



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Nachhaltige Agrarsysteme

Institut für Ökologischer Landbau

AG Bodenfruchtbarkeit und Anbausysteme

Unterflur-Tropfbewässerung im Bio- Pfefferminzanbau: Effizienter Wassereinsatz und nachhaltige Ertragssteigerung

Masterarbeit

Vorgelegt von

Helen Haupt

(11838471)

Betreuung und Prüfung: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.agr. J. K. Friedel

Wien, Juni 2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieses Projektes beigetragen haben. Ein großes Dankeschön gilt meinem Betreuer Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.agr. J. K. Friedel, der mich während des gesamten Prozesses eng begleitet hat. Angefangen mit dem Einstieg in den wissenschaftlichen Versuchsaufbau, über Rücksprachen zur korrekten Durchführung bis hin zur Auswertung der erhobenen Daten.

Das Projekt wurde von E. Stopper von Sonnentor, Mag. S. Glaser von der Firma Hydrip GmbH und C. Rossnagl, Landwirt in der Nähe von Horn, initiiert. Bei allen möchte ich mich herzlich für die Unterstützung in ihren jeweiligen Fachbereichen bedanken. C. Rossnagl hat seine Flächen für die Versuchsdurchführung zur Verfügung gestellt, die gesamte Vegetationsperiode über haben wir uns über die Bewässerung, das Messen des Bodenwassergehaltes usw. abgestimmt. Mag. S. Glaser hat mich mit seiner Expertise rund um das Bewässerungsmanagement unterstützt. E. Stopper hat mich im Namen Sonnentors seitens der Qualitätsansprüche an den Kräuteraanbau betreut, die Ernte der Parzellen begleitet sowie das Rebn der Trockenmasse.

Jedoch ohne viele weitere helfende Hände ist ein solches Projekt nicht durchzuführen. H. Unterfrauner hat Boden- und Pflanzenanalysen für diesen Versuch beigesteuert, die ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) hat Klimadaten geliefert. D. Fritzsche, Versuchstechnikerin des Institutes, hat mich mit Materialien für jeden Anlass ausgestattet, A. Polleichtner hat mich im Labor in sämtliche Analysen eingeführt und viele, viele Studienkollegen, Freunde sowie Familie haben mich bei der Ernte der Pfefferminze, dem Rebn der Trockenmasse und der Entnahme der Bodenproben unterstützt – ein herzliches Dankeschön dafür!

Kurzfassung (Deutsch)

Im Zuge des Klimawandels gewinnt die überlebenswichtige Ressource Wasser immer mehr an Bedeutung. Besonders in der Landwirtschaft sind Techniken gefragt, welche das Wasser effizient einsetzen, wie z. B. eine Unterflur-Tropfbewässerung (UTB). Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit werden die Vorteile und Auswirkungen einer solchen Technik anhand eines praktischen Feldversuches dargelegt. Versuchsstandort ist ein Demeter-Betrieb in der Nähe von Horn, in Niederösterreich. Angebaute Kultur ist die Pfefferminze, *Mentha x piperita* L. Die Daten basieren auf zwei Behandlungen, eine wird per Unterflur-Tropfbewässerung bewässert, die andere ist unbewässert und dient als Kontrollvariante. Die hohen Niederschlagsmengen während der Vegetationsperiode haben die Signifikanz der Ergebnisse erheblich beeinflusst, da lediglich sechsmal bewässert werden konnte; trotzdem konnten anhand von wöchentlich erhobenen Messdaten zu Bodenwassergehalten mittels TDR-Sonden (Time Domain Reflectometry), drei Ernteterminen sowie der Entnahme von Bodenproben Unterschiede im Bodenwassergehalt, im Bodennährstoffgehalt (N_{\min}) und in diversen Ertragsparametern festgestellt werden: Der Bodenwassergehalt stieg kurzfristig signifikant an, die Nährstoffverfügbarkeit stieg geringfügig und die Ertragsmengen erhöhten sich signifikant durch die Bewässerung. Der ätherische Ölgehalt stieg in der Pflanze selbst nicht, wurde aber über höhere Ertragsmengen vermehrt produziert. Die Anteile an braunen Blättern wurden über die Bewässerung reduziert und es wurde tendenziell ein optimiertes Blatt-Stängel-Verhältnis erreicht. Positive Auswirkungen dieser Bewässerungstechnik ließen sich auch in Bezug auf ein vereinfachtes Unkrautmanagement beobachten. Weiterführende Versuche könnten die Auswirkungen einer Unterflur-Tropfbewässerung auf vermutlich sinkende variable Kosten als auch einen geringeren Bewässerungsaufwand in den nächsten Jahren erfassen. Die ökonomischen Aspekte lagen jedoch nicht im Fokus dieser Arbeit.

Schlagworte: volumetrischer und gravimetrischer Bodenwassergehalt, pflanzenverfügbare Nährstoffe (P_{CAL} und N_{\min}), Klimatische Wasserbilanz, Qualitätsansprüche *Mentha x piperita* L., Versuchsdurchführung im Waldviertel (AUT)

Abstract (English)

Subsurface drip irrigation in organic peppermint cultivation: Efficient water use and sustainable yield increase

The consequences of climate change are increasing the need of water. Water is one of the most essential resources for a prosperous agricultural production. Therefore, the focus turns to smart techniques such as a subsurface drip irrigation in order to use limited resources of water more efficiently. This master thesis outlines the advantages and consequences of a subsurface drip irrigation. The data are originating from a field experiment that was implemented on an organic farm nearby Horn in Lower Austria. The culture grown on the field trial was peppermint, *Mentha x piperita* L. The data are examined on two treatments — watered by the subsurface drip irrigation and not watered with the control variable usage. High amounts of natural rain strongly impacted the significance of the results since it was only possible to irrigate six times during the season. Nevertheless, measuring the amount of water in the soil weekly by using TDR probes (Time Domain Reflectometry), the harvest of peppermint as well as the sampling of soil brought up differences in soil water contents, in soil nutrients (N_{\min}) and in harvest parameters. The main outcomes showed a significant short-term increase in soil water content, a rising availability of soil nutrients (N_{\min}) and significantly higher harvest quantities of the watered treatment. The results also highlighted that the essential oil content was not rising in the plant itself, though higher quantities of the peppermint resulted into higher amounts of essential oil. The subsurface drip irrigation reduced the number of brown leaves and tended towards a better leaf-stem-ratio of the watered variety. Furthermore, a positive effect of the irrigation technique was evaluated in a simplified weed management. Further research could examine economic impacts of the subsurface drip irrigation on lower variable costs as well as an easier water management during the next seasons.

Key words: volumetric and gravimetric soil water content, plant-available nutrients (P_{CAL} and N_{\min}), climatic water balance, quality standards of *Mentha x piperita* L., field trial in Lower Austria

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IX
Tabellenverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
Eidesstattliche Erklärung.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Hinleitung zum Thema.....	1
1.2 Ziel der Arbeit.....	1
1.3 Forschungsfragen.....	2
1.4 Aufbau der Arbeit und verwendete Methodik.....	3
2 Hypothesen.....	4
3 Stand der Forschung.....	6
3.1 Entstehung der Unterflur-Tropfbewässerung (UTB).....	6
3.2 Ursachen der Entstehung.....	6
3.3 Wasservorkommen, -verteilung und Bewässerung.....	7
3.4 Klimadaten.....	8
3.5 Das System UTB.....	9
3.6 Vor- und Nachteile der UTB.....	11
3.7 Einfluss der Bodenart auf Wasserspannung und -bewegung.....	12
3.7.1 Wasserverteilung im Boden mittels UTB.....	15
3.7.2 Verfügbarkeit der Nährstoffe in der Bodenlösung, P_{CAL} und N_{min}	16
3.8 Die Pfefferminze.....	17
4 Material und Methoden.....	22
4.1 Projektpartner.....	22
4.1.1 Landwirt Rossnagl.....	22
4.1.2 Sonnentor.....	22
4.1.3 Firma Hydrip GmbH.....	23
4.2 Standort.....	23
4.2.1 Boden.....	23
4.2.2 Klima.....	28
4.3 Versuchsaufbau.....	28
4.4 Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der zwei Varianten.....	31
4.5 Die eingesetzte Unterflur-Tropfbewässerung.....	33
4.6 Bewässerung, Niederschläge und potenzielle Verdunstung.....	33
4.7 Messung und Berechnung des Bodenwassergehaltes.....	34
4.8 Entnahme der Bodenproben.....	35
4.9 Methodik Labor.....	36

4.9.1	Pflanzenverfügbare Phosphor.....	36
4.9.2	Mineralischer Stickstoff und gravimetrischer Wassergehalt.....	37
4.10	Ernteprozedere	40
4.11	Analyse der Trockenmasse.....	43
4.12	Verkostung.....	44
4.13	Analyse des Wurzelbildes	44
4.14	Statistische Auswertungen	45
4.14.1	Bodenwassergehalt.....	46
4.14.2	Klima-Daten	46
4.14.3	Bodenproben	46
4.14.4	Ernte-Ergebnisse	47
4.14.5	Blatt-Stängel-Verhältnis.....	47
5	Ergebnisse	48
5.1	Niederschlagsmengen und Bewässerungsereignisse.....	48
5.2	Volumetrischer Bodenwassergehalt	48
5.3	Gravimetrischer Bodenwassergehalt.....	51
5.4	Potenzielle Evapotranspiration und Klimatische Wasserbilanz	53
5.5	Ergebnisse Bodenproben, P_{CAL} und N_{min}	56
5.6	Ergebnisse unterschiedlicher Ausgangsbedingungen	59
5.7	Ernte-Ergebnisse, quantitative und qualitative Parameter	60
5.7.1	Optik	60
5.7.2	Quantitative Ergebnisse	62
5.7.3	Blatt-Stängel-Verhältnis.....	67
5.7.4	Qualitative Ergebnisse	68
5.8	Nährstoffabtrag Pfefferminze und Wassernutzungseffizienz.....	72
5.9	Verkostungsergebnisse	74
5.10	Wurzelbild	75
5.11	Berechnung monetärer Mehrerträge	76
6	Diskussion.....	78
7	Fazit	91
8	Ausblick.....	92
9	Literaturverzeichnis	93
10	Anhang	98
10.1	Produktspezifikation Sonnentor.....	98
10.2	Nährstoffentzüge Pfefferminze	102
10.3	Ökologische Basischarakterisierung, Parzelle 3, bewässert	103
10.4	Ökologische Basischarakterisierung, Parzelle 8, unbewässert	119

10.5	Messergebnisse pH-Wert des 1. Schnitts (08. Juli 2020)	135
10.6	Messwerte TDR Sonden	136
10.7	Volumetrischer Wassergehalt – statistische Auswertung.....	143
10.8	Gravimetrischer Wassergehalt – statistische Auswertung	156
10.9	Messergebnisse P_{CAL}	158
10.10	P_{CAL} – statistische Auswertung.....	160
10.11	Messergebnisse N_{min}	161
10.12	N_{min} – statistische Auswertung	161
10.13	Ernteerträge der Parzellen.....	162
10.14	Hektar-Erträge – statistische Auswertung	164
10.15	Blatt-Stängel-Verhältnis – statistische Auswertung	165
10.16	Ergebnisse Ölgehalte Pfefferminze.....	166
10.17	Bleibelastung im Oberboden Österreichs, Stand 2006.....	168

