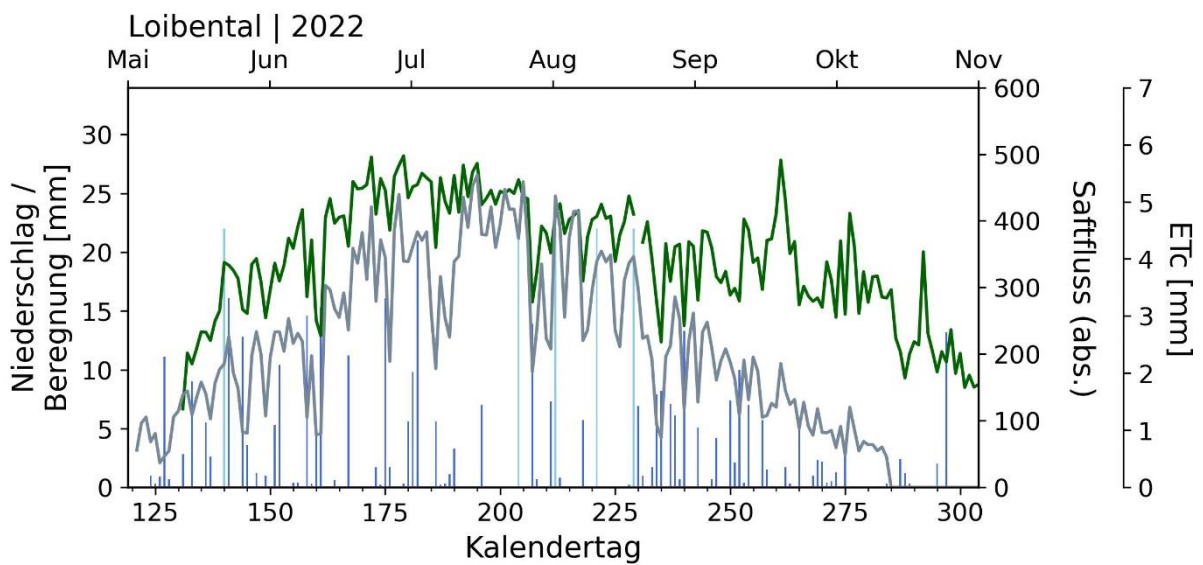


Abbildung 21: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.

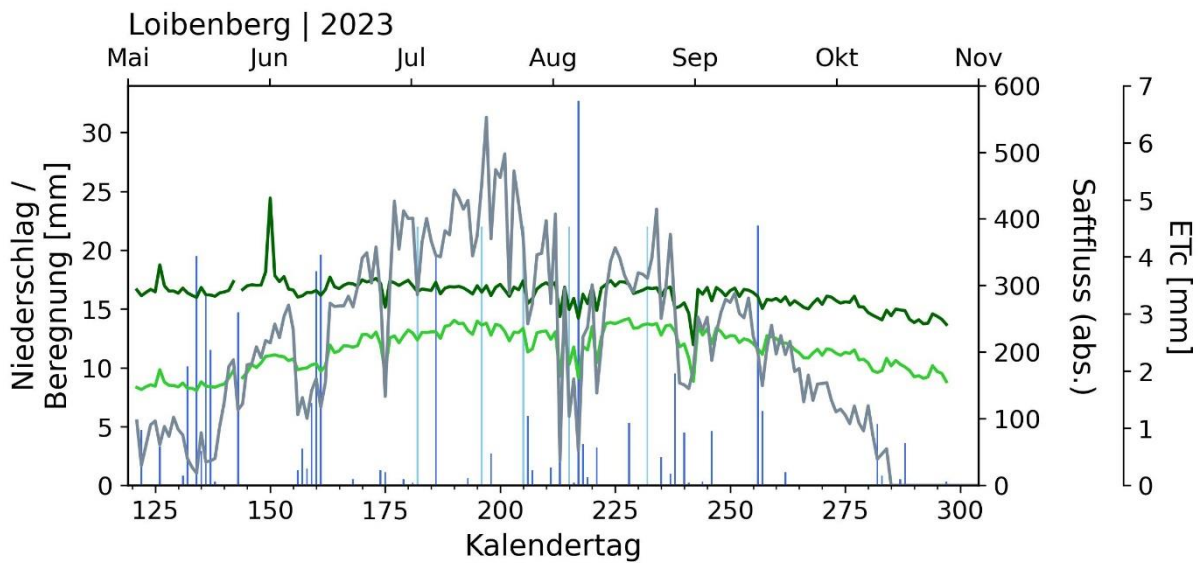


Abbildung 22: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.

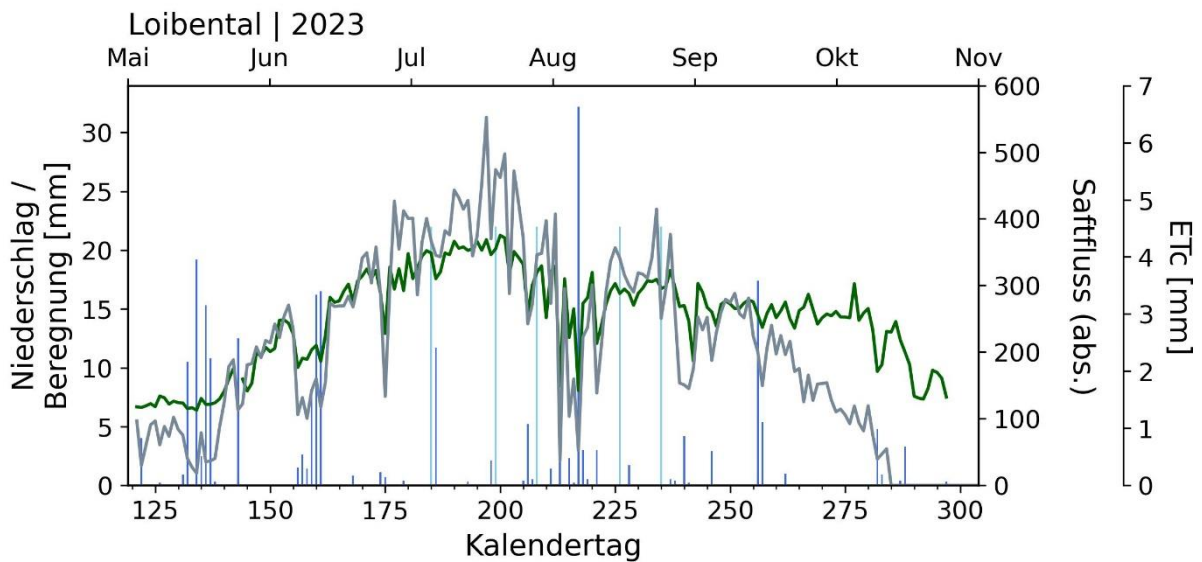


Abbildung 23: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.

4.3.4 Dendrometer

Die Dendrometermessungen zeigten, v.a. nach größeren Niederschlags- oder Bewässerungsmengen, eine ausgeprägte Reaktion in der täglichen Veränderung des Stammumfanges (MDS, Maximum Daily Shrinkage; Abbildung 24/Abbildung 27). Diese Methode reagiert somit zwar sensitiv auf kurzfristige Änderungen in der Wasserverfügbarkeit, bildet die längerfristige Wasserversorgungssituation, bzw. eventuellen Wasserstress aber nur unzureichend ab. MDS-Werte als Grundlage zur Bewässerungssteuerung sind daher wenig geeignet. Ebenfalls ungeeignet ist die Messung des absoluten oder relativen Stamm-zuwachses. Diese schwanken sehr stark zwischen den Jahren und Standorten und zeigen weiters eine relativ geringe Reaktion auf Regenereignisse, bzw. Feucht- und Trockenperioden.

Eine Erklärung für diese geringe Aussagekraft ist, dass die verzeichneten Stammzuwächse sehr gering sind. Am Standort Loiben Tal lagen sie im unteren einstelligen Prozentbereich, am Standort Loibenberg konnte in beiden Messjahren insgesamt gar kein Zuwachs verzeichnet werden, teilweise kam es sogar zu temporären Abnahme im Stammdurchmesser. Diese Methode ist vermutlich besser für Bäume und andere Pflanzen mit ausgeprägt(er)em Dickenwachstum geeignet. Durch die geringen jährlichen Zuwachsraten kann bei Weinreben ein möglicherweise vorhandenes Signal für Trockenstress von stochastischen Effekten überlagert werden, bzw. liegt dieses unter Umständen auch am Rand oder unter der Messgenauigkeit der Dendrometer.

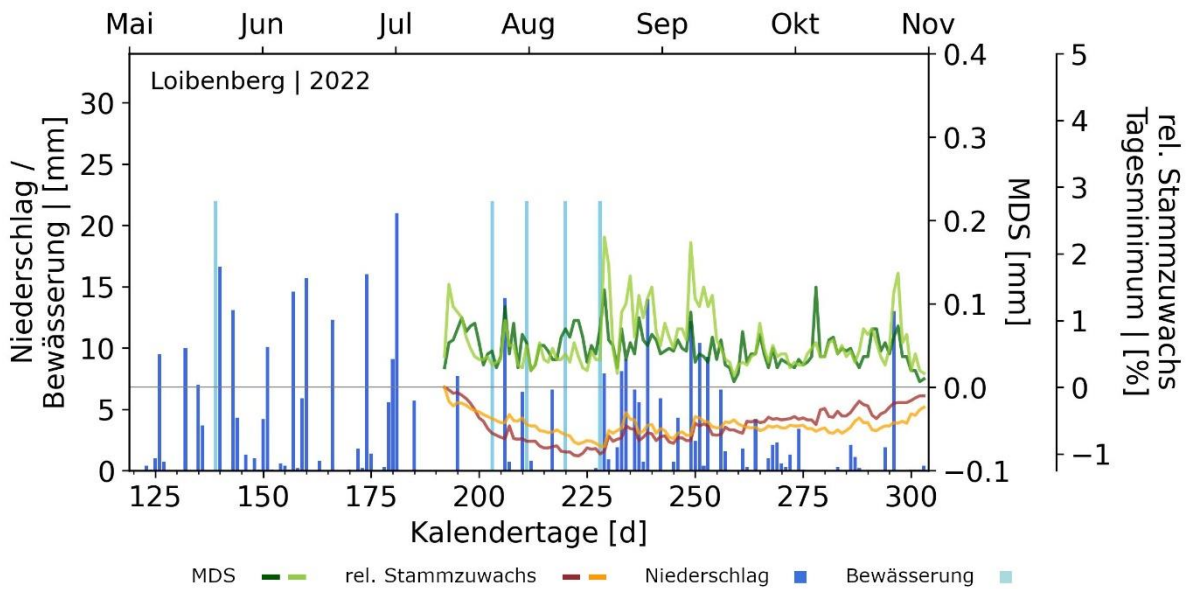


Abbildung 24: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Stammzuwachs standardisiert auf Messbeginn. MDS – Maximum Daily Shrinkage. Hellere Farben (hellgrün, orange) entsprechen unbewässerten Weinreben, dunklere Farben (dunkelgrün, rot) bewässerten Weinreben (Mittelwert aus den 3 probierten Reben).

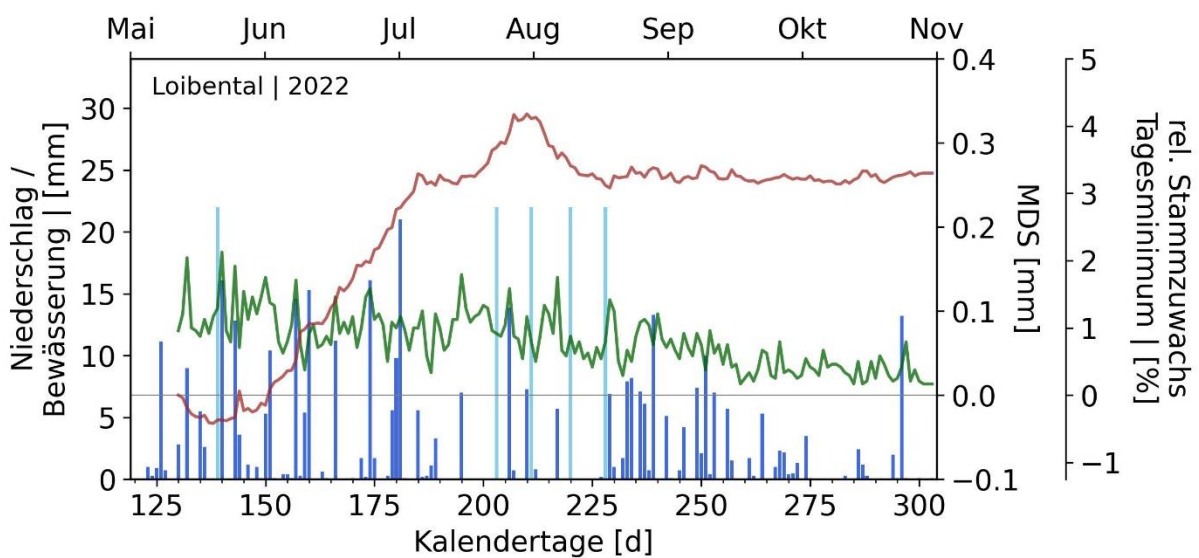


Abbildung 25: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.

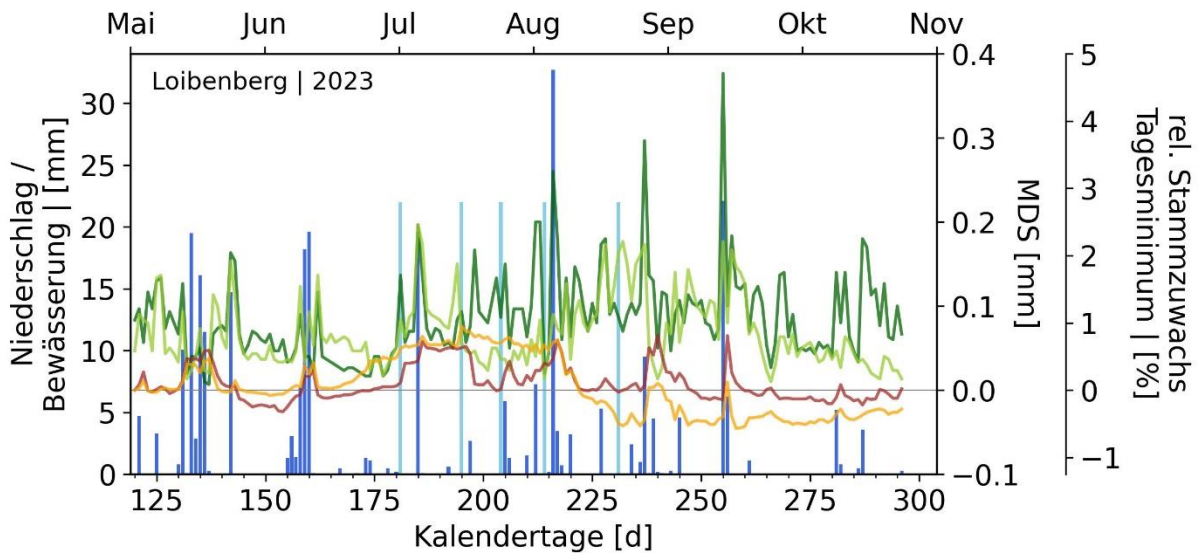


Abbildung 26: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.

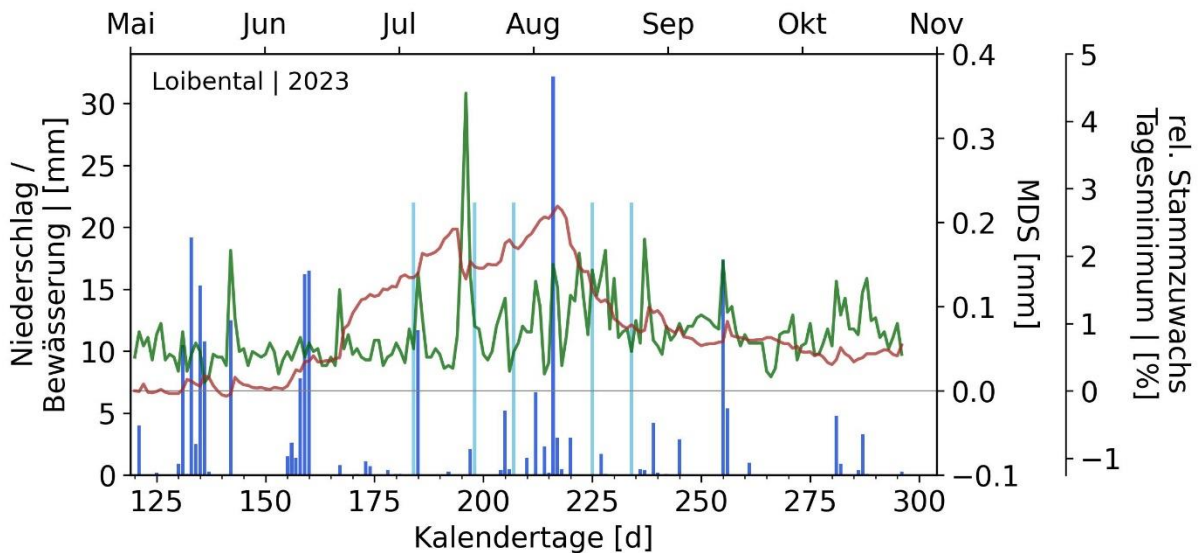


Abbildung 27: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.

4.3.5 Blattwand-Oberflächentemperatur

Ein wesentlicher Effekt des Wasserflusses durch die Pflanze ist die Kühlung des meist dunkelfarbigem Gewebes bei Sonneneinstrahlung durch den physikalischen Effekt der Verdunstungskälte. Steht zu wenig Wasser zur Verfügung, muss die Pflanze ihre Stomata schließen, der Wasserfluss wird verringert, die Kühlleistung nimmt ab, und die Oberfläche erwärmt sich. Dieses Phänomen wird genutzt, um über Messungen der Oberflächentemperatur den Wasserversorgungsstatus von Kulturpflanzen abzuschätzen (Prueger et al., 2018). Theoretisch sollte also die Differenz aus Blattoberflächentemperatur und Lufttemperatur umso kleiner sein, je besser wasserversorgt die Pflanze ist und umso mehr Kühlung durch die Verdunstung von Wasser entsteht. Das zeigt sich auch in den Messungen, allerdings mit Einschränkungen (Abbildung 28/Abbildung 33). Der Verlauf der Temperaturdifferenz zeigt eine Saisonalität mit höheren Differenzen zu Beginn und Ende der Vegetationsperiode. Dies hängt mit

dem Wachstum und der Physiologie der Pflanzen zusammen, mit jeweils reduzierter Verdunstungsleistung während des Blattaustriebs und -wachstums, sowie der herbstlichen Seneszenz der Blätter. Belastbare Daten zur Beurteilung von Trockenstress sind daher hauptsächlich in den Sommermonaten zu erwarten. Zusätzlich ist die Höhe der Differenz naturgemäß auch abhängig von der Sonnenstrahlung und damit geringer bei Bewölkung, unabhängig von der Wasserversorgung.

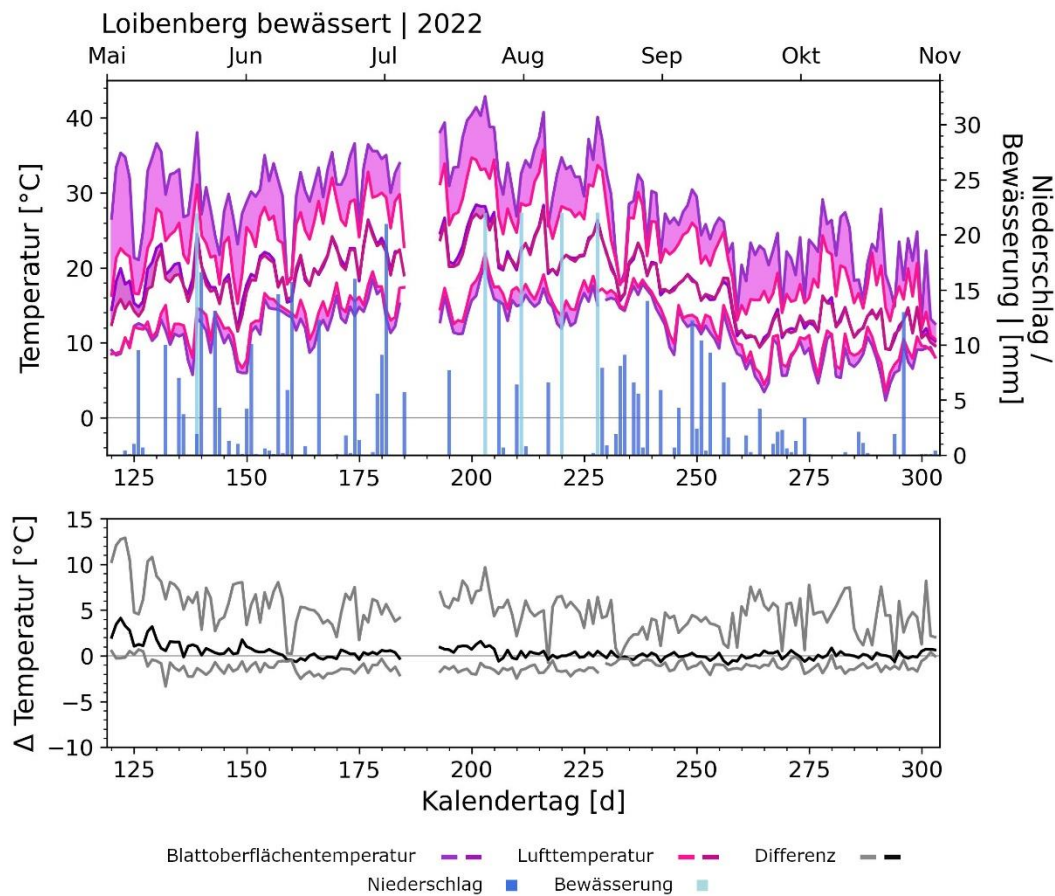


Abbildung 28: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Die rosa Fläche gibt die Differenz zwischen Blattoberflächen- und Lufttemperatur an. Der Verlauf dieser Differenz der Blattoberflächen- und Lufttemperatur ist für die Tagesmaxima, -mittelwerte und -minima zusätzlich detailliert in der unteren Grafik dargestellt.

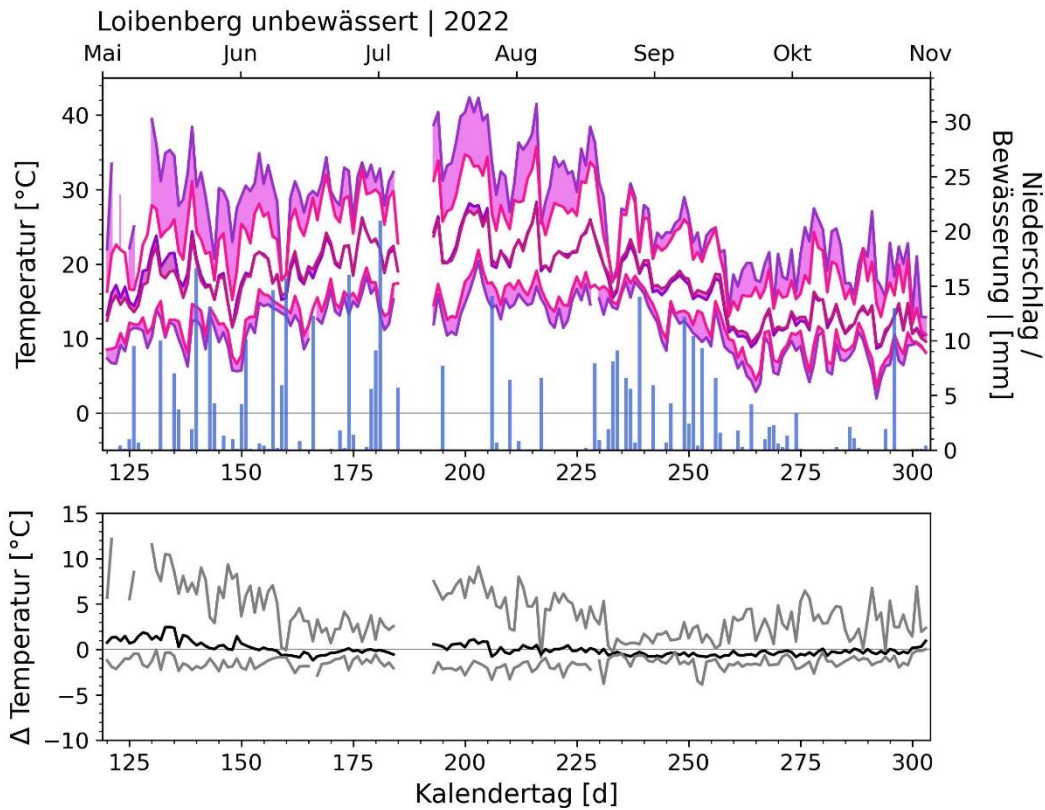


Abbildung 29: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.

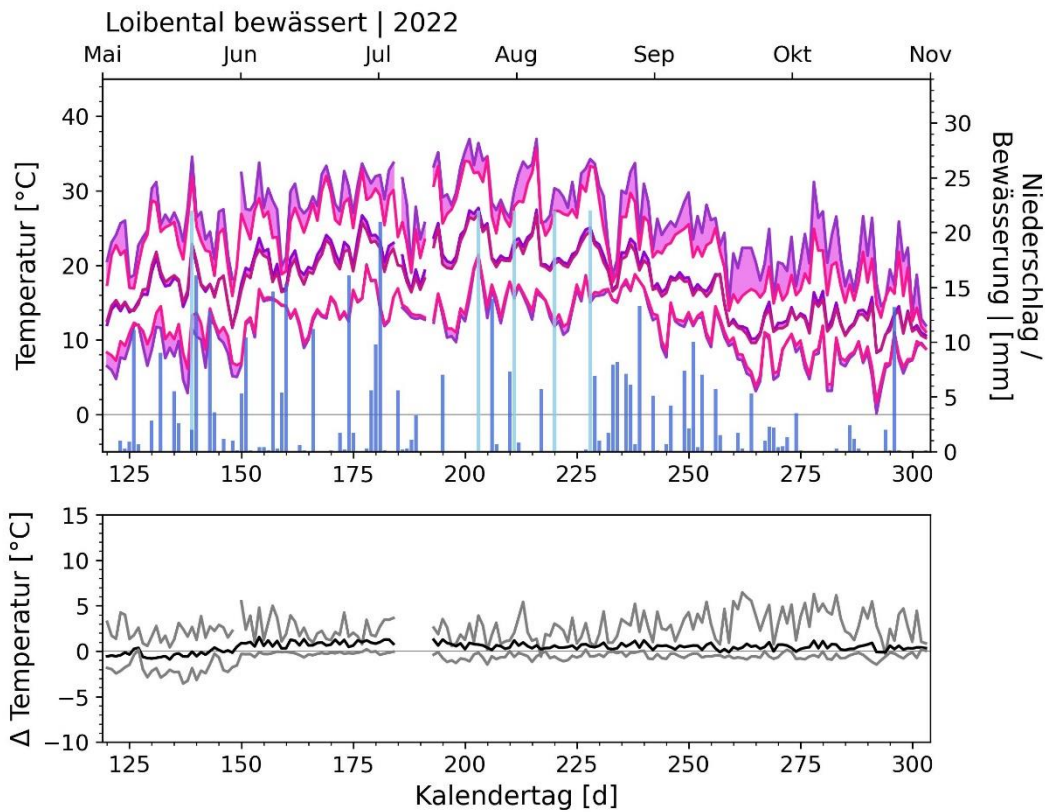


Abbildung 30: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.

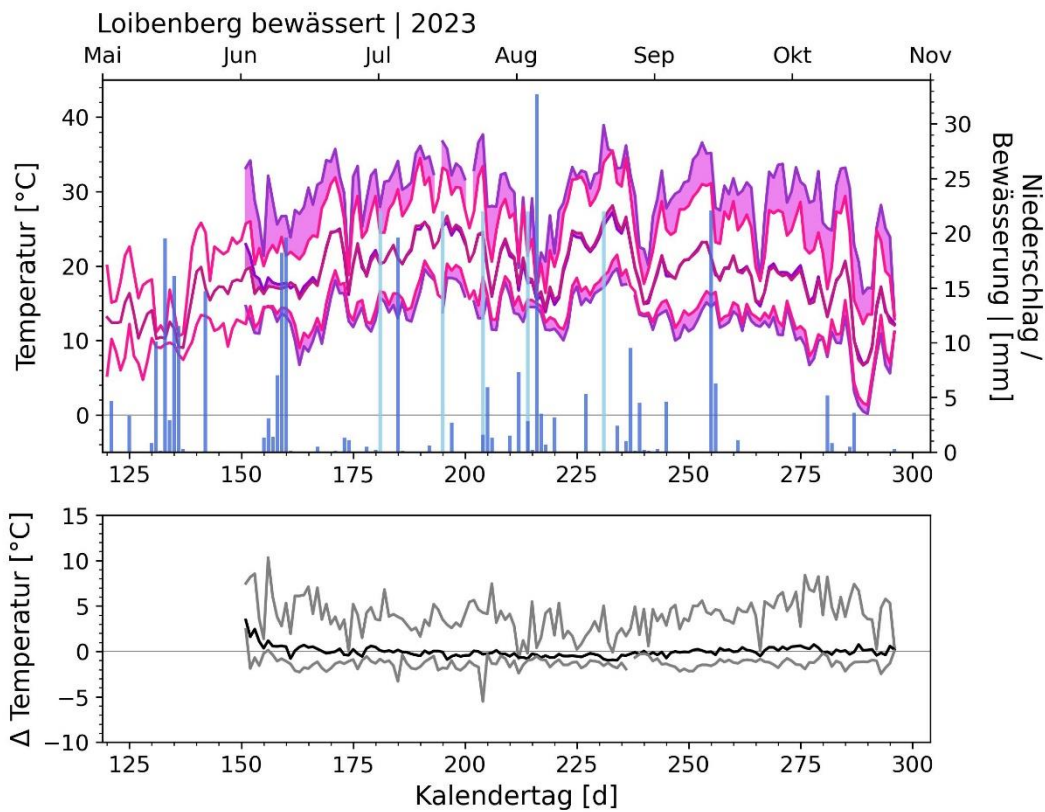


Abbildung 31: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.