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entstehung der Pfefferminze als Tripelbastard nach (Hoppe 2013)	18
Abbildung 2: pF-Kurve, mittl. Bereich d. Versuchsfeldes, 0-30 cm, nach Unterfrauner 2020, S. 4	25
Abbildung 3: Pfefferminze unbewässert , 04. Mai 2020, eigene Aufnahme	29
Abbildung 4: Pfefferminze bewässert , 04. Mai 2020, eigene Aufnahme	29
Abbildung 5: Feldskizze, eigene Darstellung	29
Abbildung 6: Parzellenplan, eigene Darstellung	30
Abbildung 7: vergrößerte Parzellen zur Ernte, eigene Darstellung	31
Abbildung 8: TDR-Sonden, verschiedene Größen, eigene Aufnahme	35
Abbildung 9: Auslese-Gerät der TDR-Sonden, eigene Aufnahme	35
Abbildung 10: Wuchshöhe 1. Schnitt, eigene Aufnahme	40
Abbildung 11: Schnitthöhe 1. Schnitt, eigene Aufnahme	40
Abbildung 12: Erntemaschine, eigene Aufnahme	41
Abbildung 13: Pfefferminze wird angeliefert und zerkleinert, eigene Aufnahme	41
Abbildung 14: zerkleinerte Pfefferminze z. Windsichten nach oben transportiert, eigene Aufnahme ..	42
Abbildung 15: Trockenraum, eigene Aufnahme	42
Abbildung 16: Parzellengut wird separat in Rahmen getrocknet, eigene Aufnahme	42
Abbildung 17: Trockengut fällt eine Ebene tiefer, eigene Aufnahme	42
Abbildung 18: Profilstellen Wurzelbild, eigene Darstellung	45
Abbildung 19: Natürlicher Niederschlag und Bewässerungsereignisse, eigene Darstellung	48
Abbildung 20: Volumetrischer Bodenwassergehalt, Varianzanalyse, eigene Darstellung	49
Abbildung 21: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 1 (0-10 cm), eigene Darstellung	50
Abbildung 22: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 2 (10-20 cm), eigene Darstellung	50
Abbildung 23: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 3 (20-40 cm), eigene Darstellung	51
Abbildung 24: Varianzanalyse grav. WG der einzelnen Schichten, eigene Darstellung	52
Abbildung 25: Varianzanalyse grav. WG der gesamten Schichten, eigene Darstellung	53
Abbildung 26: Potenzielle tägliche Evapotranspiration, eigene Darstellung	54
Abbildung 27: Wöchentliche Klimatische Wasserbilanz, eigene Darstellung	55
Abbildung 28: Streudiagramm, Niederschlag – Bodenwassergehalt, eigene Darstellung	55
Abbildung 29: P _{CAL} Parzelle 1, eigene Darstellung	57
Abbildung 30: P _{CAL} Parzelle 6, eigene Darstellung	57
Abbildung 31: P _{CAL} Parzelle 2, eigene Darstellung	57
Abbildung 32: P _{CAL} Parzelle 7, eigene Darstellung	57
Abbildung 33: P _{CAL} Parzelle 3, eigene Darstellung	57
Abbildung 34: P _{CAL} Parzelle 8, eigene Darstellung	57
Abbildung 35: P _{CAL} Parzelle 4, eigene Darstellung	58
Abbildung 36: P _{CAL} Parzelle 9, eigene Darstellung	58
Abbildung 37: P _{CAL} Parzelle 5, eigene Darstellung	58
Abbildung 38: P _{CAL} Parzelle 10, eigene Darstellung	58
Abbildung 39: Gesamte Frischmasse aller drei Schnitte in dt ha ⁻¹ , eigene Darstellung	63
Abbildung 40: TM Blätter aller drei Schnitte in dt ha ⁻¹ , eigene Darstellung	64
Abbildung 41: TM Braune Blätter aller drei Schnitte in dt ha ⁻¹ , eigene Darstellung	65
Abbildung 42: TM Stängel aller drei Schnitte in dt ha ⁻¹ , eigene Darstellung	66
Abbildung 43: Gesamte Trockenmasse aller drei Schnitte in dt ha ⁻¹ , eigene Darstellung	67
Abbildung 44: Blatt-Stängel-Verhältnis, eigene Darstellung	68
Abbildung 45: Ätherische Ölgehalte aller drei Schnitte, eigene Darstellung	69
Abbildung 46: Einzelanalysen 3. Schnitt, ätherische Ölgehalte, eigene Darstellung	69
Abbildung 47: Feuchte-, Aschegehalt und aw-Wert aller drei Schnitte, eigene Darstellung	70
Abbildung 48: Feuchte-, Aschegehalt und aw-Wert 3. Schnitt, eigene Darstellung	71
Abbildung 49: Wurzelprofil bewässert, eigene Aufnahme	76
Abbildung 50: Wurzelprofil unbewässert, eigene Aufnahme	76
Abbildung 51: Ölgehalte 1. Schnitt, bewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA	166
Abbildung 52: Ölgehalte 1. Schnitt, unbewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA	166
Abbildung 53: Ölgehalte 2. Schnitt, bewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA	167
Abbildung 54: Ölgehalte 2. Schnitt, unbewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA	167

Abbildung 55: Bleibelastung in Österreichs Oberboden nach (Bodenzustandsinventur des BFW aus BORIS 2006) 168

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung Pfefferminzöl,	19
Tabelle 2: Produktspezifikation Pfefferminze von Sonnentor, eigene Darstellung	19
Tabelle 3: Erträge bei Pfefferminze nach Feldversuchen der LfL (LfL 2001, S. 5)	21
Tabelle 4: Nährstoffentzüge Pfefferminze 1. Standjahr (n = 5) nach (Biertümpfel et al., S. 7)	21
Tabelle 5: Nährstoffentzüge Pfefferminze in kg ha ⁻¹ nach Bomme und Nast 1998 in (Hoppe 2013, S. 327).....	21
Tabelle 6: Einteilung der beobachteten Horizonte mittels Bohrstockprobe, eigene Darstellung	24
Tabelle 7: Einteilung der Schichten für den Versuchsablauf, eigene Darstellung	24
Tabelle 8: Bodenschwereklassen und zugehörige Bodenarten nach (Pichler 2012, S. 29)	26
Tabelle 9: Einbau der TDR-Sonden, eigene Darstellung	30
Tabelle 10: Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der Pfefferminze, eigene Aufnahmen	31
Tabelle 11: Bewässerungsereignisse 2020, eigene Darstellung	33
Tabelle 12: Spearman Korrelation Ergebnisse, eigene Darstellung	56
Tabelle 13: N _{min} Messergebnisse in mg kg ⁻¹ , eigene Darstellung	59
Tabelle 14: Bodenbedeckungsgrad der Parzellen, eigene Darstellung	60
Tabelle 15: Optik bewässert und unbewässert, 1. Schnitt, eigene Aufnahmen	60
Tabelle 16: Optik bewässert und unbewässert, 2. Schnitt, eigene Aufnahmen	61
Tabelle 17: Optik bewässert und unbewässert, 3. Schnitt, eigene Aufnahmen	61
Tabelle 18: Optik TM bewässert und unbewässert, 3. Schnitt, eigene Aufnahmen.....	62
Tabelle 19: Schwermetalle aller drei Schnitt, eigene Darstellung	71
Tabelle 20: Nährstoffabtrag Pfefferminze, Makronährstoffe und weitere Angaben nach (Unterfrauner 2020), eigene Hochrechnung auf kg ha ⁻¹	72
Tabelle 21: Nährstoffabtrag Pfefferminze, Mikronährstoffe und Schwermetalle nach (Unterfrauner 2020), eigene Hochrechnung auf g ha ⁻¹	73
Tabelle 22: Optische Bewertung der Pfefferminze, eigene Darstellung	74
Tabelle 23: Färbung Pfefferminz-Tee, eigene Darstellung	74
Tabelle 24: Bewertung Geschmack der Pfefferminze, eigene Darstellung.....	75
Tabelle 25: Monetäre Mehrerträge, eigene Darstellung.....	77

Abkürzungsverzeichnis

akt.	aktuell
AW	Auswaage
aw-Wert	Wasseraktivitätswert
BIP	Bruttoinlandsprodukt
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
d. h.	das heißt
EW	Einwaage
grav.	gravimetrisch
Jhd.	Jahrhundert
MW	Messwert
N _{min}	mineralischer Stickstoff
P _{CAL}	pflanzenverfügbare Phosphor
pot.	potenziell
s.	siehe
s. o.	siehe oben
s. u.	siehe unten
TDR-Sonden	Time Domain Reflectometry Sonden
usw.	und so weiter
UTB	Unterflur-Tropfbewässerung
u. v. m.	und vieles mehr
VDLUFA	Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V.
vgl.	vergleiche
vol.	volumetrisch
WG	Wassergehalt
z. B.	zum Beispiel

Eidesstattliche Erklärung

Ich, Helen Haupt, erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Wien, im Juni 2021

H. Haupt

1 Einleitung

1.1 Hinleitung zum Thema

Die Bewässerung in der Landwirtschaft ist ein Thema von steigender Bedeutung. Durch den Klimawandel verursachte Trockenperioden, Extremwetterereignisse und Temperaturanstiege (Eitzinger 2007, S. 1–4) stellen vor allem die Landwirtschaft vor immer wieder neue Herausforderungen. Dabei ist eine bedarfsgerechte Wasserversorgung essentiell für einen gleichmäßigen und stressfreien Aufwuchs der Pflanzen (Hoppe 2013, S. 314–315). Die zunehmend ungleiche Niederschlagsverteilung, sprich höhere Niederschläge im Winter und ausbleibende Niederschläge im Sommer (Eitzinger 2007, S. 1–4), erfordert immer öfter eine Bewässerung der Kulturen zur Sicherung der Erträge. Dafür gibt es verschiedenste Bewässerungstechniken wie mobile Beregnungsmaschinen, die Kreisberegnung, Sprinkler oder die Tropfbewässerung, (Top Agrar 2019), welche schon seit Jahrhunderten eingesetzt und laufend weiter entwickelt werden. In Bezug auf die Technik allein wird die Unterflur-Tropfbewässerung als effizienteste Maßnahme eingeordnet (Colaizzi et al. 2004). Hier liegt ein Bewässerungsschlauch unter der Bodenoberfläche und über sogenannte „Tropfer“ wird der Wurzelraum der Pflanze sehr effizient mit Wasser versorgt. Diese Bewässerungstechnik wird vielfach in ariden Gebieten eingesetzt, im europäischen Raum bisher nur selten (AQUASTAT FAO 2014, S. 5). Aufgrund der vielen Vorteile kann eine solche Bewässerungstechnik in Zukunft eine vielversprechende Alternative zu den gängigen Bewässerungsanlagen wie die Beregnung oder der oberirdischen Tropfbewässerung in Österreich sein; im Rahmen dieser Arbeit wird eine solche Anlage genauer erforscht. Die Versuchsfläche ist im Waldviertel in Österreich, in der Nähe von Horn. Installiert ist die Anlage im Kräuteranbau, die angebaute Kultur ist *Mentha x piperita* L., die Pfefferminze. Untersucht werden die Auswirkungen einer Unterflur-Tropfbewässerung (UTB) auf diverse Pflanzen- und Bodenparameter bei Bio-Pfefferminze.

1.2 Ziel der Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, die positiven Effekte der Unterflur-Tropfbewässerung per wissenschaftlicher Methoden zu prüfen. Dafür wurden zwei Pfefferminzbestände miteinander verglichen, der eine wurde mit der Unterflur-Tropfbewässerung bewässert, der andere wurde nicht bewässert. Anhand ausgewählter Boden- und Pflanzenparameter, vgl. Kapitel 2, welche von beiden Varianten regelmäßig erhoben wurden, sollten die Auswirkungen der Unterflur-Tropfbewässerung auf die Ertragsstruktur, qualitativ wie auch quantitativ, sowie auf einzelne Bodeneigenschaften, untersucht werden. Für Personen mit ähnlichen Verwendungszwecken stellt diese Arbeit eine Grundlage dar, ein solches Bewässerungssystem möglicherweise einzusetzen. Die Ergebnisse sind standortabhängig, dennoch soll der vorteilhafte Einsatz dieser Bewässerungsmethode verdeutlicht werden.