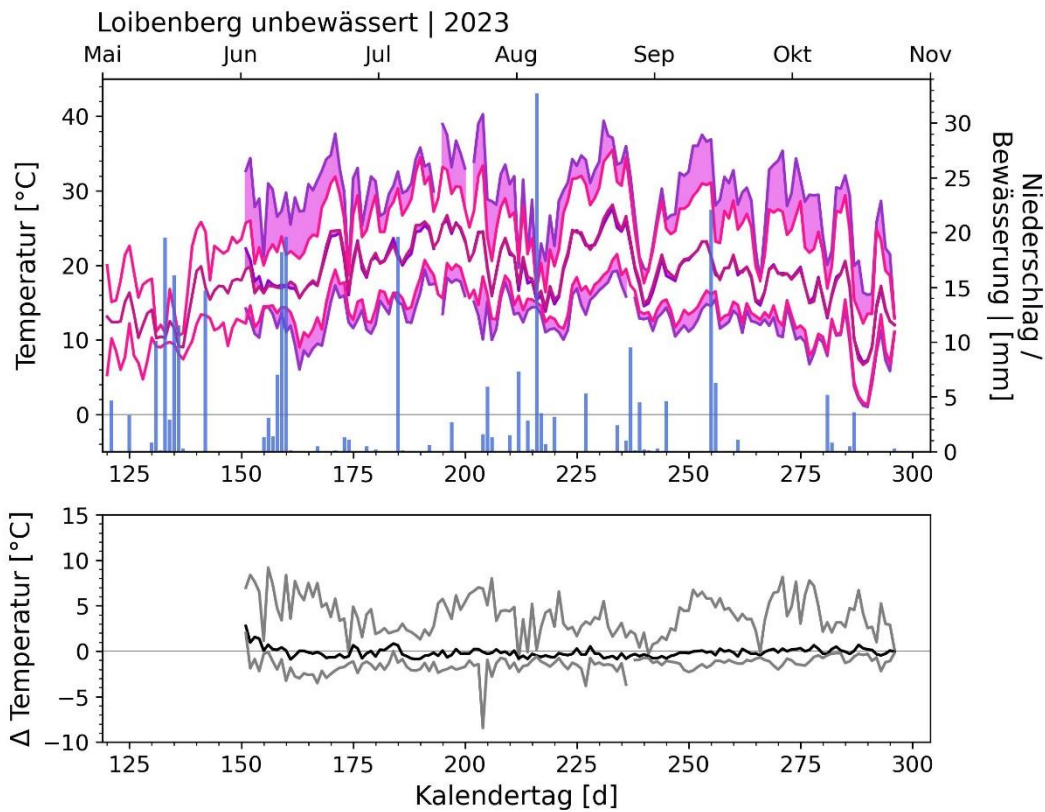


Abbildung 32: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.

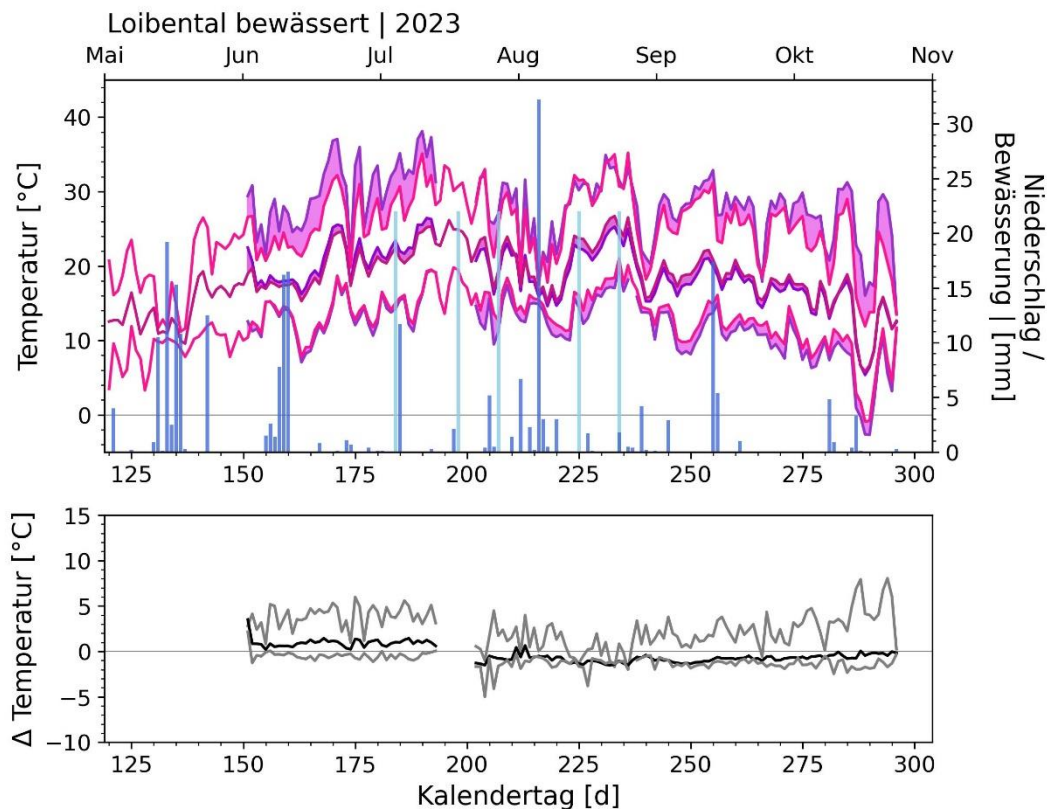


Abbildung 33: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 24.

Berücksichtigt man die oben genannten Einschränkungen, lassen sich aus der Differenz aus Blattoberflächen- und Lufttemperatur durchaus Schlüsse auf die Wasserversorgung der Pflanzen ziehen (Abbildung 34). Bei guter Wasserversorgung kann die Blatttemperatur im Sommer um etliche Grade gesenkt werden und liegt dann nur mehr unwesentlich über der Lufttemperatur. Aufgrund der vielen Einflussfaktoren (z.B. Strahlungsleistung, Temperatur) und relativ schnellen Reaktion (z.B. bei Bewölkung) muss jedoch ein größerer Zeitraum (mind. 7 Tage) für die Auswertung betrachtet werden und bedarf wohl zusätzlich einer Einordnung durch fachkundige Personen. Inwiefern sich diese Methode auch praktisch eignet um Bewässerungsempfehlungen zu geben, muss daher weiter erprobt werden. Vorstellbar wäre etwa die kontinuierliche Aufzeichnung der Differenz der Tagesmaxima von Blattoberflächen- und Lufttemperatur und die Berechnung eines gleitenden Mittelwertes über einen bestimmten Zeitraum (z.B. der letzten 14 Tage), wo bei Überschreiten eines gewissen Schwellenwertes bewässert werden sollte (siehe Abschnitt 5.2).

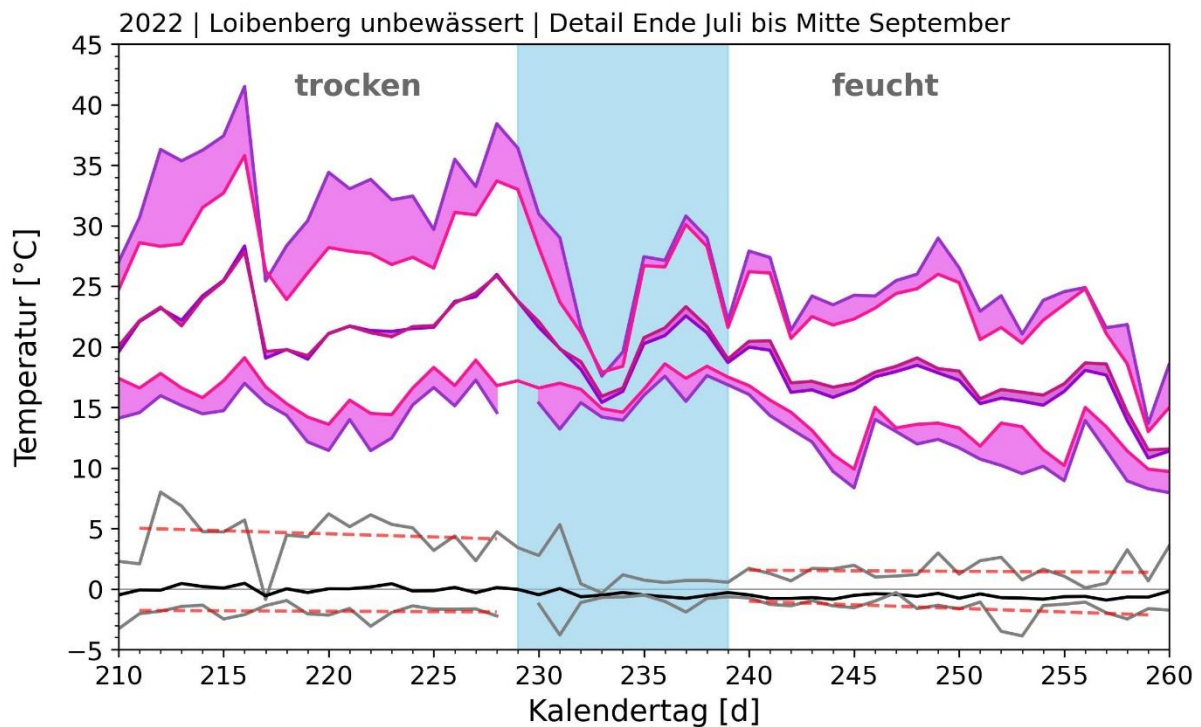


Abbildung 34: Detailausschnitt der Blattoberflächen- und Lufttemperatur (für Details und Symbole siehe Abbildung 28). Die Temperaturdifferenz nimmt nach einer Phase stärkerer Niederschläge (blau hinterlegt), und somit besserer Wasserverfügbarkeit im Boden, deutlich ab. Strichlierte rote Linien sind Regressionsgeraden.

4.3.6 Modellrechnung über einfachen Wasserbilanzansatz

Neben Messungen werden in Fragen der Bewässerungsbemessung oder -steuerung oftmals Simulationsmodelle eingesetzt. Diese sind in verschiedenen Komplexitätsgraden verfügbar und berechnen die Wasserbilanz einer landwirtschaftlichen Kultur in bestimmten Zeitschritten. Hier wurde die tägliche Wasserbilanz der Wurzelzone unter Einbeziehen der gemessenen Wetterdaten, hydrologischen Bodeneigenschaften und groben Kennwerten zur Pflanzenentwicklung berechnet. Dazu wurde ein vorgefertigter Algorithmus aus dem Python-Paket ‚swb‘ verwendet (Details unter <https://pypi.org/project/swb/>; Dokumentation: <https://swb.readthedocs.io/en/latest/>). Als Mittelpunkt der Berechnung dient der aktuelle Bodenwassergehalt, der von Niederschlag erhöht und von Verdunstung, Oberflächenabfluss und Tiefenversickerung vermindert wird. Die Wasseraufnahme der Pflanzen wird von bestimmten Parametern im Modellsetup beeinflusst, die die sogenannten Kalibrierungsgrößen darstellen. Über diese Parameter muss das Modell also anhand von Messwerten an die Realität angepasst werden, bevor die weiteren Ergebnisse für eine belastbare Interpretation herangezogen werden können. Ist dieses Modellsetup für gut befunden, kann also auch mit Daten aus Wetterprognosen gerechnet und somit der Bewässerungsbedarf für die kurzfristige Zukunft ermittelt werden.

Der modellierte Wasseranteil folgt in beiden Jahren gut dem Verlauf der klimatischen Wasserbilanz (KWB), tendierte aber dazu den Wassergehalt im Vergleich mit der KWB zunächst zu überschätzen, im Herbst dann zu unterschätzen (Abbildung 35/Abbildung 36). Auch mit dem Matrixpotential gibt es eine gute generelle Übereinstimmung. Spitzen im Matrixpotential nach größeren Regenfällen werden auch vom Modell abgebildet, jedoch mit Unterschieden in der Intensität und Dauer. Für die Interpretation im Zusammenhang mit der Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers sind hier die hydrologischen

Bodeneigenschaften heranzuziehen, insbesondere die Werte für die Feldkapazität und des permanenten Welkepunktes (Abschnitt 3.1).

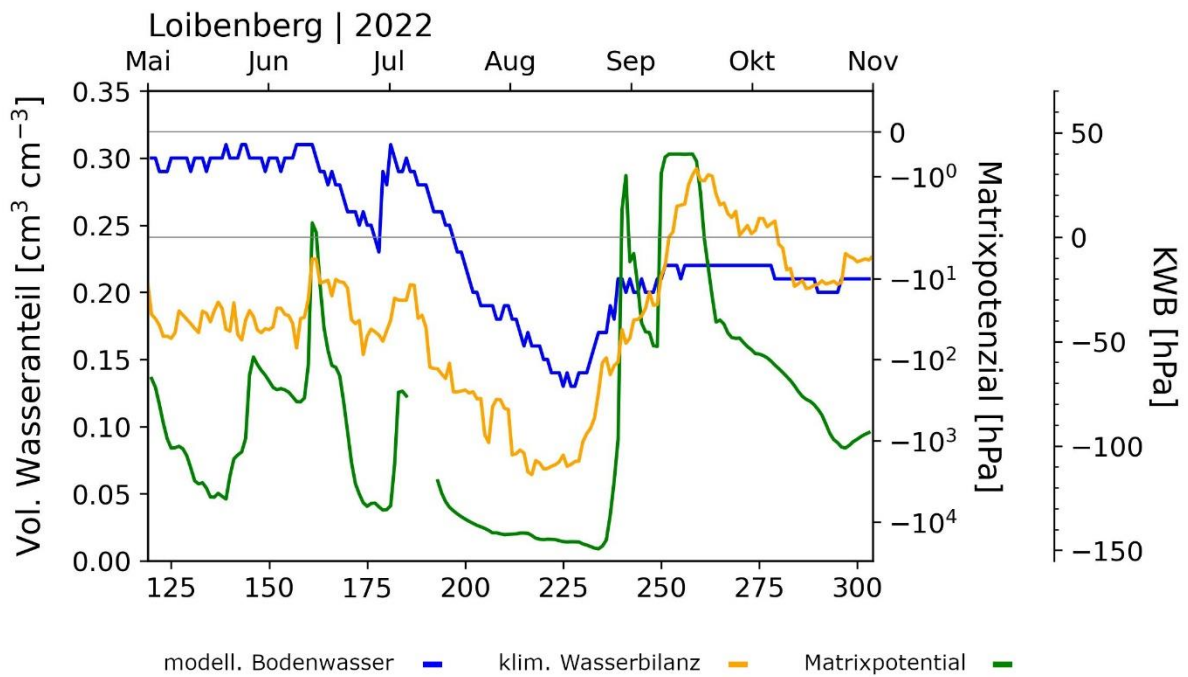


Abbildung 35: Modellierter Bodenwasseranteil (blau) im Vergleich mit Klimatischer Wasserbilanz (orange; berechnet über 30 Tage) und Matrixpotential (grün; unbewässerte Reben).

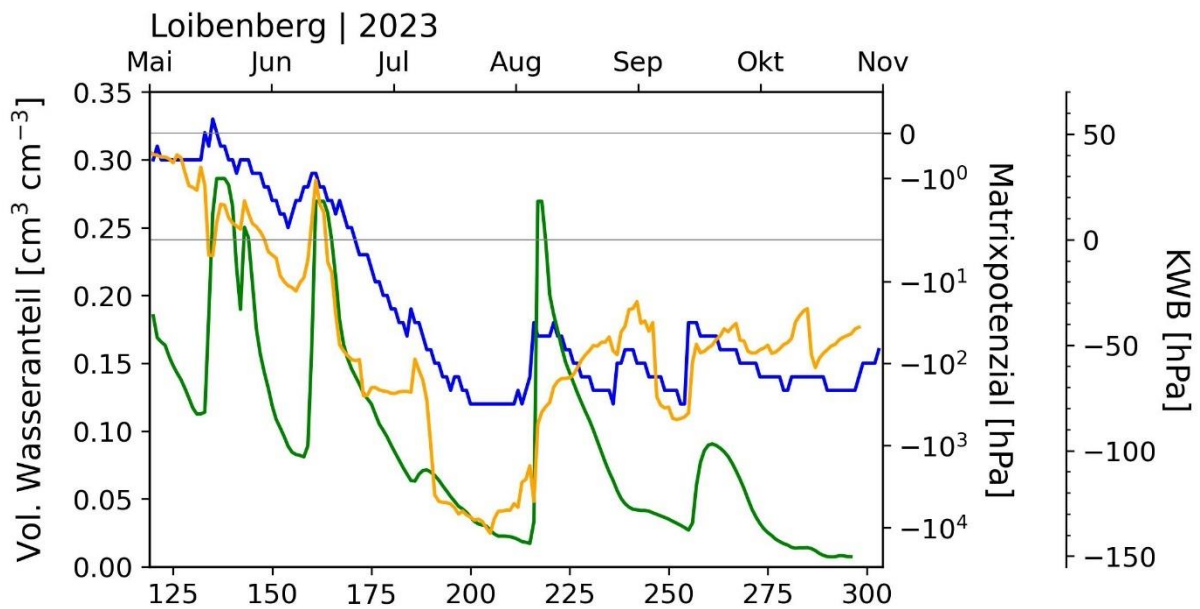


Abbildung 36: Modellierter Bodenwasseranteil (blau) im Vergleich mit Klimatischer Wasserbilanz (orange; berechnet über 30 Tage) und Matrixpotential (grün; unbewässerte Reben).

4.3.7 Topfversuche

Die Topfversuche an der LFS Krems erfolgten an sehr jungen Weinreben und mit regelmäßigen Gießvorgängen, die sehr deutlich in den Zeitreihen der Gewichtsmessungen ersichtlich sind (Abbildung 37 und Abbildung 38). Die Töpfe wurden etwa wöchentlich gegossen, einzelne längere Trockenphasen zeigen tiefere Einblicke in die Veränderungen der Wasseraufnahme der Pflanzen bei geringerer Wasserverfügbarkeit. Diese wird vor allem ausgedrückt durch die tägliche Gewichtsabnahme der Töpfe. Diese ist in den ersten zwei Tagen nach dem Gießvorgang stark, vermindert sich dann aber schnell und deutlich. Die Veränderungen des Stammdurchmessers bewegen sich in sehr geringen Dimensionen, augenscheinlich ist die einheitliche Zunahme des Durchmessers im Frühjahr des Jahres 2023, also in einem Zeitraum in dem die Pflanzen gut angewachsen sind, aber noch keine ausgeprägte Blattentwicklung stattfand. Im Vergleich dazu ist während der Hauptvegetationsperiode von Juli bis September eine Stagnation im Dickenwachstum zu erkennen. Die Sprünge im Jahr 2023 wurden durch Wartungsarbeiten bedingt.

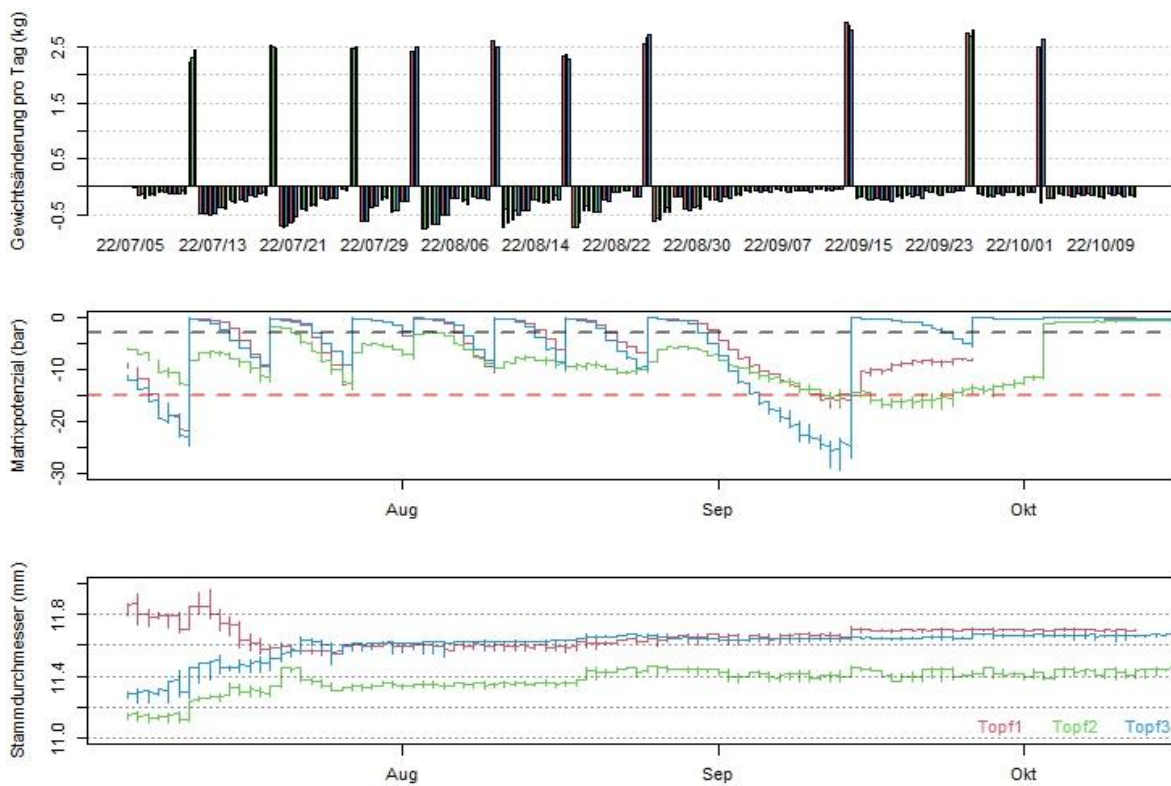


Abbildung 37: Verläufe von Gewichtsänderung, Matrixpotenzial und Stammdurchmesser der Pflanzen in den Topfversuchen an der LFS Krems im Jahr 2022.

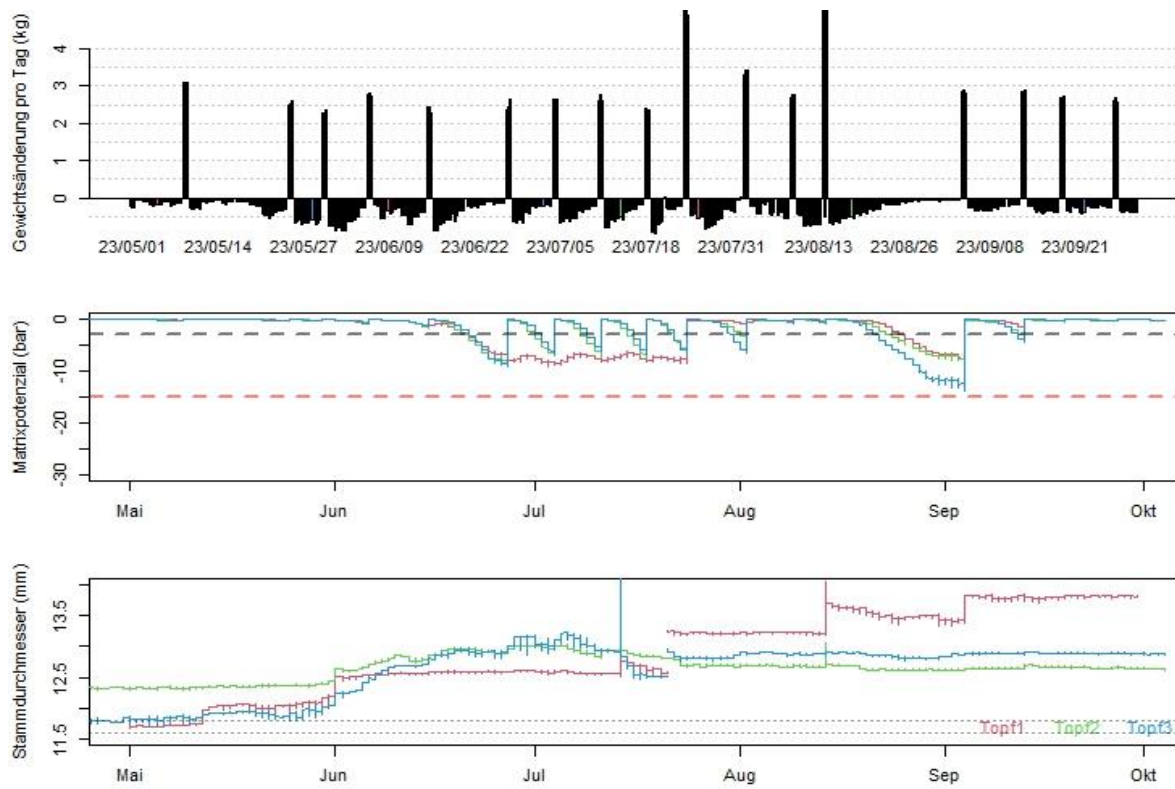


Abbildung 38: Verläufe von Gewichtsänderung, Matrixpotenzial und Stammdurchmesser der Pflanzen in den Topfversuchen an der LFS Krems im Jahr 2023.

5. Schlussfolgerungen für die Bewässerungssteuerung

5.1 Alternative Messmethoden zur Scholanderbombe

Bisher wurde hauptsächlich die Blattwasserpotential-Messung mittels Scholanderbombe als Grundlage für Bewässerungsempfehlungen verwendet. Da diese händisch vor Sonnenaufgang durchgeführt werden muss und somit mit einigem Zeit- und Arbeitsaufwand verbunden ist, war eines der Hauptziele dieser Studie, zu analysieren, ob kontinuierlich laufende Messgeräte an der Pflanze, bzw. im Boden als Alternative verwendet werden könnten.

In einem ersten Schritt wurden die Messungen der Monitoreinrichtungen mit jenen der Scholanderbombe verglichen. Der Grad der Übereinstimmung der entsprechenden Kenngrößen mit den BWP-Messungen wurde über Bland-Altman-Diagramme ermittelt (z.B. Kaur & Stoltzfus 2017; siehe Abbildung 39 zur Illustration und für nähere Details bzgl. des Vergleichs). Diese visuelle Ergebnisdarstellung dient dem Vergleich von Messverfahren, insbesondere von neuen Verfahren mit einem Goldstandard.

Für den Vergleich wurden grundsätzlich die Messwerte der Kenngrößen (Tagesmittelwerte) an den Tagen an denen auch eine Blattwasserpotential-Messung durchgeführt wurde verwendet (t_0). Um auch Aussagen über die zeitliche Entwicklung treffen zu können, insbesondere um eventuell früher reagierende Messgrößen identifizieren zu können, wurden die Messwerte drei Tage vor (t_{3-}) und drei Tage nach (t_{3+}) der BWP-Messung inkludiert. Weiters wurden die Mittelwerte der letzten sieben Tage ($7d-$), der kommenden sieben Tage ($7d+$), und der sieben Tage rund um die BWP-Messung ($7d_0$) einbezogen, um stochastische Effekte auszugleichen. Da alle Messungen unterschiedliche Einheiten haben, wurden die Daten zur besseren Vergleichbarkeit auf Werte zwischen 0 und 1 standardisiert, wobei 0 dem jeweiligen Minimalwert und 1 dem Maximalwert entspricht. Zusätzlich wurden alle Messungen auch invertiert inkludiert, da manche Messgrößen einen gegensätzlichen Verlauf zum Blattwasserpotential zeigen. Weiters wurde die Wurzel der quadrierten Mittelwerte (RMS; root mean square) als Maß für die Abweichung zwischen den Messungen der Monitoringeinrichtungen und der Scholanderbombe berechnet.

Nach diesem Schema wurden alle Kombinationen aus Messvariablen und zeitlicher Gruppierung (t_0 , t_{3-} , t_{3+} , $7d-$, $7d_0$, $7d+$) analysiert. Die meisten Variablen gingen zusätzlich mit verschiedenen Aggregationen in die Analyse ein (z.B. Tagesmittelwert, Tagesmaximum, Tagesminimum, Tagessumme, etc.). Somit ergeben sich insgesamt 374 Kenngrößen, für die Vergleiche mittels Bland-Altman-Diagrammen erstellt und die zugehörigen Gütemaße errechnet wurden. Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Messtandort Loibenberg unbewässert, da bei den anderen beiden Standorten die Bewässerung die Berechnung verfälscht.

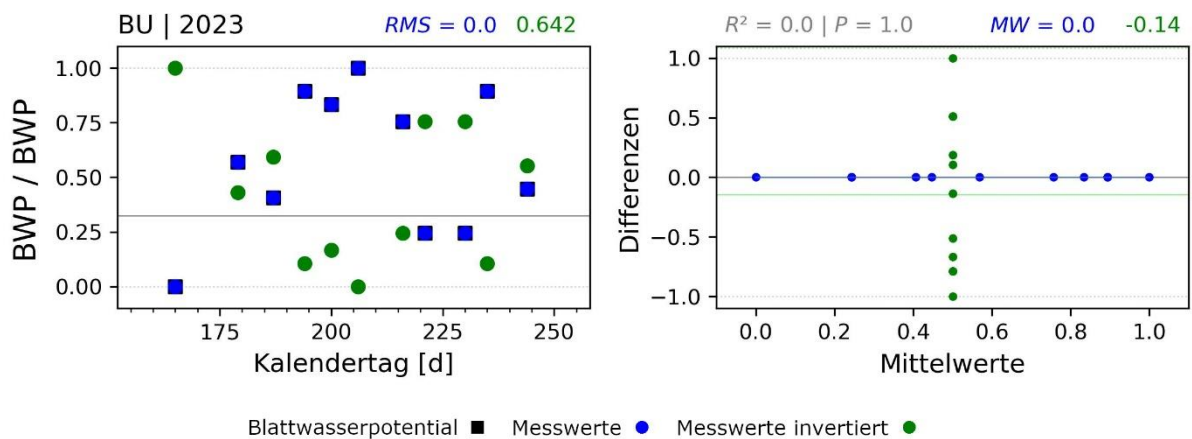


Abbildung 39: Bland-Altman-Diagramme und Gütemaße für den Vergleich der (standardisierten) Messwerte der Monitoringeinrichtungen (blaue Punkte) mit dem Blattwasserpotential (BWP; schwarze Kästchen). In diesem Beispiel wurde das BWP mit sich selbst verglichen, daher gibt es eine perfekte Überlagerung der blauen Punkte und schwarzen Kästchen; die invertierten Messwerte (grüne Punkte) fungieren hier entsprechend als Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung. RMS (root mean square) ist ein Maß für die Abweichung von Werten (den Messungen der Monitoreinrichtungen) mit Vergleichswerten (den BWP-Messungen) und kann zwischen 0 (perfekte Übereinstimmung, wie im dargestellten Fall) und 1 (gegensätzlicher Verlauf) liegen. Die schwarze horizontale Linie entspricht dem Schwellenwert beim BWP von 3 bar. Im rechten Diagramm ist die Differenz jedes einzelnen Messwerts mit der korrespondierenden BWP-Messung über deren Mittelwert aufgetragen. Bei einer perfekten Übereinstimmung ergibt sich ein Mittelwert von 0, sowie ein statistisch nicht signifikanter Zusammenhang ($P = 1$) bei einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0. Die Messwerte stimmen daher umso besser mit den BWP-Messungen überein, je niedriger RMS, R^2 und Mittelwert sind.