1.3 Forschungsfragen

Die Forschungsfragen lassen sich thematisch in drei Themenbereiche unterteilen: den Boden, das Klima und die Pflanze betreffend. Die einzelnen Parameter sind teilweise eng verknüpft und bedingen sich gegenseitig, die Unterteilung ermöglicht eine gute Strukturierung.

Die übergeordnete Forschungsfrage ist die Leitfrage des gesamten Versuchs:

- Welche Vorteile bietet eine Unterflur-Tropfbewässerung im Anbau von Bio-Pfefferminze in Bezug auf diverse Boden- und Pflanzenparameter?

Bodenparameter, die hier analysiert werden, sind der volumetrische (vol.) und gravimetrische (grav.) Wassergehalt (WG), der mineralische Stickstoffgehalt, N_{\min} , und der pflanzenverfügbare Phosphor, P_{CAL} :

- Unterscheiden sich die Gehalte der genannten Parameter durch den Einsatz einer Unterflur-Tropfbewässerung zwischen den beiden Varianten?

Neben der Bewässerung werden außerdem die Niederschlagsmengen sowie die potenziellen Verdunstungsraten als Einflussfaktoren auf den Bodenwassergehalt berücksichtigt:

- Wie hängen diese drei Parameter zusammen?

Auch das Wurzelbild wird analysiert:

- Wie wirkt sich die Unterflur-Tropfbewässerung auf das Wurzelbild aus?

An Pflanzenparametern werden einige genauer untersucht:

- Verläuft die Pflanzenentwicklung zwischen den beiden Varianten unterschiedlich?
- Besteht ein Unterschied in der Optik der frischen und trockenen Blätter zwischen der bewässerten und unbewässerten Variante?
- Gibt es Differenzen in den Erträgen der gesamten Frischmasse, der Trockenmasse der Blätter, Stängel und braunen Blätter?
- Unterscheiden sich die Pflanzeninhaltsstoffe wie Ölgehalt (Menthon und Menthol), Wasseraktivitätswert (aw-Wert)¹ und die Restfeuchte?
- Sind Unterschiede in Bezug auf die Mykotoxine, die Mikrobiologie, die Schwermetalle (Blei, Cadmium, Quecksilber) und den Aschegehalt zwischen den beiden Varianten festzuhalten?

¹ Der aw-Wert ist ein Maß für die Verfügbarkeit von Wasser in Lebensmitteln. Die sogenannte „Wasseraktivität“ kann zwischen 0 (= kein Wasser) und 1 (= reines Wasser) liegen. Die Verfügbarkeit ist davon abhängig, wie stark das Wasser im Lebensmittel gebunden ist. Locker gebundenes Wasser, also Werte nahe dem Faktor 1, bedingt das Wachstum von Mikroorganismen, wodurch Lebensmittel leichter verderben Frede 2010, S. 1151–1153.

Lediglich Tendenzen lassen sich im Rahmen dieser Arbeit auf der Frage der Profitabilität aussagen, weshalb die nachfolgende keine reguläre Forschungsfrage darstellt, jedoch interessehalber an dieser Stelle mitaufgenommen wird:

- Ist der Einsatz einer Unterflur-Tropfbewässerung lukrativ?

Die Beantwortung dieser Frage kann nur aus den wissenschaftlich erhobenen Ergebnissen hergeleitet werden. Grundsätzlich gilt, dass die Installation der Anlage sehr aufwändig und teuer ist, aber die Bewässerung selbst keinen großen Arbeitsaufwand erfordert, sofern entsprechendes Know-how vorhanden ist, wie eine richtige und bedarfsgerechte Bewässerung zu erfolgen hat. Davon kann viele Jahre profitiert werden. Um die Frage der Profitabilität zu beantworten, werden außerdem die Erfahrungen und Einschätzungen des Landwirtes herangezogen. Es werden keine Kalkulationen dafür vorgenommen.

Ebenso lediglich Tendenzen lassen sich auf folgende Frage aussagen, welche interessehalber an dieser Stelle mit aufgenommen wird:

- Wie wirkt sich eine erhöhte Wasserverfügbarkeit und damit eine erhöhte Produktion der Biomasse auf den Ölgehalt der Pflanzen aus?

1.4 Aufbau der Arbeit und verwendete Methodik

Im Anschluss an den Einleitungsteil bis hierhin folgen die Hypothesen, Kap. 2, welche durch den vorliegenden Versuch entweder bestätigt oder falsifiziert werden. Kapitel 3 enthält den Stand der Forschung, welcher anhand einer Literaturrecherche erarbeitet wurde. Im Material und Methodenteil, Kap. 4, werden der Versuchsaufbau, die praktische Durchführung und Bearbeitung der Proben sowie die statistische Auswertung beschrieben, woraufhin in Kapitel 5 die Ergebnisse präsentiert werden. Kapitel 6 enthält die Diskussion; hier werden interessante Verknüpfungen und Einflüsse der einzelnen Parameter untereinander vertieft. Daraufhin folgt das Fazit, Kap. 7, in dem die wichtigsten Resultate zusammengefasst werden, woraufhin im Ausblick, Kap. 8, auf weitere mögliche Forschungsfragen und Analysemöglichkeiten hingewiesen wird. Der Umfang dieser Arbeit ist auf die realistische Ausführung innerhalb einer Vegetationsperiode ausgelegt. Somit orientieren sich die Forschungsfragen und erhobenen Parameter an den Durchführungsmöglichkeiten, welche den Versuch auf den nun vorliegenden Umfang eingrenzen.

2 Hypothesen

Folgende Hypothesen gilt es im Rahmen dieser Arbeit zu prüfen. Diese sind in Anlehnung an die Forschungsfragen formuliert und äußern Annahmen über Zusammenhänge der erhobenen Parameter mit der Unterflur-Tropfbewässerung. Statistisch gesehen wird immer von der Nullhypothese ausgegangen, hier sind die Hypothesen als gerichtete Arbeitshypothesen formuliert:

- Der Bodenwassergehalt, volumetrisch und gravimetrisch, wird in der bewässerten Variante höher als in der unbewässerten sein.
- Der pflanzenverfügbare Phosphor wird in der bewässerten Variante höher als in der unbewässerten sein.
- Der mineralische Stickstoffgehalt, Ammonium- als auch Nitratstickstoff, wird in der bewässerten Variante höher als in der unbewässerten sein und mit jedem Schnitt sinken.
- Der Wurzelraum der bewässerten Variante wird tiefer und stärker ausgebildet sein als in der unbewässerten Variante.
- Die Pflanzen der bewässerten Variante werden größer und besser ausgewachsen sein sowie die Blätter schöner ausgeformt sein als in der unbewässerten.
- Der Ertrag, Frischmasse (FM) **als auch** Trockenmasse (TM) der bewässerten Variante wird höher ausfallen als der der unbewässerten Variante.
- Der Anteil der braunen Blätter wird in der bewässerten Variante geringer ausfallen als in der unbewässerten.
- Der Ölgehalt wird in der bewässerten Variante genauso hoch oder niedriger sein als in der unbewässerten.
- Der Restfeuchtegehalt sowie der aw-Wert werden in der bewässerten Variante höher sein als in der unbewässerten Variante.
- Der Aschegehalt wird in der bewässerten Variante höher sein als in der unbewässerten.

Die Klimadaten betreffend, welche sich aus dem Bodenwassergehalt, den Niederschlagsmengen und den Bewässerungsereignissen sowie der potenziellen Verdunstung zusammensetzen, wird von folgenden Zusammenhängen ausgegangen:

- Die klimatische Wasserbilanz wird von Anfang Mai bis Ende August negativ sein und ab September vermehrt positiv.
- Je höher der Niederschlag, umso höher der Bodenwassergehalt (*Obere* als auch *Untere Schicht*).

Folgende Hypothese wird sich nur vage beantworten lassen, da weitere Faktoren, welche in diesem Rahmen nicht erfasst wurden, wie z. B. die Temperatur, die Biomasse-Produktion beeinflussen:

- Ein hoher Niederschlag bedingt einen hohen Bodenwassergehalt, daraus erfolgt eine hohe Verdunstungsrate, was zu einer hohen Biomasse-Produktion (FM als auch TM) führt.

3 Stand der Forschung

3.1 Entstehung der Unterflur-Tropfbewässerung (UTB)

Die Entwicklung der Unterflur-Tropfbewässerung begann im Zusammenhang mit der Entstehung der oberflächlichen Tropfsysteme in den USA in den 1960ern (Camp 1998). Mit einer steigenden Verfügbarkeit von Plastik nach dem zweiten Weltkrieg war eine Produktion erster Schläuche aus Polyethylen (PE) oder Polyvinylchlorid (PVC) möglich (Camp 1998; Camp und Lamm 2003; Camp et al. 2000). Erste Versuche mit unterirdischen Bewässerungsschläuchen in den 1970ern in verschiedenen Kulturen (Zuckerrohr, Baumwolle, Zitrusfrüchten usw.) waren jedoch nicht erfolgreich. Die sogenannten Tropfer (Öffnungen, aus denen das Wasser austritt) verstopften leicht, die Wurzeln wuchsen in das Schlauchsystem ein, der Druck war sehr gering und die Wasserqualität und -filtration mangelhaft (Camp 1998). So verbreiteten sich die oberflächlichen Tropfsysteme zur Bewässerung weitaus schneller, da hier Verstopfungsprobleme ausblieben bzw. leichter behoben werden konnten (Camp et al. 2000).

Parallel dazu fand die Entwicklung unterirdischer Tropfsysteme in Israel statt. Hier wurde den Pflanzen direkt über das Bewässerungssystem zusätzlich Dünger hinzugefügt. Auch hier hemmten ähnliche Probleme eine sofortige Verbreitung des Systems (Camp 1998). Erst Ende der 1980er, als qualitativere Materialien zur Verfügung standen, begann die Investition in unterirdische Tropfsysteme (Camp 1998; Camp et al. 2000). Die unterirdischen Systeme konnten über mehrere Jahre eingesetzt werden, sodass sich die jährlichen Kosten reduzierten. In diesem Zusammenhang wurde die Bewässerungstechnik nicht mehr ausschließlich für hochwertige Kulturen wie Früchte oder Nüsse eingesetzt, sondern auch bei Kulturen von geringerer Wirtschaftlichkeit. Bis heute steigt die Bedeutung einer solchen Bewässerung und wird weltweit immer verbreiteter in verschiedensten Kulturen wie z. B. Spargel, Wein, Erdbeeren, Kartoffeln usw. eingesetzt. Verstopfungen werden durch die qualitativeren Materialien zum Großteil vorgebeugt und führen nur noch in Einzelfällen zu Problemen. Ein entsprechendes Management wie z. B. die Verwendung hoher Wasserqualitäten und starker Filtervermögen, verhindert Verstopfungen der Schläuche (Enciso-Medina et al. 2011).