Die besten Übereinstimmungen fanden sich dabei für Maximum Daily Shrinkage (MDS), Trunk Growth Rate (TGR), Bodentemperatur, klimatische Wasserbilanz (KWB) und Blattoberflächentemperatur (Tabelle 2). Trotz teilweise guten Gütemaßen für die Übereinstimmung gab es keine Variable, die den Verlauf des BWP verlässlich spiegelte und demnach einen annähernd perfekten Ersatz für die Scholanderbomben-Messungen darstellen würde. Oftmals gab es auch Unterschiede zwischen den Messjahren, mit guter Übereinstimmung in einem Jahr und schlechterer Übereinstimmung im anderen. Auch die Variabilität zwischen den Rebstöcken spielt mitunter eine Rolle. Beispielsweise wurde die formal beste Übereinstimmung für die Variable MDS (7d-) gefunden, allerdings nur für Rebe U2; bei den anderen beiden mit Sensoren versehenen Reben war die Übereinstimmung wesentlich schlechter.

Tabelle 2: Die zehn Variablen mit der höchsten Übereinstimmung mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die Farben spiegeln den Grad der Übereinstimmung wieder: dunkelblau = 0 (perfekte Übereinstimmung), dunkelrot = 1 (keine Übereinstimmung). inv – invertierter Verlauf.

Parameter	Aggr.	Zeit	inv	Tiefe	2022			2023		
					R2 (abs)	P	RMS	R2 (abs)	P	RMS
1 MDS (Rebe 2)		7d-	inv		0.076	0.858	0.185	0.062	0.857	0.274
2 TGR		t0			0.026	0.951	0.222	0.029	0.934	0.328
3 Bodentemperatur	Max	7d-		15	0.064	0.851	0.375	0.019	0.955	0.151
4 Bodentemperatur	MW	7d-		15	0.159	0.641	0.353	0.005	0.988	0.143
5 Bodentemperatur	MW	t0		15	0.031	0.932	0.381	0.001	0.997	0.250
6 KWB	Summe	t0	inv		0.180	0.596	0.336	0.008	0.981	0.170
7 TGR (Rebe 2)		t0			0.043	0.919	0.254	0.136	0.689	0.265
8 Blatttemperatur	Max	7d-			0.080	0.816	0.402	0.004	0.991	0.251
9 Bodentemperatur	Max	t3-		30	0.157	0.664	0.372	0.030	0.931	0.182
10 KWB		7d0	inv		0.000	1.000	0.437	0.042	0.903	0.268

Für die drei Kenngrößen mit den besten Gütekriterien aus Tabelle 2 sind in den Abbildungen Abbildung 40 Abbildung 42 die Bland-Altman-Diagramme zu sehen. Im Vergleich zur schematischen Abbildung 39 liegen in den jeweils rechten Teilen der Grafiken die Mittelwerte (farbige horizontale Linien) nicht mehr auf der Nulllinie. Der Abstand dieser Trendlinie steht für die Güte des Zusammenhangs. Eine eventuelle Neigung der Regressionsgeraden (dunkelfarbige Linien) zeigt wiederum eine Über- oder Unterschätzung in höheren oder niedrigeren Wertebereichen.

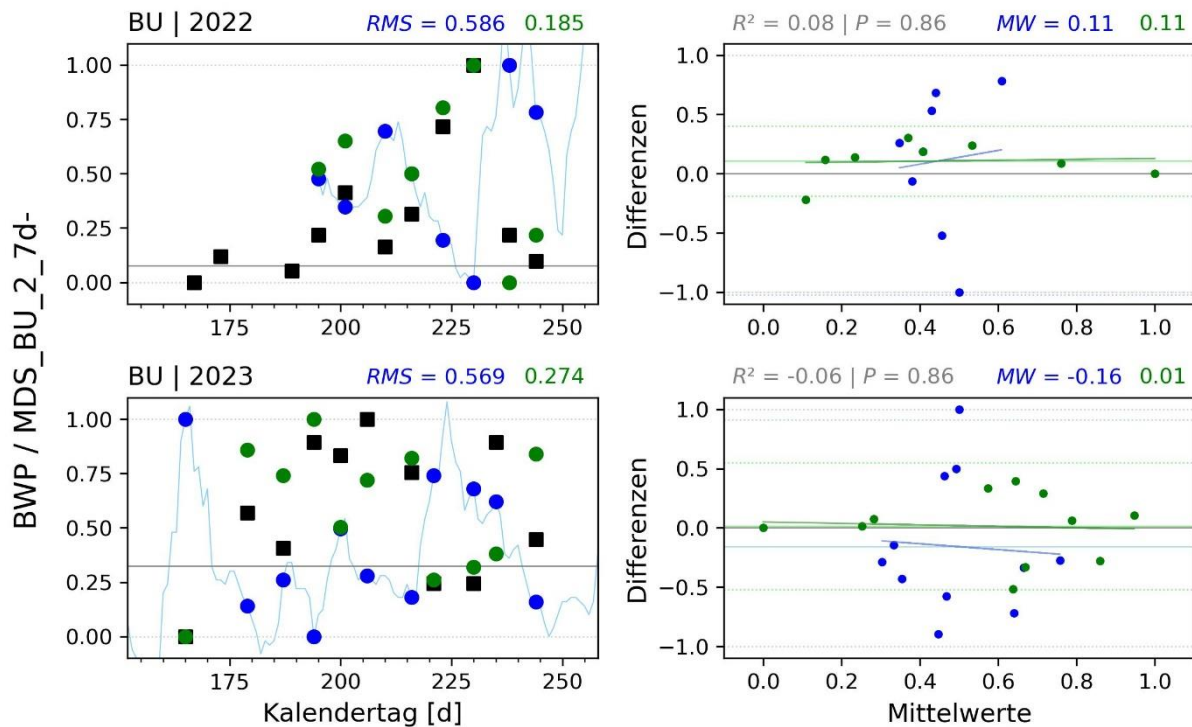


Abbildung 40: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Maximum Daily Shrinkage MDS (Rebe 2) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39.

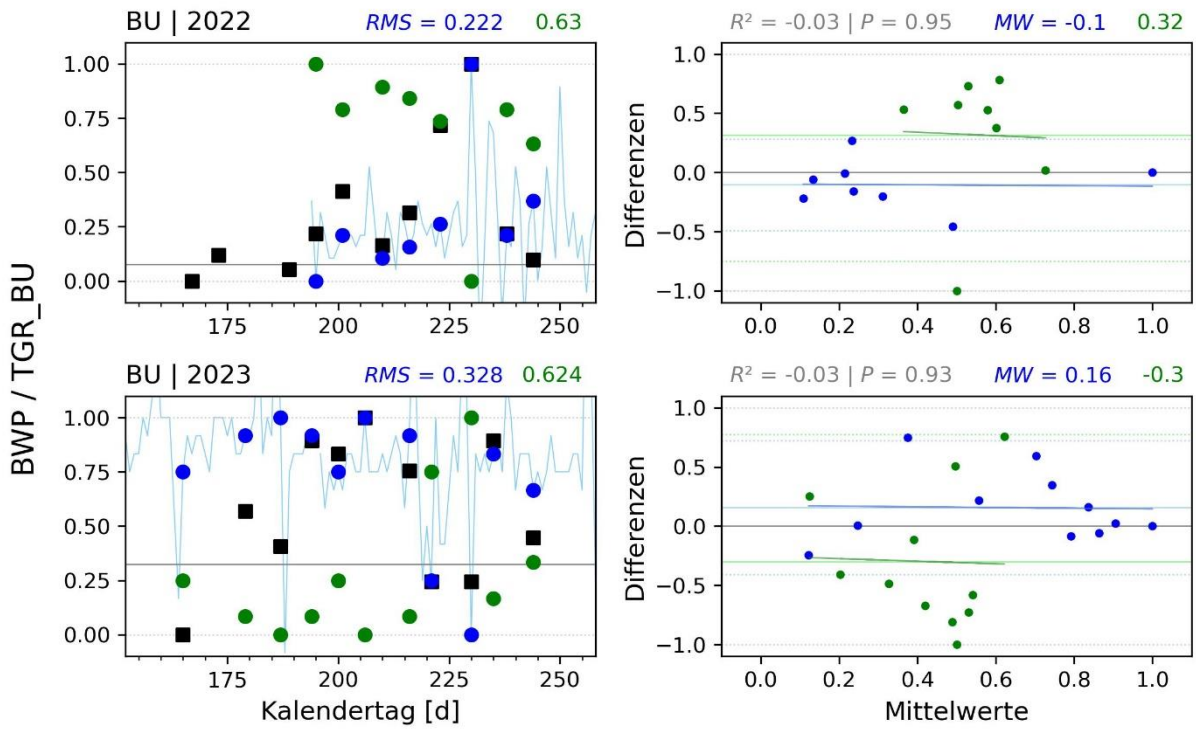


Abbildung 41: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Trunk Growth Rate TGR MDS (Rebe 2) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39.

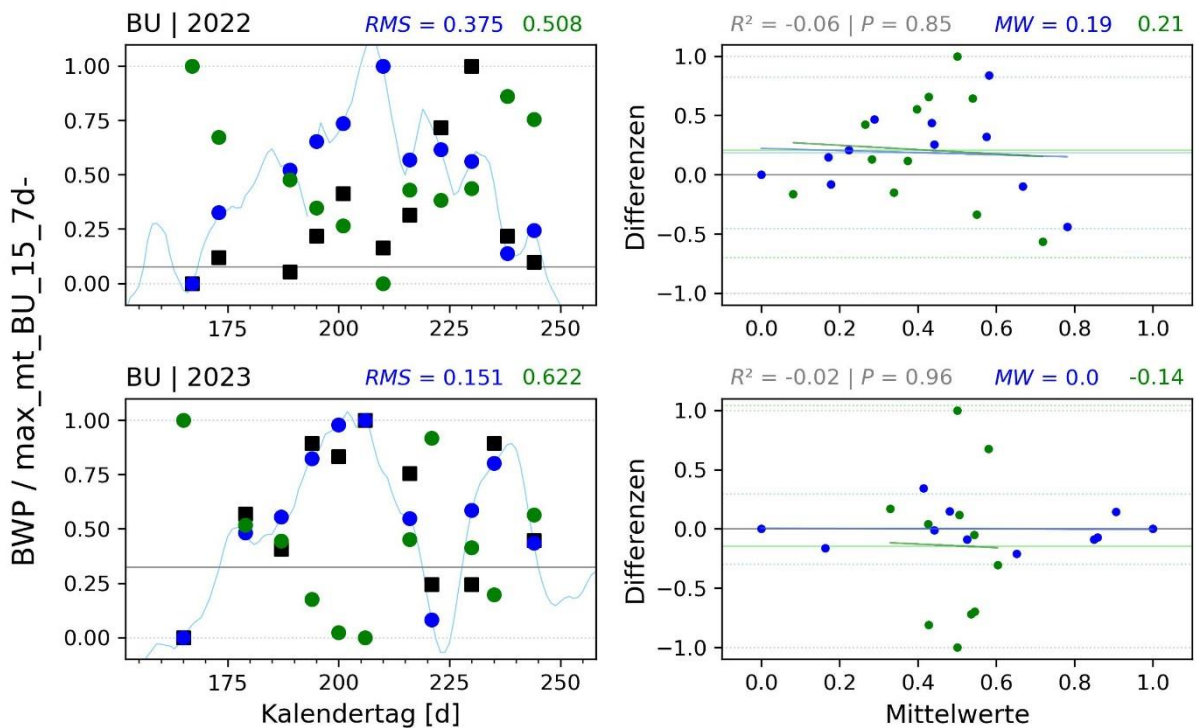


Abbildung 42: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Bodentemperatur (15 cm Tiefe) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39.

5.2 Eignung der Variablen zur Vorhersage von Trockenstress/Trockenperioden

Keine der gemessenen Variablen spiegelt die Messungen der Scholanderbombe 1:1 wieder. Trotzdem eignen sich einige der aufgenommenen oder berechneten Parameter sehr gut zur Abschätzung von Trockenstress, bzw. der Wasserversorgung der Pflanzen im Allgemeinen. Diese stellen somit eine Alternative zu den Blattwasserpotentialmessungen dar, welche zwar verlässliche Werte zum Trockenstress der Pflanzen liefert, nicht zuletzt aufgrund der nicht-kontinuierlichen Messungen jedoch auch nicht unfehlbar ist.

Ein Parameter der die Wasserverhältnisse sehr gut abbildet ist das **Matrixpotential** im Boden (siehe Abschnitt 4.3.1). Es entsteht durch Adhäsions- und Kapillarkräfte in der Bodenmatrix und entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um einem Boden Wasser zu entziehen. Es ist daher umso größer (d.h. negativer) umso trockener der Boden ist. Bewässerungsempfehlungen könnten beispielsweise gegeben werden, sobald ein bestimmter Wert unterschritten wird. Vor allem am Standort Loibenberg konnte man erkennen, dass die regelmäßige Bewässerung im Sommer zwar einen deutlichen Effekt hatte, die Matrixpotentiale aber trotzdem auf einem relativ niedrigen Niveau verblieben. Das zeigte sich auch an den Blattwasserpotentialmessungen, wo es im Sommer trotz Bewässerung ebenfalls, zumindest zeitweise, zu einem Überschreiten des Schwellenwerts (3 bar) kam. Matrixpotential- und BWP-Messungen zeigten im Detail aber Unterschiede. So blieb beispielsweise am Standort Loibenberg bei den vier Bewässerungen im Juli und August 2022 das BWP bei den ersten drei Wassergaben unter dem Schwellenwert, lag aber nach der vierten deutlich darüber (Abbildung 12). Die Matrixpotentiale stiegen im gleichen Zeitraum nach einer Bewässerung zwar stets leicht an, blieben aber allesamt auf einem niedrigen Niveau unter 1.000 hPa (Abbildung 16). Das liegt wahrscheinlich daran, dass auch in der Pflanze selbst Wasser gespeichert wird und so kurzfristige Trockenheit überbrückt werden kann. Das heißt aber auch, dass das Blattwasserpotential der eigentlichen Wasserversorgung im Boden immer etwas hinterherläuft und sich länger anhaltende Trockenphasen unter Umständen erst spät zeigen. Eine Bewässerungsempfehlung auf Basis des Matrixpotentials könnte somit Vorteile gegenüber den bisherigen Messungen mit Scholanderbombe bringen.

Ebenfalls gut geeignet um Trockenphasen zu ermitteln ist die Berechnung der **Klimatischen Wasserbilanz (KWB)**. Diese wird über einen gewissen Zeitraum berechnet (z.B. ein Tag, eine Woche, ein Monat) und gibt die Differenz aus Evapotranspiration (also Wasserverlust) und Niederschlägen an. Eine Bewässerungsempfehlung könnte beispielsweise erfolgen, sobald die KWB unter Null fällt, es also, bezogen auf den Berechnungszeitraum, ein Wasserdefizit gibt. Als besonders geeignet erscheint hierbei die Berechnung über sieben Tage. Diese liefert sehr ähnliche Ergebnisse wie die Matrixpotentialmessungen (am unbewässerten Standort), hat gegenüber dieser aber den Vorteil, dass man gegebenenfalls keine eigenen Sensoren anbringen muss, sondern auf das bestehende Netz an Messstationen zurückgreifen kann, sofern diese nicht zu weit entfernt sind. Andererseits liefern die Matrixpotentialsensoren direkt Messungen vom Standort und bilden somit die tatsächliche Situation im Boden besser ab. Sinnvoll könnte auch die gleichzeitige Betrachtung von über verschiedene Zeiträume berechnete KWB-Verläufe sein (siehe Abschnitt 4.1). Bei länger anhaltenden Perioden mit Wasserdefizit kann es unter Umständen vorteilhaft sein eine Bewässerung fortzuführen. Diese wird über eine KWB die über einen längeren Zeitraum integriert (z.B. 30 Tage) besser abgebildet als bei einer kürzeren Zeitspanne (z.B. 7 Tage).

Eine gewisse Eignung zur Bewässerungssteuerung hat auch die **Temperaturdifferenz** zwischen Blattoberfläche und Luft (Abbildung 43Abbildung 46, siehe auch Abschnitt 4.3.5). Am Standort Loibenberg zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen gut und schlecht wasserversorgten Phasen,

zum Teil mit Temperaturunterschieden um bis zu 7 °C (siehe z.B. Abbildung 43). Diese Unterschiede waren am generell besser wasserversorgten Standort Loiben Tal weniger deutlich. Eine Einschränkung dieser Methode ist, dass sie eine Blattwand mit voll ausgebildeten Blättern benötigt und deshalb nur während der Sommermonate brauchbare Daten liefert. Ebenso werden durch die Mittelung der Werte über einen längeren Zeitraum kurzfristige Änderungen (z.B. einzelne Regenereignisse) nur gedämpft abgebildet. Dennoch liefert auch diese Methode, vor allem in Kombination mit den anderen Methoden, nützliche Informationen für die Bewässerungssteuerung.

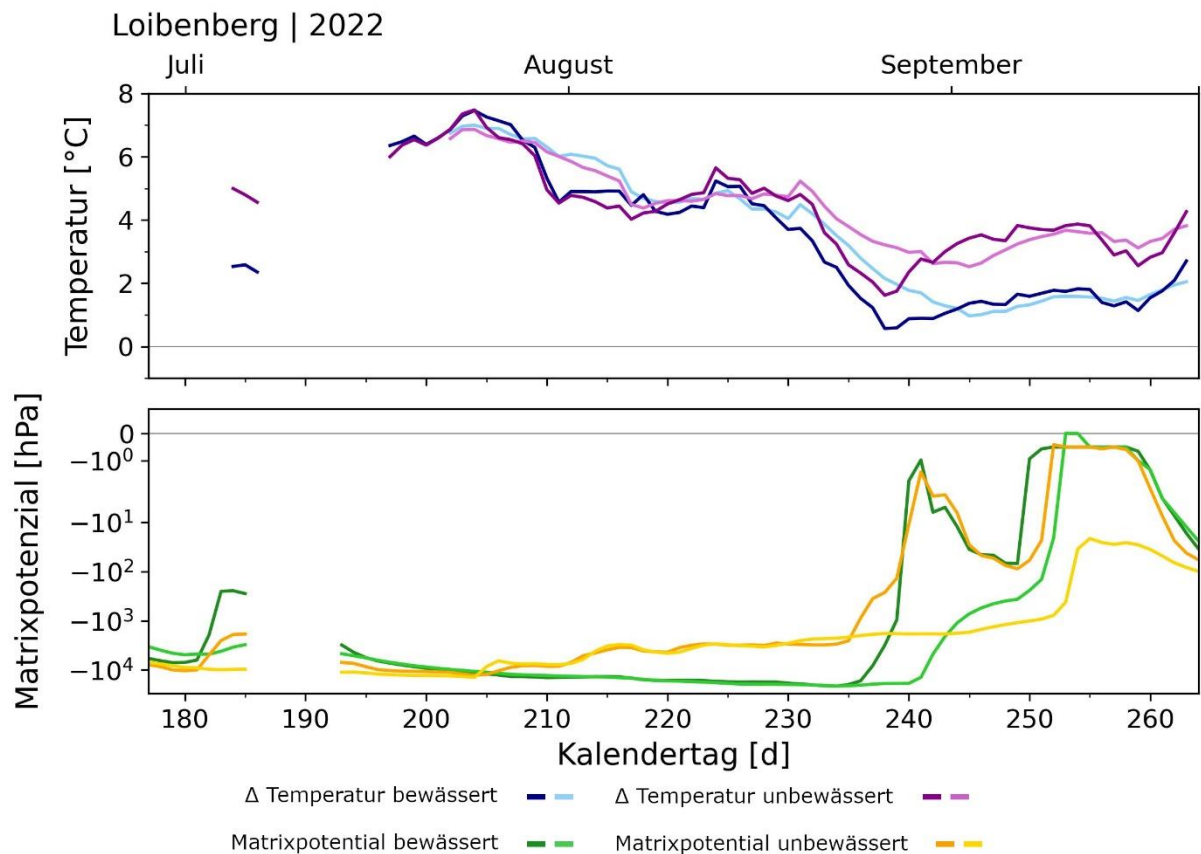


Abbildung 43: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. In der oberen Grafik bedeuten hellere Farben die Berechnung des gleitenden Mittels über 14 Tage, dunkle Farben über 7 Tage. In der unteren Grafik bedeuten hellere Farben tiefere Bodenschichten (30 cm), analog zu Abbildung 16. Durch die Berechnung eines gleitenden Mittelwertes kommt es bei Fehlen einzelner Messtage zu einer entsprechend größeren zeitlichen Lücke im Verlauf.

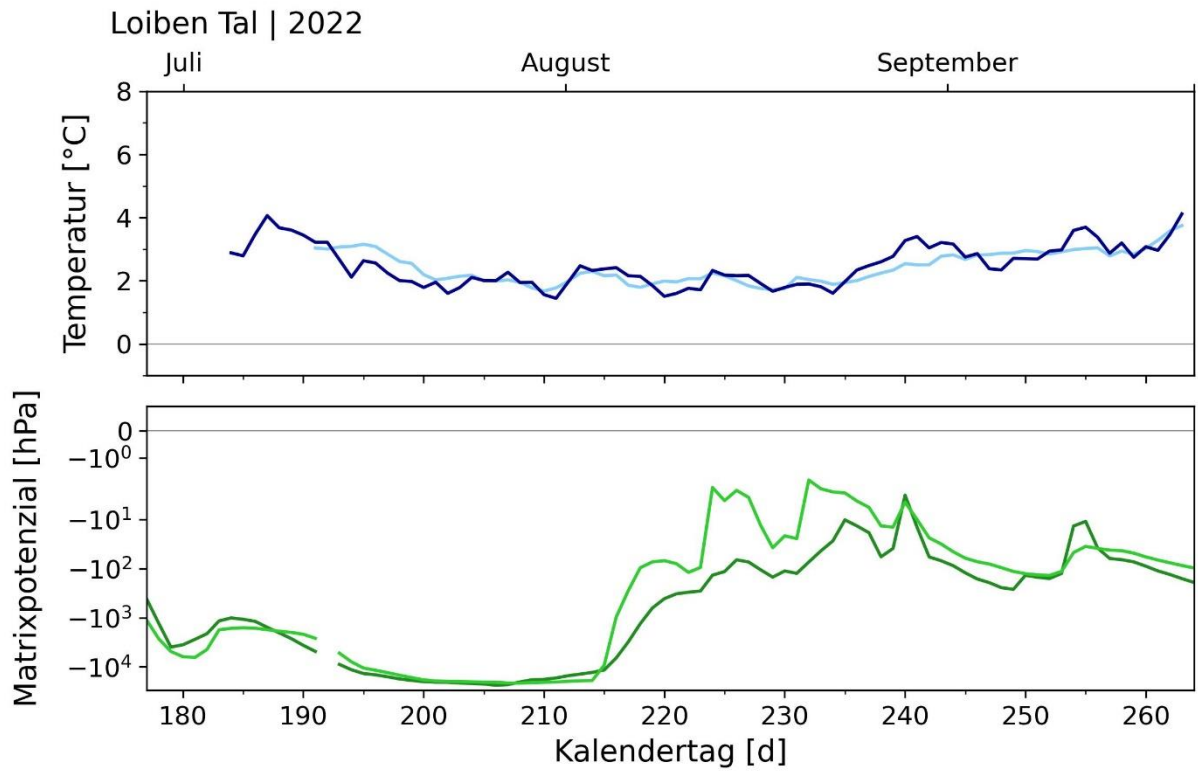


Abbildung 44: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43.

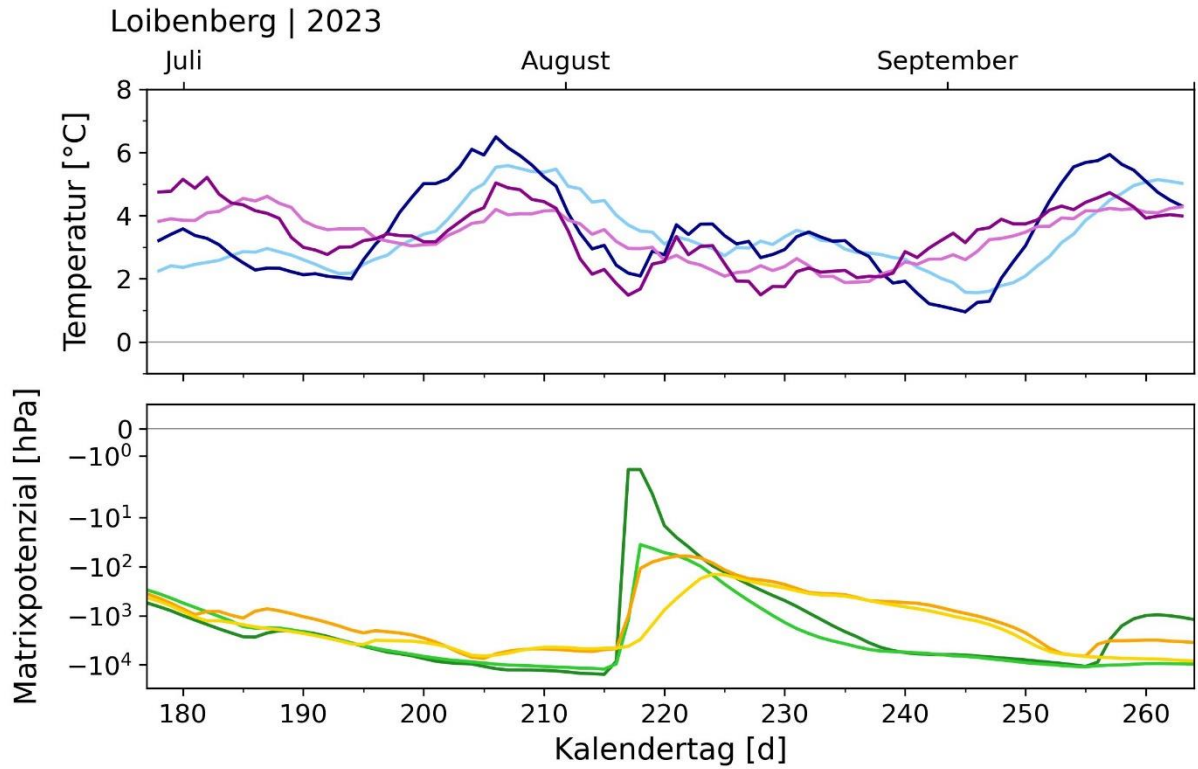


Abbildung 45: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43.

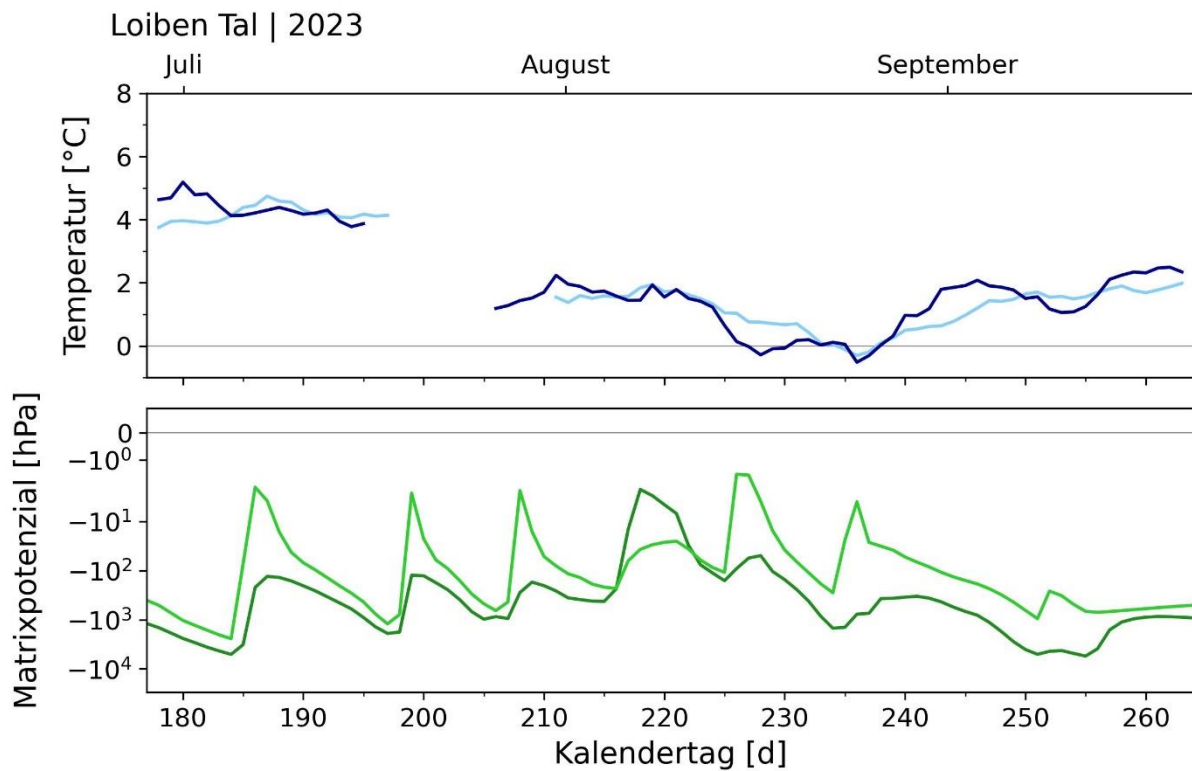


Abbildung 46: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43.