3.2 Ursachen der Entstehung

Ursachen für die Entstehung der Unterflur-Tropfbewässerung liegen in der immer knapper werdenden, aber überlebenswichtigen Ressource Wasser, welche vor allem in trockenen Gebieten rar ist. Somit ist die Notwendigkeit hoch, das Wasser gezielt und effizient einzusetzen, wie z. B. in Israel. Durch den voranschreitenden Klimawandel gewinnt die Technik auch in Europa immer mehr an Relevanz, sodass die unterirdischen Bewässerungssysteme nun auch vermehrt in den gemäßigten Breiten eingesetzt werden.

3.3 Wasservorkommen, -verteilung und Bewässerung

Zwei Drittel der Erdoberfläche sind mit Wasser bedeckt; jedoch besteht der Großteil aus Salzwasser, zu 97,5 %. Der verbleibende Anteil von 2,5 % ist Süßwasser, wovon das meiste in den Gletschern als Eis oder Schnee gebunden ist oder als fossiles Grundwasser unerreichbar ist, sodass lediglich 0,3 % aus Seen, Flüssen, Böden für den Menschen verfügbar sind (Gerten 2018). Zusätzlich ist die Verteilung des verfügbaren Wassers sehr unterschiedlich, zum einen aufgrund der klimatisch bedingten Breiten, zum anderen durch jährlich zirkulierende Wetterereignisse. So bestehen regional große Differenzen in Bezug auf die Wasserversorgung (Gerten 2018), wie z. B. folgende Zahlen verdeutlichen. Weltweit werden von dem verfügbaren Süßwasser 69 % in der Landwirtschaft benötigt, knapp 19 % in der Industrie und gut 12 % in den privaten Haushalten (Weltaagrabericht.de). Auf Europa bezogen verschieben sich die Verhältnisse bereits, hier entfallen 44 % auf die Energieversorgung, 24 % auf die Landwirtschaft, 21 % auf die Haushalte und die restlichen 11 % auf die Industrie. In Österreich sieht diese Verteilung noch einmal anders aus: Hier werden 60 % in der Industrie verwendet, 35 % entfallen auf die Trinkwasserversorgung und 5 % werden in der Landwirtschaft eingesetzt (Pflanzenbau und Tierhaltung) (Lebensministerium 2010, S. 11). Von Österreichs Gesamtfläche werden rund 40 % landwirtschaftlich genutzt (Stand 2009), womit der landwirtschaftliche Sektor flächenmäßig der größte Sektor ist, wirtschaftlich gesehen mit 2 % Anteil am Bruttoinlandsprodukt (BIP) jedoch eine untergeordnete Rolle spielt. Ein Grund dafür ist, dass ein Großteil der Betriebe im Nebenerwerb geführt werden, knapp 70 % (Lebensministerium 2010). In Bezug auf die Wasserversorgung liegt Österreich klimatisch und hydrologisch unter günstigen Bedingungen, sodass bis jetzt im Vergleich zum Weltverbrauch eine vergleichsweise geringe Menge für die Landwirtschaft aufgewendet wird (Lebensministerium 2010). So kann der überwiegende Teil der pflanzlichen Produktion in Österreich den Wasserbedarf ohne Bewässerung decken. Der Anteil der bewässerten Fläche wird auf 2,3 % geschätzt (Stand 2013). Die meisten Betriebe setzen eine Sprinklerbewässerung ein (1.928), etwa halb so viele Betriebe (985) verwenden eine Tropfbewässerung und noch weniger häufig wird Oberflächenbewässerung (481 Betriebe) eingesetzt, Stand 2010 (WIFO 2014). Jedoch wird nicht deutlich, welcher Anteil der Tropfbewässerung auf die Unterflur-Tropfbewässerung entfällt, weder weltweit noch auf Österreich bezogen. Die UTB hat sich trotz vieler Vorteile, vgl. Kapitel 3.6, noch nicht etabliert; die Gründe dafür liegen in den Nachteilen des Systems, vgl. diese im gleichen Kapitel (Martínez und Reca 2014). Dennoch ist aufgrund des voranschreitenden Klimawandels und des somit steigenden Bedarfs an Bewässerung davon auszugehen, dass die unterirdischen Bewässerungssysteme an Bedeutung gewinnen und auch in Europa vermehrt eingesetzt werden. Aufgrund dieser Tatsachen und, weil die Datengrundlage noch vergleichsweise gering ist, vor allem im Blattkräuteranbau, steht in dieser Arbeit bewusst die Unterflur-Tropfbewässerung im Fokus.

3.4 Klimadaten

Grundsätzlich sind für die Erstellung komplexer Klimamodelle viele einzelne Parameter relevant. Je mehr Daten gemessen werden, umso genauer lassen sich Szenarien berechnen. Diese ermöglichen es, kausale Beziehungen zwischen den Parametern aufzuzeigen und gegenseitige Abhängigkeiten für die Zukunft zu modellieren. Stark vereinfacht kann eine klimatische Wasserbilanz durch die Differenz zwischen dem Niederschlag und der potenziellen (pot.) Verdunstung wiedergegeben werden:

Klimatische Wasserbilanz = Niederschlag – pot. Verdunstung

Weitere Zu- und Abflüsse wie die Versickerung können im Sommerhalbjahr, abgesehen von Einzelereignissen mit hohen Niederschlagswerten, vernachlässigt werden, da hier normalerweise kaum Versickerungen stattfinden. So kann die Näherung oben angewendet werden. Ziel der klimatischen Wasserbilanz ist es Wasserüberschuss- bzw. Defizitperioden zu ermitteln (Dunger 2017, S. 60). Letztere können dann per Bewässerung an den aktuellen Bedarf der Kultur angeglichen werden.

Generell ist von folgender Beziehung auszugehen: sind die Niederschlagsmengen höher als die Verdunstung, herrscht ein feuchtes Klima und die klimatische Wasserbilanz ist positiv. Liegt die Verdunstungsrate über dem Niederschlag, sind trockene Bedingungen vorzufinden, die Wasserbilanz ist negativ. Einen wesentlichen Einfluss auf die Verdunstung hat die Temperatur, welche in diesem Rahmen jedoch nicht erfasst wurde. Die Temperatur und Verdunstung korrelieren grundsätzlich positiv miteinander, sodass eine hohe Temperatur eine hohe Verdunstungsrate bedingt.

Abgrenzung: Evaporation – Transpiration – Evapotranspiration

In der Meteorologie wird zwischen Evaporation, Transpiration und Evapotranspiration unterschieden. Synonym dafür ist die Verdunstung. Diese beschreibt die Umwandlung von Wasser (flüssig) in Wasserdampf (gasförmig). Hier wird zwischen der aktuellen und potenziellen Verdunstung differenziert.

Evaporation bezeichnet die Verdunstung freier Wasser- oder Bodenoberflächen. Diese können entweder bewachsen oder ohne Vegetation sein, ausschlaggebendes Kriterium dafür ist, dass KEINE biotischen Prozesse stattfinden. Die Evaporation basiert auf der Wirkung physikalischer Gesetze (Dunger 2017, S. 46). Angetrieben wird dieser Vorgang von der Energiestrahlung der Sonne. Verdunstungsverluste an der Bodenoberfläche werden durch Wasser aus der flüssigen Phase ausgeglichen (Blume et al. 2010, S. 240–241).

Transpiration steht für die Verdunstung von Wasser durch biotische Vorgänge wie z. B. durch die aktive Regulation mittels Spaltöffnungen und wird daher den Pflanzen zugeordnet.

Beide Prozesse gemeinsam werden unter dem Begriff der **Evapotranspiration** zusammengefasst, da die Prozesse einzeln nur schwer gemessen werden können. Es wird die maximal mögliche Evapotranspiration bei gesättigtem Boden beschrieben. Der Wert steht in Abhängigkeit der Kultur und deren Wasserbedarf, der meteorologischen Faktoren, des pflanzenverfügbaren Wassers im Wurzelraum und der Nachlieferung aus dem Grundwasser (Böhm 2001, S. 1; Dunger 2017, S. 46; Blume et al. 2010, S. 386).

Die **aktuelle Evapotranspiration** bezeichnet die Wassermenge, die tatsächlich in einem bestimmten Zeitintervall durch Verdunstung von einer Fläche in die Atmosphäre entweicht. Diese wird von der Pflanzenart und -entwicklung sowie den Boden- und Bewuchsbedingungen und damit auch vom Bodenwassergehalt, bzw. der nutzbaren Feldkapazität beeinflusst.

Die **potenzielle Evapotranspiration** beschreibt eine maximale Wassermenge, die unter bestimmten klimatischen Bedingungen von einer Fläche mit optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung, bewachsen oder unbewachsen, in einem bestimmten Zeitraum in die Atmosphäre verdunsten kann. Die pot. Evapotranspiration ist von den meteorologischen Größen Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Solarstrahlung abhängig. So hat letztere immer einen höheren Wert als die aktuelle Evapotranspiration (Böhm 2001, S. 1; Dunger 2017, S. 47; Schiff 1975, S. 332).

3.5 Das System UTB

Eine Unterflur-Tropfbewässerung besteht aus einem Schlauch, der unter Erde liegt. Zu unterscheiden sind die harten / steifen Schläuche, welche sehr robust, aber auch unbeweglicher sind, die flexiblen Schläuche, welche dünnwandiger sind und sich im leeren Zustand verformen sowie die porösen Schläuche, auch Perlschläuche genannt, bei denen das Wasser wie durch eine semi-permeable Membran in den Boden tropft. In den Tropfschläuchen befinden sich in bestimmten Abständen Öffnungen, die sogenannten Tropfer, aus denen das Wasser austritt. Außerdem ist die Pumpe essenzieller Bestandteil des Systems, um das Wasser in die unterirdischen Schläuche zu befördern. Die Schläuche liegen unterschiedlich tief, jeweils in Abhängigkeit der angebauten Kultur, dem Bodenmanagement und der Bodenverhältnisse. So liegt eine unterirdische Tropfbewässerung z. B. bei Rasen nur wenige cm tief, 5-8 cm, während im Wein- oder Spargelanbau die Schläuche in einer Tiefe von bis zu 2 m verlegt werden können. In dem vorliegenden Versuch liegen die Schläuche in einer Tiefe von 27 cm. Die Abstände der Tropfer in dem Schlauch variieren zwischen 10 und 75 cm, wobei Abstände zwischen 30 und 60 cm üblich sind (Lamm und Rogers 2015). Hier beträgt der Abstand der Tropfer 50 cm. Darüber hinaus gibt es verschiedene Arten, wie die Tropfer in dem Schlauch installiert sind. Diese können entweder auf den Schlauch aufgesetzt werden oder direkt in die Schlauchwand integriert werden, wobei letztere Variante die langlebigere ist. Die Qualität der Tropfer ist entscheidend für den Wurzeleinwuchs. Um das zu verhindern, gibt es an jeder Tropfstelle eine Vorkammer, die der Wurzel die Orientierung nimmt und somit weiteres Eindringen in den Schlauch verhindert. Alternativ dazu kann eine Kupferbeschichtung am Eingang jedes Tropfers für eine wurzelabtötende Wirkung sorgen; allerdings lässt der Effekt mit der Zeit nach, da sich die Kupferbeschichtung durch Korrosion langsam zersetzt. Die im Versuch eingesetzten Tropfer sind in den Schlauch integriert. Insgesamt führen hier drei Kanäle Labyrinth förmig zum Tropfer. Deren Innenwände sind mit Lamellen ausgestattet, welche vibrieren, sobald Wasser durchfließt. Dadurch werden Ablagerungen im Inneren des Schlauches verhindert. Zusätzlich ergänzen sich die drei Kanäle im Inneren des Schlauches, verstopft einer, öffnet sich der nächste, sodass das Wasser über den Tropfer in den Boden