Eine zusammenfassende Aufbereitung der interessantesten Kenngrößen kann die Einblicke und möglichen Interpretationen erleichtern (Abbildung 47). Für die hier eingefügte Darstellung wurden auch Trockenperioden visualisiert, für deren Ausweisung je Kenngröße verschiedene Grenzwerte bestimmt wurden. Diese Auswahl beruht in der momentanen Form auf Experteneinschätzung, wurde eher großzügig angesetzt und kann flexibel abgeändert werden. Oberhalb der einzelnen Verlaufsgrafiken ist ein Fenster mit der Summierung der einzelnen Kennwerte angebracht, das heißt die jeweiligen Zeiträume sind dort umso dunkler dargestellt, je mehr einzelne Kennwerte gerade Trockenheit anzeigen. Diese Ergebnisdarstellung kann als Kernelement für weitere Optimierung der Interpretationen dienen.

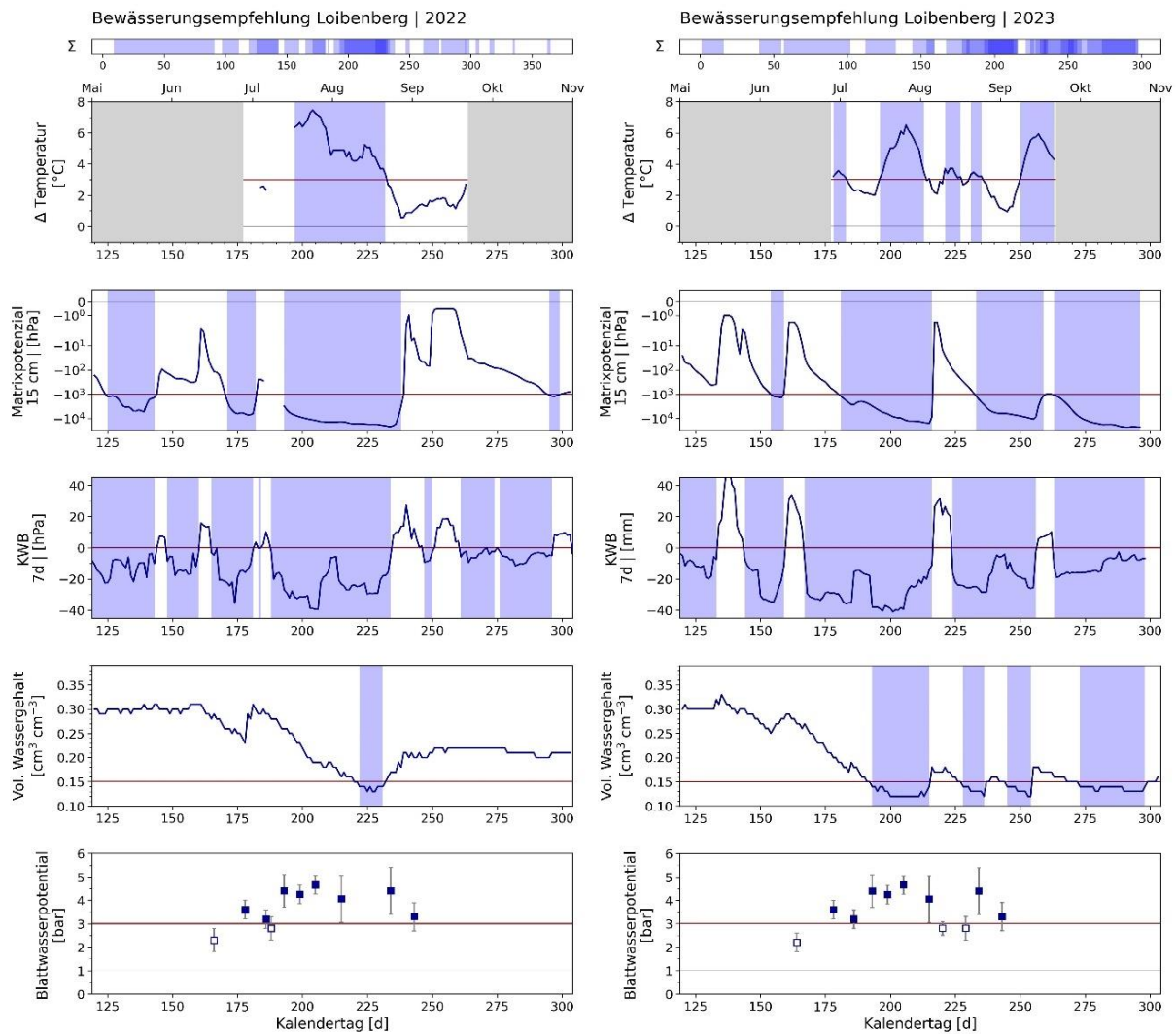


Abbildung 47: Zusammengefasste Darstellung der interessantesten Messwerte mit vorläufiger Visualisierung von Trockenperioden mit Bewässerungsbedarf als blaue Schattierung. Angenommene Schwellenwerte: Temperaturdifferenz $< 3 \text{ }^\circ\text{C}$; Matrixpotenzial $< 1.000 \text{ hPa}$; klimatische Wasserbilanz $< 0 \text{ mm}$; Vol. Wassergehalt $< 0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; Blattwasserpotential $> 3 \text{ bar}$.

5.3 Wochenberichte

Um die in den Weinbergen generierten Daten so schnell und effizient wie möglich in der Praxis verfügbar zu machen, wurde im Jahr 2022 eine Art Wochenbericht zum aktuellen Bewässerungsbedarf entworfen. Dabei wurde versucht, alle relevanten Daten einfach und übersichtlich in einem kurzen Wochenbericht darzustellen und eine allgemeine Empfehlung über einen möglichen Bewässerungsbedarf abzugeben.

Meteorologische Daten wurden dabei ebenso dargestellt, wie Bodendaten, die Auskunft über den pflanzenverfügbaren Wassergehalt im Boden Rückschluss geben. Weiters wurden Daten der Dendrometer und Radiometer ausgewertet und versuchsweise dargestellt. Für die abschließende Empfehlung zum Bewässerungsbedarf wurden auch Wetterprognosen mit einbezogen. Dieser Bericht wurde in regelmäßigen Abständen allen Projektmitgliedern zur Verfügung gestellt. Im Anhang befinden sich beispielhaft zwei dieser Berichte.

6. Literatur

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guide-lines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. FAO, Rome, Italy.

Cifre, J., Bota, J., Escalona, J. M., Medrano, H., Flexas, J. 2005. Physiological tools for irrigation scheduling in grapevine (*Vitis vinifera* L.) An open gate to improve water-use efficiency? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106, 159-170.

Eitzinger, J., Trnka, M., Semerádová, D., Thaler, S., Svobodová, E., Hlavinka, P., Šiška, B., Takáč, J., Malatinská, L., Nováková, M., Dubrovský, M., Žalud, Z. 2013. Regional climate change impacts on agricultural crop production in Central and Eastern Europe – Hotspots, regional differences and common trends. *Journal of Agricultural Science*, 151, 6, 787-812.

Intrigliolo, D. S., Castel, J. R. 2007. Evaluation of grapevine water status from trunk diameter variations. *Irrigation Science* 26, 49-59.

Kaur, P., & Stoltzfus, J. C., 2017. Bland–Altman plot: a brief overview. *International Journal of Academic Medicine*, 3(1), 110-111.

Kührer, E., Gabler, Ch. 2018. Der Trockenstress 2017 in Niederösterreich. Erfahrungen und Lehren. *Der Winzer* 05/2018, 14-16.

Pereira, L.S., Allen, R.G., Smith, M., Raes, D., 2015. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management* 147, 4-20.

Prueger, J.H., Parry, C.K., Kustas, W.P., ... Los, S.A., 2018. Crop Water Stress Index of an irrigated vineyard in the Central Valley of California. *Irrigation Science* 37, 297-313.

Savi, T., Petruzzellis, F., Moretti, E., Stenni, B., Zini, L., Martellos, S., Lisjak, K., Nardini, A., 2019. Grapevine water relations and rooting depth in karstic soils. *Science of The Total Environment* 692, 669-675.

Smart, D.R., Schwass, E., Lakso, A., Morano, L., 2006. Grapevine Rooting Patterns: A Comprehensive Analysis and a Review. *American Journal of Enology and Viticulture* 57, 89-104.

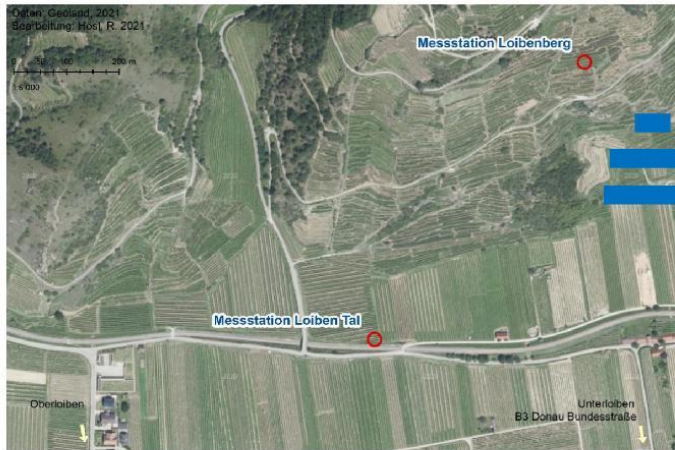
7. Anhang

Exemplarische Darstellung der in den Monaten Juli – September 2022 ausgegebenen Wochenberichte zum Bewässerungsbedarf am Loibenberg

BEWÄSSERUNGSBEDARF LOIBEN/WACHAU WOCHENÜBERSICHT



ZEITRAUM KW 28 | 11.7. - 19.7.2022 |



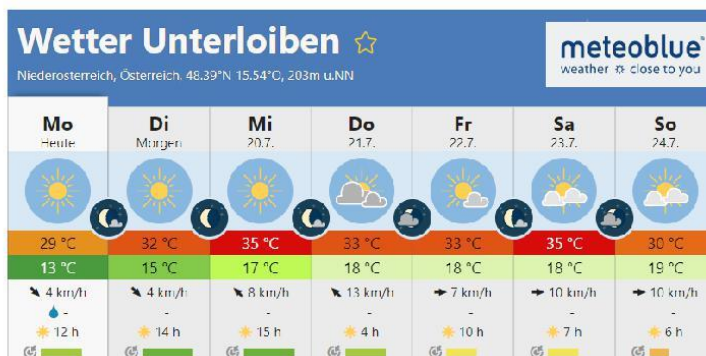
BEWÄSSERUNGSBEDARF: GEGEBEN

Begründung

Die Messwerte der Matrixpotenzialsensoren sind in einem sehr kritischen negativen Bereich. Die Scholanderbombenwerte korrelieren gut, sind ebenfalls unter dem kritischen Schwellenwert. Da kaum Niederschlag gefallen ist, wird von hohem Bewässerungsbedarf ausgegangen.

Prognose

Kommende Woche wird laut Wetterprognose heiß und trocken, das birgt für die Pflanzen hohes Risiko in Trockenstress zu geraten. Bewässerung wird daher empfohlen.



Bundesamt
für Wasserwirtschaft



Gefördert aus Mitteln des
NÖ Landschaftsfonds

Rosemarie Hösl
Thomas Weninger
Christoph Gabler

VERLÄUFE/MESSWERTE

01

Matrixpotenzial (MP) Loibenberg

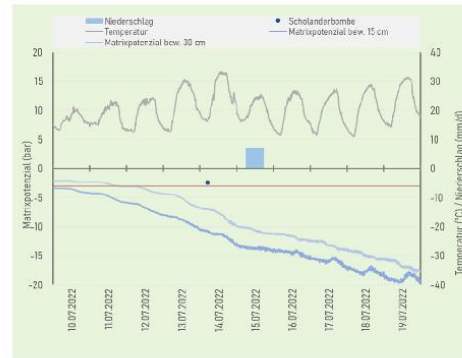
Die Bodenfeuchte am Loibenberg befindet sich in einem sehr kritischen Bereich, im Beobachtungszeitraum ist kaum Niederschlag gefallen, die Tagesmitteltemperaturen sind im Vergleich zur Vorwoche etwas gestiegen.



02

Matrixpotenzial (MP) Loiben Talebene

Auch an der Messstation Loiben Tal zeigen die Matrixpotenziensensoren einen stark negativen Verlauf. Der wenige Niederschlag konnte die Verluste an Bodenfeuchte nicht ausgleichen.



03

Stammdurchmesser

Die Differenz zwischen Maximum und Minimumwerte ergibt den Parameter MDS (Maximum Daily Trunk Shrinkage, **Intrigliolo et. al. 2007**), dieser reagiert auf den Niederschlag, umso geringer der Wert, umso leichter können Pflanzen in Trockenstress geraten. Dargestellt sind die Verläufe der drei Dendrometersensoren an der Station Loibenberg.



04

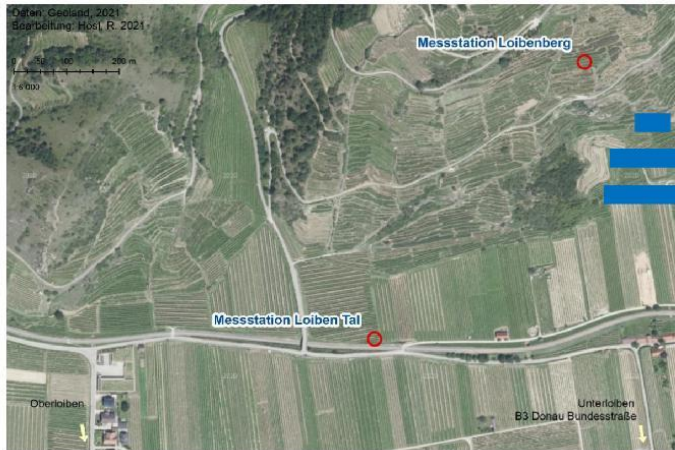
Im Beobachtungszeitraum ist kaum Niederschlag gefallen, die Mitteltemperaturen waren in der Wochenmitte relativ hoch, sind gegen Ende der Woche wieder gefallen. Wetterprognosen gehen von einer Hitzewelle kommende Woche aus.

	Niederschlag		Tagesmitteltemperatur		mittl. Windgeschw.	
	Berg	Tal	Berg	Tal	Berg	Tal
11.07.2022	0,0	0,0	-	18,2	-	3,7
12.07.2022	0,0	0,0	20,3	18,8	2,1	3,9
13.07.2022	0,0	0,0	23,7	22,5	2,9	3,9
14.07.2022	0,0	0,0	25,9	25,0	3,6	3,6
15.07.2022	7,0	7,0	20,1	20,1	2,3	2,6
16.07.2022	0,0	0,0	20,2	19,6	2,0	2,5
17.07.2022	0,0	0,0	20,5	19,6	1,9	2,5

BEWÄSSERUNGSBEDARF LOIBEN/WACHAU WOCHENÜBERSICHT



ZEITRAUM KW 32/33 | 8.8. - 21.8.2022 |



Bundesamt
für Wasserwirtschaft



Gefördert aus Mitteln des
NÖ Landschaftsfonds

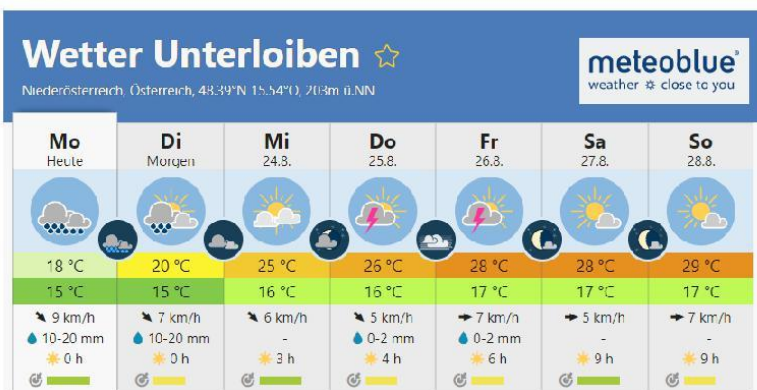
BEWÄSSERUNGSBEDARF: NICHT GEBEN

Begründung

Die Messwerte der Matrixpotenzialsensoren in den bewässerten Bereichen bewegen sich oberhalb des kritischen Schwellenwertes. Durch Zusatzbewässerung in den letzten Wochen konnte das Defizit vom Juli gut ausgeglichen werden. Zurzeit besteht kein Bewässerungsbedarf.

Prognose

Kommende Woche wird laut Wetterprognose gemäßbigtes Sommerwetter herrschen, es wird davon ausgegangen, dass es zu keinem nennenswerten Trockenstress für die Pflanzen kommen wird.



Rosemarie Hösl
Thomas Weninger
Christoph Gabler



VERLÄUFE/MESSWERTE

01

Matrixpotenzial (MP) Loibenberg

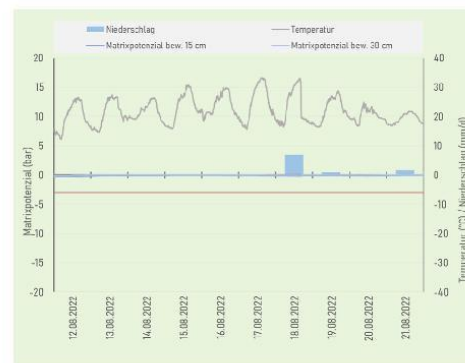
Die Bodenfeuchte im bewässerten Bereich befindet sich im Bereich des Grenzwertes von -3 bar. Im unbewässerten Bereich sind die Werte im stark negativen Bereich (am Diagramm nicht ersichtlich). Durch die Zusatzbewässerung sind die Pflanzen derzeit keinem Trockenstress ausgeliefert.



02

Matrixpotenzial (MP) Loiben Talebene

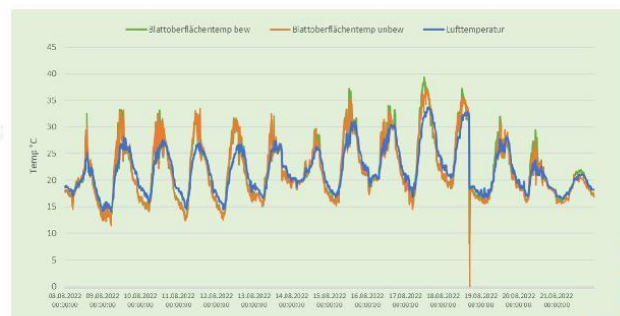
An der Messstation Loiben Tal zeigen die Matrixpotenzialsensoren Werte deutlich über dem Schwellenwert. Durch die Zusatzbewässerung und etwas tieferen Böden (im Vergleich zum Terrassenstandort am Loibenberg) sind die Weinpflanzen noch optimal mit Bodenwasser versorgen.



03

Oberflächentemperatur Blattwand

Das Diagramm zeigt die Temperatur der IR Kamera für den bewässerten und unbewässerten Bereich im Vergleich zur Lufttemperatur am Loibenberg. Die Werte korrelieren gut, die Differenz bei hohen Lufttemperaturen zu den IR Werten ist zu beachten.



04

Im Beobachtungszeitraum sind rund 10l/m² Niederschlag gefallen, die Tagesmitteltemperaturen liegen für die Jahreszeit in einem normalen Bereich. Wetterprognosen gehen von Niederschlag und moderaten Temperaturen für die kommende Woche aus.

	Niederschlag		Tagesmitteltemperatur		mittl. Windgeschwindigkeit	
	Berg	Tal	Berg	Tal	Berg	Tal
08.08.2022	0,0	0,0	19,3	19,3	2,1	2,1
09.08.2022	0,0	0,0	21,1	20,2	2,2	2,6
10.08.2022	0,0	0,0	21,7	20,6	2,7	3,0
11.08.2022	0,0	0,0	21,2	20,0	2,3	2,8
12.08.2022	0,0	0,0	20,8	19,7	2,1	2,6
13.08.2022	0,0	0,0	21,7	20,9	2,0	1,9
14.08.2022	0,0	0,0	21,7	21,6	1,4	1,5
15.08.2022	0,0	0,0	23,6	23,0	1,9	2,2
16.08.2022	0,2	0,2	24,4	24,0	3,0	3,1
17.08.2022	0,0	0,0	25,9	24,6	2,1	2,4
18.08.2022	7,9	6,9	23,8	22,8	2,2	2,8
19.08.2022	0,9	1,0	22,1	22,2	2,3	2,7
20.08.2022	0,0	0,0	19,8	20,4	4,0	3,6
21.08.2022	1,9	1,7	18,8	19,2	2,4	2,4

8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht Messstellen am Weinberg Loibenberg.....	5
Abbildung 2: Skizze Messstelle Loibenberg. Kreise stellen Weinreben dar, gefüllte Kreise diejenigen Pflanzen, die mit Sensorik ausgestattet wurden. Rot hinterlegt der unbewässerte Bereich.	6
Abbildung 3: Skizze Messstelleneinrichtung Loiben Tal.....	6
Abbildung 4: Links: Einbau Metallhülsen, Rinde geschält. Rechts: fertig installierter Saftflusssensor.	8
Abbildung 5: Installation Dendrometer.	9
Abbildung 6: Radiometer zur Messung der Blattoberflächentemperatur.	9
Abbildung 7: Topfversuche, 3 Jungpflanzen, WBS Krems.	10
Abbildung 8: Topfversuch an der WBS Krems, geschützt vor der Witterung unter Großraumregalen..	10
Abbildung 9: Vergleich meteorologische Daten Loibenberg. Dunkle Farben entsprechen dem langjährigen Mittel (1990-2020), mittlere Farben dem Messjahr 2022, helle Farben dem Messjahr 2023.	12
Abbildung 10: Klimatische Wasserbilanz (KWB; oben), Niederschlagsmuster und Verlauf des Matrixpotentials im Boden (unten). Zur oberen Abbildung: Die dunkelblaue Linie gibt den Verlauf der KWB für den jeweiligen Tag an (1d), die rote Linie den Verlauf der KWB berechnet über ein gleitendes Mittel der letzten sieben Tage (7d), die orange Linie mit einem gleitendem Mittel über die letzten 30 Tage (30d). Zur unteren Abbildung: Blaue Balken geben die Niederschlagssumme pro Tag an, hellblaue Linien sind künstliche Wassergaben (Bewässerung). Die grünen (bewässert) und gelben Linien (unbewässert) geben das Matrixpotential in 15 cm (dunklere Farben) und 30 cm Tiefe (hellere Farben) an – beim Matrixpotential stehen stark negative Werte für Trockenheit, das heißt in der Grafik: unten ist trocken, oben ist feucht.	13
Abbildung 11: Klimatische Wasserbilanz (KWB; oben), Niederschlagsmuster und Verlauf des Matrixpotentials. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 10.....	13
Abbildung 12: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Grün – bewässerte Weinreben; orange – unbewässerte Weinreben. Die grauen horizontalen Linien geben den optimalen Bereich an; liegt das BWP über dem Schwellenwert ist eine Bewässerung indiziert.....	14
Abbildung 13: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.....	15
Abbildung 14: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.....	15
Abbildung 15: Frühmorgendliches Blattwasserpotential (BWP). Für Details und Symbolik siehe Abbildung 12.....	16
Abbildung 16: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Die dunkleren Farben bei den Matrixpotential-Verläufen entsprechen jeweils einer Messtiefe von 15 cm, die helleren Farben entsprechen 30 cm.	17
Abbildung 17: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.	18
Abbildung 18: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.	18
Abbildung 19: Meteorologische Daten und Matrixpotential. Für Symbolik siehe Abbildung 16.	19
Abbildung 20: Evapotranspiration und Saftfluss. Die dunkle Linie bei den Saftstrom-Verläufen entspricht dem Mittelwert der bewässerten Reben, die helle Farbe den unbewässerten Reben.....	20
Abbildung 21: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.	20
Abbildung 22: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.	21
Abbildung 23: Evapotranspiration und Saftfluss. Für Symbolik siehe Abbildung 20.	21

Abbildung 24: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Stammzuwachs standardisiert auf Messbeginn. MDS – Maximum Daily Shrinkage. Hellere Farben (hellgrün, orange) entsprechen unbewässerten Weinreben, dunklere Farben (dunkelgrün, rot) bewässerten Weinreben (Mittelwert aus den 3 beprobten Reben).....	22
Abbildung 25: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.....	22
Abbildung 26: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.....	23
Abbildung 27: Dendrometermessungen und Niederschlagsmuster. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 24.....	23
Abbildung 28: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Die rosa Fläche gibt die Differenz zwischen Blattoberflächen- und Lufttemperatur an. Der Verlauf dieser Differenz der Blattoberflächen- und Lufttemperatur ist für die Tagesmaxima, -mittelwerte und -minima zusätzlich detailliert in der unteren Grafik dargestellt.	24
Abbildung 29: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.....	25
Abbildung 30: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.....	25
Abbildung 31: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.....	26
Abbildung 32: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 28.....	26
Abbildung 33: Verlauf der Tagesmaxima (obere Linien), -mittelwerte (mittlere Linien) und -minima (untere Linien) der Lufttemperatur (violett) und Blattoberflächentemperatur (pink). Für Details und Symbole siehe Abbildung 24.....	27
Abbildung 34: Detailausschnitt der Blattoberflächen- und Lufttemperatur (für Details und Symbole siehe Abbildung 28). Die Temperaturdifferenz nimmt nach einer Phase stärkerer Niederschläge (blau hinterlegt), und somit besserer Wasserverfügbarkeit im Boden, deutlich ab. Strichlierte rote Linien sind Regressionsgeraden.....	28
Abbildung 35: Modellierter Bodenwasseranteil (blau) im Vergleich mit Klimatischer Wasserbilanz (orange; berechnet über 30 Tage) und Matrixpotential (grün; unbewässerte Reben).....	29
Abbildung 36: Modellierter Bodenwasseranteil (blau) im Vergleich mit Klimatischer Wasserbilanz (orange; berechnet über 30 Tage) und Matrixpotential (grün; bewässerte Reben).....	29
Abbildung 37: Verläufe von Gewichtsänderung, Matrixpotenzial und Stammdurchmesser der Pflanzen in den Topfversuchen an der LFS Krems im Jahr 2022.....	30
Abbildung 38: Verläufe von Gewichtsänderung, Matrixpotenzial und Stammdurchmesser der Pflanzen in den Topfversuchen an der LFS Krems im Jahr 2023.....	31
Abbildung 39: Bland-Altman-Diagramme und Gütemaße für den Vergleich der (standardisierten) Messwerte der Monitoringeinrichtungen (blaue Punkte) mit dem Blattwasserpotential (BWP; schwarze Kästchen). In diesem Beispiel wurde das BWP mit sich selbst verglichen, daher gibt es eine perfekte Überlagerung der blauen Punkte und schwarzen Kästchen; die invertierten Messwerte (grüne Punkte)	

fungieren hier entsprechend als Beispiel für eine schlechte Übereinstimmung. RMS (root mean square) ist ein Maß für die Abweichung von Werten (den Messungen der Monitoreinrichtungen) mit Vergleichswerten (den BWP-Messungen) und kann zwischen 0 (perfekte Übereinstimmung, wie im dargestellten Fall) und 1 (gegensätzlicher Verlauf) liegen. Die schwarze horizontale Linie entspricht dem Schwellenwert beim BWP von 3 bar. Im rechten Diagramm ist die Differenz jedes einzelnen Messwerts mit der korrespondierenden BWP-Messung über deren Mittelwert aufgetragen. Bei einer perfekten Übereinstimmung ergibt sich ein Mittelwert von 0, sowie ein statistisch nicht signifikanter Zusammenhang ($P = 1$) bei einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0. Die Messwerte stimmen daher umso besser mit den BWP-Messungen überein, je niedriger RMS, R^2 und Mittelwert sind. 33

Abbildung 40: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Maximum Daily Shrinkage MDS (Rebe 2) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39. 34

Abbildung 41: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Trunk Growth Rate TGR MDS (Rebe 2) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39. 35

Abbildung 42: Bland-Altman-Diagramme für die Variable Bodentemperatur (15 cm Tiefe) im Vergleich mit den Blattwasserpotentialmessungen. Die blaue Linie im linken Teil gibt den Verlauf der Variable über die gesamte Saison wieder. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 39. 35

Abbildung 43: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. In der oberen Grafik bedeuten hellere Farben die Berechnung des gleitenden Mittels über 14 Tage, dunkle Farben über 7 Tage. In der unteren Grafik bedeuten hellere Farben tiefere Bodenschichten (30 cm), analog zu Abbildung 16. Durch die Berechnung eines gleitenden Mittelwertes kommt es bei Fehlen einzelner Messtage zu einer entsprechend größeren zeitlichen Lücke im Verlauf. 37

Abbildung 44: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43. 38

Abbildung 45: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43. 38

Abbildung 46: Differenz der Blattoberflächentemperatur zur Lufttemperatur im Vergleich zum Matrixpotential. Für Details und Symbolik siehe Abbildung 43. 39

Abbildung 47: Zusammengefasste Darstellung der interessantesten Messwerte mit vorläufiger Visualisierung von Trockenperioden mit Bewässerungsbedarf als blaue Schattierung. Angenommene Schwellenwerte: Temperaturdifferenz $< 3 \text{ }^\circ\text{C}$; Matrixpotential $< 1.000 \text{ hPa}$; klimatische Wasserbilanz $< 0 \text{ mm}$; Vol. Wassergehalt $< 0,15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$; Blattwasserpotential $> 3 \text{ bar}$ 40