entweichen kann. Erst wenn alle drei Kanäle verstopft sind, muss das Schlauchstück ausgegraben und ersetzt werden. Davon abgesehen nimmt ein ausreichend feuchter Boden die Notwendigkeit für die Wurzel, in die Tropfstellen einzuwachsen. Auch das Schlauchmaterial sowie die Wandstärke sind entscheidend für die Lebensdauer des Systems. Schläuche bestehen aus widerstandsfähigem Kunststoff wie Polyvinylchlorid (PVC) oder Polyethylen (PE), am Übergang zur Pumpe sind diese mit Stahl versetzt (Netafim, S. 20). Die Wandstärke der Schläuche variiert zwischen 0,15-0,50 mm (Nolz 2007, S. 28). Unterschieden wird zwischen den dünn- (0,15-0,30 mm) und dickwandigen (0,38-0,50 mm) Schläuchen. Beide Systeme sind flexibel, jedoch ist die Wandstärke des Systems entscheidend für dessen Lebensdauer (Nolz 2007, S. 28; Camp und Lamm 2003, S. 562); die dünnwandigen eignen sich für 1-3 Saisons, die dickwandigen für 4-9 Anbaujahre (Netafim, S. 34). Darüber hinaus gibt es Schläuche mit einer Wandstärke von über 1-1,5 mm, welche ihre steife Form beibehalten und für mehr als 10 Jahre im Boden verbleiben können. Im vorliegenden Versuch besteht der Schlauch aus PE und hat eine Wandstärke von 1 mm, es ist also ein langlebiges System, das bis zu 20-30 Jahren im Boden verweilen kann (Prognose). Die Schlauchdurchmesser variieren zwischen 12-35 mm (Innendurchmesser) (Netafim, S. 35), hier wird ein Schlauch mit einem Durchmesser von 16 mm verwendet. Die Durchflussmenge variiert zwischen weniger als einem Liter pro Stunde (Lamm und Rogers 2015) bis zu vier Litern pro Stunde (Arbat et al. 2020, S. 2; Gil et al. 2008, S. 451). Höhere Ausflussraten bieten sich an, um Verstopfungen entgegenzuwirken, jedoch erfordern diese auch einen höheren Arbeitsdruck und der Boden muss die Wassermengen aufnehmen können. Ausflussraten von bis zu 25 l h^{-1} sind in der Literatur zu finden, jedoch können solche Mengen nur über eine kurze Distanz, bis zu 30 m, im Boden verteilt werden, womit solche Exemplare für eine Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen ausgenommen sind (Reinders et al. 2012, S. 5; Gil et al. 2011, S. 287). Im vorliegenden Versuch wird mit 9 l m^{-2} bewässert. Der Arbeitsdruck kann zwischen 0,1-1,5 bar liegen und ist damit geringer als der der oberirdischen Tropfsysteme, bei diesen sind bis zu 4,0 bar möglich. Die Wasserzuleitung erfolgt im Normalfall mit höheren Drücken, sodass eine Druckregulierung erforderlich ist (Nolz 2007, S. 26). In der Versuchsanlage wird das Wasser mit einem Druck von 2 bar von der Pumpe in den Filter geleitet, welcher das Wasser reinigt, sodass Verstopfungen vorgebeugt werden. Darauf wird das Wasser auf einen Druck von 0,5 bar reduziert. Weiterhin können die qualitativeren Schläuche über eine bewegliche Membran den Druck zwischen innen und außen kompensieren, sodass über die gesamte Länge des Schlauches eine gleiche Menge an Wasser austreten kann. Andernfalls fällt der Druck mit zunehmender Länge des Schlauches, sodass ein gleichmäßiger Bewässerungseffekt ausbleiben würde. Der Labyrinth förmige Gang in der Tropfern sorgt auch für einen Druckabbau, damit das Wasser möglichst ohne Druck über die Tropfer in die Erde austritt (Reinders et al. 2012, S. 11). Turbulente Strömungen verhindern Ablagerungen im Inneren des Schlauches. Auch wenn der Markt hier noch jung ist, gibt es dennoch viele unterschiedliche Systeme, Qualitäten und Bestandteile der Unterflur-Tropfbewässerung, welche sich in Abhängigkeit des Standortes sowie der Kultur etablieren.

3.6 Vor- und Nachteile der UTB

Die Unterflur-Tropfbewässerung bringt viele **Vorteile** mit sich: Unter den verschiedenen, auf dem Markt erhältlichen Bewässerungssystemen verfügt diese über die höchste Wassernutzungseffizienz (WNE). Es bedeutet, dass im Verhältnis zur produzierten Masse bei dieser Technik am wenigsten Wasser eingesetzt wird. Gegenüber der Oberflächentropfbewässerung kann bis zu 20 % des Gießwassers eingespart werden (Badr et al. 2010, S. 63), gegenüber der herkömmlichen Bewässerung sogar über 50 % des Gießwassers (Wurm 2012, S. 30). Damit verbunden sind Ertragssteigerungen von z. B. bis zu 25 % bei Aubergine im Vergleich zur oberflächlichen Tropfbewässerung bei gleichzeitiger Wassereinsparung (Planner 2015, S. 15). Das Wasser wird direkt in den Wurzelraum der Pflanze transportiert, dadurch entstehen kaum Verluste über normalerweise stattfindende Evapotranspirationsraten (Wurm 2012, S. 31). Es ist dort verfügbar, wo es die Pflanze direkt aufnehmen kann. Gefördert wird auch die Wasserverteilung im Boden. Durch die Kapillarkräfte wird das Wasser nicht nur nach oben befördert, sondern auch horizontal im Boden verteilt, was zu einer gleichmäßigen Durchfeuchtung führt. Dazu wird eine oberflächennahe Bodenversalzung verringert. Außerdem bleibt die Oberfläche trocken, sodass Unkräuter während der Trockenperioden lediglich erschwert an der Oberfläche keimen können. Auch das Milieu für Krankheitserreger und Schädlinge wird nicht gefördert, wodurch das Risiko eines Befalls gesenkt wird. Darüber hinaus verschlämmt und verkrustet die Erdoberfläche nicht, sodass das Risiko der Bodenerosion stark reduziert ist (Nolz 2007, S. 24). So sind die Flächen gut befahrbar und per minimaler Bodenbearbeitung bearbeitbar (Planner 2015). Die Bewässerungsschläuche liegen meist tiefer im Boden, wodurch das Wurzelwachstum nach unten gefördert wird sowie eine Aufnahme der tiefer im Boden gelegenen Nährstoffe. Ein kräftiges Wurzelwachstum trägt zur Stabilisierung der Pflanze und damit zur Ertragssteigerung bei (Wurm 2012, S. 31). Nachdem die Schläuche im Boden verlegt sind, können Arbeitsstunden für das saisonale Auf- und Abbauen von Beregnungsanlagen gespart werden, sofern ein langlebiges, qualitativ hochwertiges System eingesetzt wird. Dieses kann 20-30 Jahre perfekt funktionieren, wenn mit einer hohen Wasserqualität gearbeitet wird und das Management einer solchen Anlage standortangepasst und situationsbedingt erfolgt (Enciso-Medina et al. 2011; Lamm und Rogers 2017). Zusätzlich zur Bewässerung kann gleichzeitig Dünger in das System eingespeist werden (Wurm 2012, S. 31). Flüssigdünger gibt es auch im Biolandbau, sodass die Unterflur-Tropfbewässerung auch hier einen weiteren Vorteil bietet. Produziert man nach den Richtlinien bestimmter Bio-Verbände, können bestimmte Produkte untersagt sein.

Der größte **Nachteil** der Unterflur-Tropfbewässerung liegt in den hohen Investitionskosten eines solchen qualitativen Systems. Eine hohe Qualität ist ausschlaggebend für die Langlebigkeit dieser Systeme und mit einem entsprechenden Preis verbunden (Nolz 2007, S. 26), welcher einen entscheidenden Hinderungsgrund für Landwirte darstellt, Unterflur-Systeme einzusetzen. Des Weiteren ist viel Know-how erforderlich, um die Bewässerung bedarfsgerecht zu steuern. Dafür sind gute Bodenkenntnisse notwendig und die Ansprüche der Kultur müssen bekannt sein; ständiges Beobachten ist unumgänglich und einwirkende Wetterereignisse müssen beachtet werden. Herausfordernd ist, dass Fehl-Effekte nicht sofort

sichtbar sind, sei es eine Überbewässerung, welche zu Sauerstoffmangel im Boden führt, ein Leck, sodass vermehrt Wasser aus dem Schlauch austritt und das Wasser an der Oberfläche zu stehen beginnt oder eine Verstopfung. Letztere wird erst deutlich, wenn einzelne Pflanzen weniger gut aufwachsen als ihre Nachbarn oder gar vertrocknen. Treten solche Fehler auf, muss der Teil des Schlauches ausgegraben und ersetzt werden (Nolz 2007, S. 25; Planner 2015, S. 6–7). Da solche Probleme oft erst spät festgestellt werden können und nur mit viel Aufwand zu beheben sind, lohnen sich die hochqualitativen Systeme, da das Material hier robuster ist. Nicht zuletzt können Nagetiere wie Wühlmäuse Schäden verursachen. Im Idealfall verweilen die Bewässerungsschläuche mehrere Jahre im Boden, sodass lediglich eine minimale Bodenbearbeitung möglich ist und die Fruchtfolge für die nächsten Jahre gut im Voraus geplant werden sollte (Planner 2015, S. 6).

Generell fördern weniger tief verlegte Schläuche vor allem das Anwachsen junger Pflanzen, da die Wurzeln das Wasser schneller erreichen. In regenreichen Jahren haben die Pflanzen keinen Grund in die Tiefe zu wachsen, weil durch den Regen ausreichend Wasser in den oberen Schichten verfügbar ist. In solchen Fällen kann man mit flach verlegten Schläuchen (15 cm tief) besser auf kurze Trockenperioden reagieren und den Pflanzen Trockenstress ersparen. Letzteres System ist kostengünstiger, hat aber nur eine Lebensdauer von ca. 3 Jahren (Rossnagl 2020).

3.7 Einfluss der Bodenart auf Wasserspannung und -bewegung

Der Boden besteht in der Regel aus einem Drei-Phasen-System, dem festen Anteil (mineralische und organische Substanz), dem flüssigen (Bodenwasser) und dem gasförmigen Teil (Bodenluft); bezeichnet wird die Einheit dieser drei Komponenten auch als die Bodenstruktur (Blume et al. 2010). Zwischen den drei Phasen finden viele chemische und physikalische Wechselwirkungen statt, wobei nachfolgend hauptsächlich auf den Einfluss der festen Substanz auf das Bodenwasser eingegangen wird.

Korngrößen und Porenräume

Die feste Substanz, die Bodenmatrix, besteht aus verschiedenen Korngrößen. Diese werden nach Atterberg zunächst in den Grobboden, Äquivalentdurchmesser > 2 mm, und den Feinboden, < 2 mm, eingeteilt. Letzterer setzt sich aus Sand (2 mm – 63 μm), Schluff (63 μm – 2 μm) und Ton (2 μm – 0 μm) zusammen und bestimmt die Bodenart, abhängig davon, wie hoch der Anteil der einzelnen Korngrößen ist (Blume et al. 2010, S. 173). Je mehr kleine Körner sich im Boden befinden, desto höher ist die spezifische Oberfläche, wodurch ein erhöhter Anteil an Wasser im Boden gebunden werden kann (Achtung Wasserverfügbarkeit s. u.).

Die Korngrößen bedingen die Porenräume. Die sogenannten Primärporen, welche in Abhängigkeit der Körnung entstehen, unterteilen sich in Fein-, Mittel- und Grobporen. Jede Fraktion bedient eine andere Funktion im Boden: Die Feinporen, Durchmesser $< 0,2$ μm , enthalten Wasser, das nicht pflanzenverfügbar ist, weil es zu stark im Boden gebunden ist. Die Mittelporen, Durchmesser $0,2$ - 50 μm , enthalten pflanzenverfügbares Wasser und die Grobporen, mit einem Durchmesser von > 50 μm , sind für den Luftaustausch zuständig. Die

Sekundärporen sind noch größer, sie entstehen durch Wurzeln, Tiere oder Schrumpfungsrisse. Dadurch sind diese instabiler, aber ihre Kontinuität ist von Bedeutung für den Wasser- und Lufthaushalt (Blume et al. 2010, S. 181).

Bindungsformen des Bodenwassers

Das Bodenwasser entsteht über Niederschläge, aus dem Grundwasser und minimal aus der Kondensation der Atmosphäre. Sind alle Poren mit Wasser gefüllt, ist der Boden wassergesättigt. Befindet sich zusätzlich oder ausschließlich Luft in den Poren, liegt ein ungesättigter Zustand vor. Sind die Niederschläge höher als der Boden die Wassermengen aufnehmen kann, führt das zum Oberflächenabfluss. Dieser steht in Abhängigkeit des Neigungswinkels der Fläche, der Niederschlagsmengen, des Bodendeckungsgrades und der Aufnahmekapazität des Bodens und kann zu erheblichen Erosionsschäden führen (Blume et al. 2010, S. 220). Die Beschaffenheit der Bodenoberfläche bestimmt die Infiltration. Zerstörte Aggregate, Verschlammung oder Krustenbildung beschränken diese. Das Ausmaß an Vegetation, ein hoher Humusanteil sowie stabile Bodenaggregate begünstigen die Infiltration. Das Wasser, das in den Boden gelangt, ist dort in verschiedenen Formen verfügbar. Unterschieden wird zwischen dem Sickerwasser und Haftwasser. Das Sickerwasser wird nicht im Boden gehalten und fließt aufgrund der Schwerkraft über die Makroporen direkt ins Grundwasser. Grundwasser gibt es das ganze Jahr über, während das Stauwasser nur saisonal auftritt, z. B. nach heftigen Niederschlägen. Das Wasser ist jeweils frei verfügbar und nicht an die Bodenmatrix gebunden. Das Haftwasser verbleibt gegen die Schwerkraft im Boden und unterteilt sich in Kapillar-, Adsorptions- und Kristallwasser, wobei letzteres nicht als Bodenwasser gewertet wird, da es nur bei höheren Temperaturen entfernt werden kann. Das Adsorptionswasser umhüllt die feste Oberfläche der Teilchen im Boden, es wirken die Anziehungskräfte zwischen der Festsubstanz und den Wassermolekülen wie die Van-der-Waals-Kräfte, die H-Bindungen zwischen den Sauerstoffatomen der festen Oberfläche und den Wassermolekülen sowie die Kräfte des elektrostatischen Feldes (Blume et al. 2010, S. 221). Das Adsorptionswasser in den Feinporen ist nicht pflanzenverfügbar, jenes in den Mittelporen dagegen schon. Das Kapillarwasser wird durch Kohäsionskräfte (Wasserstoffbrücken zwischen den Wassermolekülen) im Boden gehalten. Es befindet sich in den Mittelporen und ist damit pflanzenverfügbar (Blume et al. 2010, S. 222).

Von der Menge des Bodenwassergehaltes ist somit abhängig, ob sich mehr kapillare oder adsorptive Kräfte ausbilden. Je höher der Bodenwassergehalt, umso mehr kapillare Bindungen entstehen; wird der Bodenwassergehalt geringer, dominieren die adsorptiven Kräfte.

Wasserbewegung

Das Wasser im Boden ist immer in Bewegung, ob gesättigt oder ungesättigt. Ausschlaggebend dafür sind die unterschiedlichen Potenziale, welche durch Evaporation, Wasseraufnahme der Pflanzenwurzeln, Niederschlag, Versickerung oder den kapillaren Aufstieg verursacht werden. Es sind die Größen des Wasserhaushaltes. Die Wasserbewegung und Wasserspannung wird maßgeblich durch das Matrixpotential beeinflusst. Dieses steht wiederum in Abhängigkeit der verfügbaren Wassermenge. Es wird umso stärker, je weniger Wasser im Boden vorhanden

ist; es hält das Wasser im Boden fest, wodurch die Wasserspannung steigt. Auch das Osmotische und Hydraulische Potenzial beeinflussen die Wasserbewegung. Ersteres wird durch die Pflanzenwurzeln gesteuert, wenn diese das Wasser durch ihre semipermeable Membran der Bodenlösung entziehen, um es aufzunehmen. Das Hydraulische Potenzial steht für die Energie, die aufgewendet werden muss, um Wasser von einer Stelle zur anderen zu bewegen. Grundsätzlich bewegt sich das Wasser immer vom höheren zum niedrigeren Potenzial, um die Differenzen ausgleichen, bis das Gesamtpotenzial gleich ist. Der Verlauf ist von der Höhe des Potenzialgefälles sowie der Wasserleitfähigkeit des Bodens abhängig. Letzteres hängt mit der Porengrößenverteilung zusammen. Das Gravitationspotenzial steht ebenfalls im Zusammenhang mit der Wasserbewegung. Es beschreibt die Kraft, die aufgewendet werden muss, um das Wasser gegen die Schwerkraft auf eine bestimmte Höhe anzuheben. Die Bezugshöhe ist meistens 0, sodass das Gravitationspotenzial ein positives Vorzeichen hat (Blume et al. 2010, S. 224). Das Hydraulische Potenzial ist im Gleichgewicht, wenn sich das Matrix- und Gravitationspotenzial ausgleichen. Ist dieses der Fall, bewegt sich das Wasser im Boden nicht. Verdunstet Bodenwasser oder nehmen die Pflanzen Wasser auf, wird das Matrixpotenzial negativer; die Wasserspannung steigt, um das weniger werdende Wasser im Boden zu halten. Außerdem findet ein kapillarer Aufstieg statt, um Wasser aus dem Grund-, Stau- oder Haftwasser nach oben zu befördern. Der kapillare Aufstieg ist umso stärker, je kleiner der Porendurchmesser ist, ausgenommen der Feinporen, in diesen ist das Wasser zu stark gebunden (s. o. Adsorptionskräfte in den Feinporen). In kleinen Poren ist der Krümmungseffekt der Menisken stärker als in großen Poren, wodurch das Wasser nach oben gezogen wird. Umgekehrt ist es der Fall bei Niederschlägen. Hier steigt das Matrixpotenzial, also nimmt einen weniger negativen Wert ein und das Wasser fließt bei gleichbleibendem Gravitationspotenzial nach unten. In beiden Fällen bleibt das Gravitationspotenzial gleich, wenn die Grundwasseroberfläche (GWO), die Bezugsfläche, sich nicht ändert (Blume et al. 2010, S. 226).

Die unterschiedlichen Potenziale bedingen die Bewegung des Bodenwassers, hängen aber von der vorhandenen Wassermenge im Boden und der Bodenart, sprich der Korngrößenverteilung und den dadurch entstehenden Porenraum, ab. Die Kontinuität und Form der Poren ist für eine gute Wasserverteilung im Boden verantwortlich. Ist diese z. B. durch Verdichtung gestört, hat das Auswirkungen auf die Wasseraufnahme- sowie Wasserleitfähigkeit im Boden. Besonders in den Sekundärporen ist die Wasserleitfähigkeit sehr effektiv, es ist der sogenannte Makroporenfluss. Allerdings besteht hier die Gefahr, dass aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Makroporen und eines laminaren Flusses in den Primärporen das neue Wasser an den engeren Poren vorbeifließt, sodass eine Vermischung nur eingeschränkt stattfinden kann, welche jedoch für das Verlagerungs- und Transportgeschehen relevant ist.

Ist die Wasserleitfähigkeit des Bodens gering, bedeutet dieses ein erschwertes Wachstum für die Pflanzen, die Wurzeln müssen dem Wasser nachwachsen, da die Pflanzen das potenziell verfügbare Wasser nicht nutzen können.

Wasserverfügbarkeit

Die Verfügbarkeit des Wassers für die Pflanzen hängt von der Wasserspannung im Boden ab, dem Matrixpotenzial, siehe oben. Dargestellt wird die Wasserverfügbarkeit mittels einer pF-Kurve, welche die Wasserspannung in Abhängigkeit der jeweiligen Bodenart bzw. Korngrößenverteilung verdeutlicht. Anhand dessen kann abgelesen werden, wie viel Kraft die Pflanzen aufwenden müssen, um dem Boden das Wasser zu entziehen. Der pflanzenverfügbare Bereich liegt zwischen den pF-Werten 1,8 bis 4,2; das entspricht einem Druck von -60 bis $-10^{4,2}$ hPa oder cmWS (Blume et al. 2010, S. 228). Bei einer Spannung unterhalb von pF-Wert 1,8 kann das Wasser nicht im Boden gehalten werden, es sickert ins Grundwasser. Die Poren, die das Wasser aufgrund der fehlenden Spannung nicht im Boden halten können, sind für die Belüftung des Bodens zuständig. Oberhalb von pF-Wert 4,2 ist das Wasser so stark im Boden gebunden, dass es nicht mehr pflanzenverfügbar ist. Dieser Punkt wird auch als permanenter Welkepunkt bezeichnet und das Wasser, das mit einer höheren Spannung im Boden gebunden ist als Totwasser.

3.7.1 Wasserverteilung im Boden mittels UTB

Mittels einer Unterflur-Tropfbewässerung wird das Wasser direkt in den Boden befördert. Wie es sich dort verbreitet, hängt zum einen von der Tiefe der verlegten Schläuche ab sowie deren Abstände zueinander, vielmehr aber von den Abständen der Tropfer, der Ausflussrate sowie der Häufigkeit der Bewässerungsintervalle und dem Druck, mit dem das Wasser in den Boden befördert wird. Zum anderen hängt die Wasserverteilung von der Bodenart und der Durchwurzelung ab. Grundsätzlich sickert das Wasser über die Schwerkraft vertikal nach unten und verbreitet sich über die kapillaren Kräfte horizontal und aufsteigend im Boden. Bei sandigen Böden ist die Wasserbewegung nach unten größer als die horizontale, das Wasser verteilt sich in Form einer Ellipse im Boden. Das meiste Wasser konzentriert sich um den Schlauch herum, je weiter es sich im Boden verteilt, umso geringer wird die Menge. Der größere Anteil bewegt sich in sandigen Böden nach unten. In schluffigen Böden ist der Abwärtstrend nicht so stark, das Wasser verbreitet sich eher im gleichen Radius in alle Richtungen, wobei auch hier die meiste Menge in der Nähe des Schlauches verbleibt und mit zunehmender Entfernung abnimmt (Bajpai und Kaushal 2020; Badr et al. 2010, S. 66).

Von der Tiefe des verlegten Schlauches und der Bodenart ist abhängig, wie weit das Wasser über die Kapillarkräfte nach oben gezogen wird. Ausschlaggebend für die Verlegtiefe der Schläuche ist neben der Wasserleitfähigkeit des Bodens das Durchwurzelungsvermögen der Kulturpflanzen, wobei sich eine Tiefe von 30 cm in vielen Fällen bewährt, da die meisten Kulturen hier ihre aktive Wurzelzone ausbilden (Bajpai und Kaushal 2020).

Je höher das Bewässerungsintervall, je stärker die Ausflussrate und je geringer die Abstände der Tropfer, umso mehr wird eine horizontale Verbreitung gefördert, wodurch ein durchfeuchteter Horizont gebildet wird. Effektiver für die Durchfeuchtung des Bodens sind Tropfer in Abständen von 30 cm anstatt von 50 cm oder mehr (Bajpai und Kaushal 2020).

Andere Studien zeigen, dass sich eine Unterflur-Tropfbewässerung positiver auf eine verringerte Evaporation sowie ein vergrößertes feuchtes Bodenvolumen auswirkt, als dass sie

die Pflanzen fördert in die Tiefe zu wachsen (Badr et al. 2010, S. 67). Dieses steht jedoch nicht im Widerspruch zueinander, sondern stellt zusätzlich positive Effekte dar.

3.7.2 Verfügbarkeit der Nährstoffe in der Bodenlösung, P_{CAL} und N_{min}

Neben der Verfügbarkeit von Wasser, Sauerstoff und Kohlenstoff für die Fotosynthese benötigen die Pflanzen ebenso Nährstoffe wie Stickstoff, Phosphor, Kalium u. v. m., welche unentbehrlich für das Wachstum der Pflanzen sind. Der Fokus liegt nachfolgend auf den pflanzenverfügbaren Formen des Stickstoffs und Phosphors, namens mineralischer Stickstoff, N_{min} , und pflanzenverfügbarer Phosphor, P_{CAL} , welche auf ihr Vorkommen im Rahmen dieser Arbeit analysiert werden. N_{min} liegt in Form von Nitratstickstoff, NO_3^- , und Ammoniumstickstoff, NH_4^+ , vor. Letzterer ist im Boden adsorbiert und somit vor Auswaschung geschützt. Der größte Teil des Ammoniums wird über die Nitrifikation zu Nitrat umgewandelt, was bei höheren Bodentemperaturen recht schnell passiert. Außerdem ist der Ammoniumgehalt pH-Wert abhängig, Proben mit einem pH-Wert von über 6 enthalten kaum Ammonium, da dieses schon zu Nitrat umgewandelt wurde. Nitrat ist leicht löslich und damit auch auswaschbar (Blume et al. 2010, S. 404–405). Der mineralische Stickstoffgehalt kann gut bestimmt werden, schwankt aber leicht innerhalb von kurzer Zeit durch Veränderungen in der Temperatur und Feuchtigkeit sowie durch Aufnahme über die Pflanzen, Auswaschungsverluste oder Immobilisierungsprozesse. Daher sind Untersuchungen nur zu genau definierten Zeitpunkten sinnvoll (Baumgarten 2017, S. 19). P_{CAL} liegt als Dihydrogenphosphat, $H_2PO_4^-$, oder Hydrogenphosphat, HPO_4^{2-} , im Boden vor und kann von den Pflanzen nur in gelöster Form aus der Bodenlösung aufgenommen werden. Die Phosphor-Nachlieferung ist stark pH-Wert abhängig und erfolgt bei einem pH-Wert zwischen 6,5 und 7,5 (Unterfrauner 2013). Bei höheren pH-Werten kommt es zur Phosphatfestlegung, bei geringeren zur Bildung von Aluminium- und Eisenphosphaten. Richtwerte für angestrebte Phosphormengen im Boden geben die Gehaltsklassen A-E an. Klasse C beschreibt eine auszureichende Nährstoffversorgung mit 47-111 mg P pro 1000 g Boden (Baumgarten 2017, S. 21). Die VDLUFA (Verband deutscher landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten e. V.) definiert die anzustrebende Klasse C mit 30-60 mg P pro 1000 g Boden und erweitert diese auf 75 g P pro 1000 g Boden in sehr trockenen Gebieten (< ~550 mm). Für den Ökolandbau wird aufgrund geringerer Ertragsmengen die niedrigere Klasse B empfohlen (Holsten et al. 2016, S. 12–14).

Die Nährstoffe stammen entweder aus dem Ausgangsgestein der Böden, dann sind sie nativ, oder sie werden über Düngemittel hinzugefügt. Manchmal entstammen sie auch der Atmosphäre oder dem Grundwasser, wenn die GWO hoch genug ist.

Werden die Nährstoffe mobilisiert, gelangen diese über die Bodenlösung zur Pflanze. Der Massenfluss wird durch die Transpiration der Pflanze ausgelöst, die Wurzelzone verarmt an Wasser und es entsteht ein Gradient. Die Transportrate hängt von der Konzentration in der Bodenlösung und Wasserflussrate ab. Letztere wird durch die Transpiration, den Wassergehalt, die Anzahl, Größe und Form der Bodenporen und somit von der Körnung und dem Bodengefüge bestimmt (Blume et al. 2010, S. 397). Ist der Bodenwassergehalt gering,

sind die Transportwege länger, da die Wasserfilme um die Bodenpartikel herum dünner sind und die elektrostatische Wechselwirkung zwischen den Ionen der Lösungs- und Festphase zunimmt. Somit kann eine Unterflur-Tropfbewässerung nicht nur entscheidend für die Wasserversorgung der Pflanze, sondern ebenso für die Nährstoffversorgung der Pflanze sein.

3.8 Die Pfefferminze

Die Pfefferminze, *Mentha x piperita* L., stammt aus der Familie der Lippenblütler, *Lamiaceae*. Die Kultur ist mehrjährig und frostunempfindlich, über den Winter sterben die oberirdischen Pflanzenteile ab und treiben im Frühjahr neu aus. Die Stolonen entspringen einer holzigen Grundachse und wurzeln überwiegend flach unter der Erde, sie sind für die vegetative Vermehrung verantwortlich (Hoppe 2013).

Mentha x piperita L. ist eine Langtagpflanze und blüht von Juli bis September. An kurzen Tagen werden hauptsächlich Ausläufer gebildet. Bis zu einem Meter kann die Pfefferminze in die Höhe wachsen; der vierkantige Stängel ist überwiegend kahl, die Laubblätter sind deutlich gestielt und länglich-eiförmig bis länglich-lanzettlich mit sägezahnigen Blatträndern. Deren Unterseite ist flaumig behaart, dort sind die Drüsenhaare lokalisiert, in denen sich das wertvolle Öl befindet. Die Pflanzen sind hell- bis dunkelgrün, teilweise sogar schwarzgrün. Die Blüten stehen in Scheinquirlen in rötlichem lila. Sie sind sehr beliebt bei Insekten. Außerdem sind sie selbststeril, nur nach Bestäubung mit anderen Sorten ist eine Samenbildung möglich. Findet eine generative Vermehrung statt, entsteht daraus ein Wildtyp, der sich wiederum vegetativ vermehrt. Ein solcher Wildtyp beinhaltet andere Inhaltsstoffe und erfüllt nicht die Richtlinien des Kräuteranbaus, weshalb solche Wildtypen unerwünscht sind. Die echte Pfefferminze wird somit ausschließlich vegetativ vermehrt, um sortenrein zu bleiben. Dafür gibt es drei Möglichkeiten: entweder über eine Vermehrung der Stolonen, über Risslinge, dieses sind gut bewurzelte Triebe aus dem Feldbestand, welche sofort an anderer Stelle wieder eingepflanzt werden, oder über Kopfstecklinge. Letzteres sind Pflanzenstiele, die im Gewächshaus unter optimalen Bedingungen Wurzeln ausbilden und dann ausgepflanzt werden (Hoppe 2013). Es ist die gängige Methode, welche auch am vorliegenden Betrieb, wo der Versuch durchgeführt wurde, praktiziert wird.

Die Pfefferminze selbst ist wahrscheinlich im 17. Jhd. in England aus einer Kreuzung von *Mentha x spicata* L., der Grünen Minze und *Mentha aquatica* L., der Wasserminze, hervorgegangen. *Mentha x spicata* L. selbst ist aus einer Kreuzung von *Mentha longifolia* L. mit *Mentha suaveolens* Ehrh. entstanden, siehe Abbildung 1, wonach die Pfefferminze ein Tripelbastard ist.

Erst in der 2. Hälfte des 18. Jhds. erlangte die Pfefferminze ihre wirtschaftliche Bedeutung, in Deutschland. Verbreitet ist die Kultur heutzutage hauptsächlich im eurasiatischen Raum. Die Verwendung ist vielseitig, denn die Blätter enthalten wertvolle Gehalte an ätherischen Ölen, vor allem Menthol und Menthon sind kennzeichnend für die Pfefferminze. Bei den jungen Blättern ist ein besonders hoher Menthongehalt zu erwarten. So werden die Blätter frisch oder getrocknet im Lebensmittelhandel als Tee oder Gewürz verwendet. Bei Süßwaren wird das

wertvolle Öl als Geschmacksträger oder Geschmacksverstärker eingesetzt. In der Pharmazie lindert Pfefferminze unter anderem Erkältungen, es ist antibakteriell, wirkt krampflösend und löst auf der Haut ein kühlendes Gefühl aus, z. B. durch das Einreiben mit Pfefferminzöl. Auch in der Kosmetikindustrie ist die Pfefferminze in z. B. Zahnpasta oder Bodylotionen vorzufinden. Wichtig ist bei allen Anwendungsbereichen eine richtige Dosierung, da die ätherischen Öle in reiner Form starke Reizungen verursachen (Hoppe 2013).

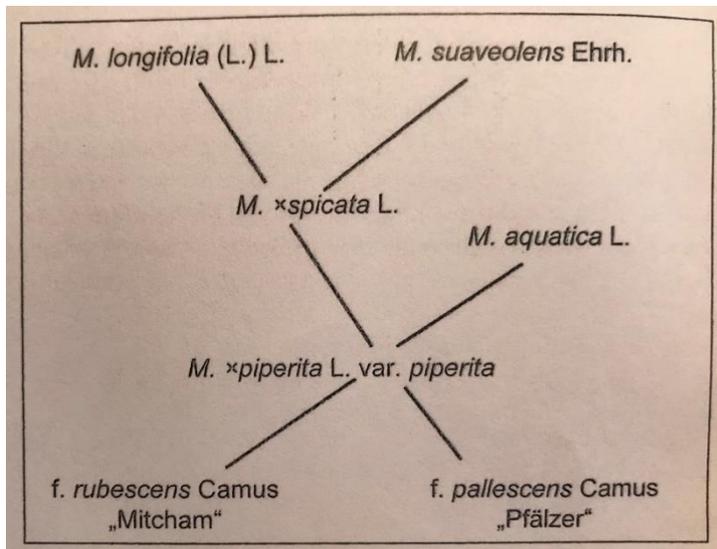


Abbildung 1: Entstehung der Pfefferminze als Tripelbastard nach (Hoppe 2013)

Ätherische Öle sind Duftstoffe, die aus komplexen Substanzen wie Alkoholen und Estern bestehen. Sie sind fettlöslich, hitzeempfindlich und leicht entflammbar, hinterlassen aber im Gegensatz zu den fetten Pflanzenölen keine Fettflecken, da sie leicht flüchtig sind und schnell verdampfen. Im Wasser lassen sie sich nicht auflösen, dort schwimmen sie tropfenförmig auf der Wasseroberfläche (Sonnentor 2021). Ätherische Öle werden mittels Wasserdampfdestillation gewonnen. Da Wasser bei 100°C

anfängt zu kochen und in den gasförmigen Zustand übergeht, ätherische Öle aber erst bei Temperaturen ab 150°C anfangen zu sieden, werden die ätherischen Öle mit dem Wasserdampf in ein Messrohr transportiert und dort volumetrisch erfasst (Hoppe 2010, S. 531–533). Pfefferminzblätter enthalten 0,5-4 % (bis zu 6 %) ätherisches Öl, wobei in der Ganzdroge (Rohware) mindestens 1,2 % und in der Schnittdroge (verarbeitete Form der Pfefferminze, z. B. für Tee) mindestens 0,9 % ätherisches Öl vorhanden sein müssen (Hoppe 2013, S. 310).

Hauptbestandteile des ätherischen Öls sind Menthol und Menthon, weitere kommen in sehr geringen Konzentrationen vor, sind aber trotzdem essenziell für die gesamte Geschmacks- und Geruchsqualität. So z. B. Jasmon, es kommt nur in Spuren von ca. 0,1 % im Pfefferminzöl vor, trägt aber sehr zu einem angenehmen Pfefferminzaroma bei. Das Vorkommen von Menthofuran allerdings führt aufgrund des scharf unangenehmen Geschmacks zur Geschmacksminderung, daher dürfen nur geringe Mengen vorhanden sein (Hoppe 2013, S. 310). Siehe Anforderungen des Lebensmittelhandels an die Zusammensetzung des Pfefferminzöls in Tabelle 1.

Tabelle 1: Zusammensetzung Pfefferminzöl, Anforderungen für den Lebensmittelhandel nach Teuscher 2003, in (Hoppe 2013, S. 310)

Inhaltsstoff	%
Menthol	15-68
Menthon	15-76
Menthylacetat	2-5 (bis zu 23)
1,8-Cineol	3-8
Menthofuran	0-7
Isomenthon	2-13
Limonen	2-10
Pulegon	0,5-5
Carvon	
Isopulegol	
Neomenthol	
Piperiton	

Neben den ätherischen Ölgehalten sind weitere Anforderungen der aufbereiteten Pfefferminze für den Lebensmittelhandel zu erfüllen, vgl. Tabelle 2 sowie weitere Produktspezifikationen von Sonnentor im Anhang, Kapitel 10.1.

Tabelle 2: Produktspezifikation Pfefferminze von Sonnentor, eigene Darstellung

Qualitätsparameter	
Optik	Trockenware: mattes dunkelgrün, getrocknete Blätter mit Stielansatz, glatte Ober- und Unterseite, vereinzelt braune Verfärbungen, 1-3 cm
Geruch	Sauer, Säuerlich, Minze
Geschmack	Minze, Ätherisch, Süßlich
Max. Restfeuchte in %	10
Max. aw-Wert	0,7

Die Klima- und Bodenansprüche der Pfefferminze umfassen ein weites Fenster. Ideal sind mittlere Temperaturen in einem feuchten Milieu, wobei geringere Temperaturen und Feuchtigkeitsgrade ebenfalls möglich sind. Jährliche Niederschlagsmengen von 700-800 mm sind ideal für *Mentha x piperita L.*, da die Kultur aufgrund ihres flachen Wurzelsystems nur ein geringes Wasseraufnahmevermögen hat. Daher bietet sich in trockeneren Regionen eine Bewässerung an.

Den Boden betreffend wächst die Pfefferminze auf allen mittleren Böden, solange diese nicht zu schwer oder leicht sind. Der vorliegende Versuchsstandort ist eine Parabraunerde. Der pH-Wert sollte idealerweise zwischen 6-7,4 liegen (Hoppe 2013).

Da die Pfefferminze selbstunverträglich ist, sind Anbaupausen von 5-7 Jahren empfehlenswert. Der Bestand selbst kann bis zu über 3 Jahren stehen, abhängig vom Pflegeaufwand, vor allem dem Unkrautdruck. Als Vorfrucht eignen sich wassersparende Kulturen wie z. B. Kartoffeln, Klee gras oder Getreide, welche das Feld zeitig räumen, sodass der Boden Zeit hat sich nach einer Feldbearbeitung zu setzen (Hoppe 2013, S. 315; LfL 2001, S. 2; Röhrich et al. 2003, S. 75). Die Fruchtfolge am Versuchsfeld endet vor jedem Kraut, hier

der Pfefferminze, mit der Abfolge eines 2-jährigen Luzerne-Kleeegrases, dann eines 1-jährigen Wintergetreides wie Dinkel, Einkorn oder Emmer und zuletzt einer Begrünung mit Wintererbse, welche vor Pflanzung der nächsten Krautkultur eingefräst wird (Rossnagl 2020). Besonders wichtig für die Kultur ist eine ungestörte Wasserführung, sodass die flachen Wurzeln durch den kapillaren Aufstieg ausreichend mit Wasser versorgt werden können. Die Pfefferminze gilt als berechnungswürdige Kultur (Röhrich et al. 2003, S. 80), sodass in Trockenperioden Erträge gesichert und Ertragssteigerungen von um die 20 % in der Frischmasse erzielt werden können. Auswirkungen auf den ätherischen Ölgehalt hat eine Bewässerung jedoch nicht. Bei guter Wasserversorgung nimmt die Wuchshöhe der Pfefferminze zu und untere Blätter fallen ab oder werden gelb. Zudem erhöht sich der Wassergehalt in der Frischmasse der Pflanze. Dieses wirkt sich negativ auf den Trocknungsprozess aus und steigert die Energiekosten. Jedoch zögert eine Bewässerung den Übergang in die generative Wachstumsphase hinaus (Hoppe 2013, S. 327–328), was im Kräuteraanbau wünschenswert ist, da der ätherische Ölgehalt kurz vor dem Blühstadium am höchsten ist.

Die Pflanzung eines neuen Bestandes erfolgt im Herbst. Über den Winter kann die Kultur mit einem Vlies abgedeckt werden, um das Aufwachsen von Unkräutern einzudämmen und die Pfefferminze vor sehr kalten Temperaturen zu schützen. Nachteilig ist hierbei die Schutzmöglichkeit für Mäuse, welche über die Wintermonate den Bestand erheblich beschädigen können.

Als Nachfrucht eignet sich z. B. Getreide, es kann durch seine dichte Bestockung aufgekommene Unkräuter oder auch Pfefferminzdurchwuchs gut unterdrücken (Hoppe 2013; LfL 2001, S. 2). So auch auf dem Betrieb der Versuchsanlage. Ist der Unkrautdruck moderat, folgen Hafer oder Hanf, dominiert starkes Wurzelunkraut, folgt eine Hackfrucht wie Kürbis. Aufgrund des späten Aussaattermins von Kürbis ist Zeit, das Unkraut bis dahin zu bekämpfen. Die Pflege der Pfefferminze erfolgt hier mechanisch zwischen den Beeten per Reihenfräse und während der Saison manuell in den Beeten. Da der Betrieb Demeter zertifiziert ist, sind sämtliche synthetischen Mittel untersagt. Zum Einsatz kommen hier die jährlichen Präparate wie Hornkiesel oder Hornmist (Rossnagl 2020).

Schädlinge und Krankheiten spielen im Pfefferminzanbau eine untergeordnete Rolle, da die Kultur relativ robust ist (Rossnagl 2020). Möglich sind aber neben weiteren der Mehltau, Pfefferminzrost oder Schädlinge wie der Rüsselkäfer oder Wicklerlarven (Hoppe 2013).

Die Ernte sowie die Aufbereitung der Pfefferminze werden im Zusammenhang mit der Durchführung in Kapitel 4.10 und 4.11 erläutert. Der optimale Erntezeitpunkt liegt kurz vor bis zu Beginn der Blüte, dann hat der ätherische Ölgehalt seinen Höhepunkt erreicht. Ein weiteres Erntekriterium ist der steigende Anteil der gelben Blätter.

Für die Einordnung der erhobenen Ergebnisse werden nachfolgend einzelne Referenzwerte aus der Literatur für diverse Ertragsparameter angegeben:

Ertragsmengen der **trockenen Blätter** liegen laut Röhrich et al. bei durchschnittlich 17 dt ha⁻¹, wobei die Angaben in der durchgeführten Umfrage zwischen 10-30 dt ha⁻¹ variieren. In der Literatur liegen die durchschnittlichen Blätterträge mit 25-50 dt ha⁻¹ TM wesentlich höher (Röhrich et al. 2003, S. 86). Feldversuche der LfL ergaben folgende Ertragsmengen, s.

Tabelle 3. Der Reihenabstand betrug 62,5-75 cm, der Abstand in der Reihe lag bei 20-25 cm, mechanische Pflege fand zwischen den Reihen statt und eine Düngung erfolgte in Höhe der Entzugsmengen (LfL 2001).

Tabelle 3: Erträge bei Pfefferminze nach Feldversuchen der LfL (LfL 2001, S. 5)

	Erträge in dt ha ⁻¹			
	Frisches Kraut (ganze Pflanze)		Blattdroge (TM Blätter)	
	Pflanzjahr	Folgejahr	Pflanzjahr	Folgejahr
1. Aufwuchs	65-120	350-475	8-13	27-33
2. Aufwuchs	90-160	195-255	10-18	17-26
Gesamtertrag	135-230	575-725	15-26	45-59

Analysen der ökologischen Produktionsverfahren von Heil- und Gewürzpflanzen in Deutschland ergeben **Frischmassen** des gesamten Krautes von 77 dt ha⁻¹ im 5-jährigen Mittel, wobei in der Literatur Werte von 300-500 dt ha⁻¹ zu finden sind (Röhrich et al. 2003, S. 32).

Einzelne Angaben zum **Blatt-Stängel-Verhältnis** bei *Mentha piperita* L. in der Trockenmasse liegen bei 1,09 (erster Schnitt) und 2,04 (zweiter Schnitt) (Beemnet et al. 2011, S. 51–52). Der Reihenabstand beträgt hierbei 60 cm. Sowohl die Abstände zwischen den Reihen als auch die Erntetermine nach Auspflanzung haben Einfluss auf das Verhältnis zwischen Blatt und Stängel.

Der Nährstoffabtrag durch die Pfefferminze liegt bei folgenden Werten, s. Tabelle 4 und Tabelle 5. Die Entzugswerte können sowohl über die Frischmasse als auch über die Trockenmasse berechnet werden.

Tabelle 4: Nährstoffentzüge Pfefferminze 1. Standjahr (n = 5) nach (Biertümpfel et al., S. 7)

	Ertrag FM (dt ha ⁻¹)	Ertrag TM (dt ha ⁻¹)	N-Entzug (kg ha ⁻¹)	P-Entzug (kg ha ⁻¹)	K-Entzug (kg ha ⁻¹)	Mg-Entzug (kg ha ⁻¹)	Ca-Entzug (kg ha ⁻¹)
Ø	67,2	13,5	40,8	5,8	45,0	6,5	21,8
Max.	109,3	21,2	67,8	10,0	65,6	11,9	33,3
Min.	45,1	9,2	29,3	4,0	30,7	4,1	16,2

* Entzugswerte steigen mit 2. und 3. Standjahr, vgl. Anhang, Kapitel 10.2

Tabelle 5: Nährstoffentzüge Pfefferminze in kg ha⁻¹ nach Bomme und Nast 1998 in (Hoppe 2013, S. 327)

N-Entzug	P-Entzug	K-Entzug	Mg-Entzug
42	4,8	45,7	4,8

4 Material und Methoden

4.1 Projektpartner

An dem vorliegenden Versuch waren der Landwirt Christian Rossnagl, die Kräuterhandelsgesellschaft mbH Sonnentor und die Firma Hydrip GmbH beteiligt. Das vorliegende Projekt wurde von den drei Partnern initiiert, welche Position sie einnahmen und vertraten, wird nachfolgend kurz beschrieben.

4.1.1 Landwirt Rossnagl

Christian Rossnagl führt mit seiner Frau einen Demeter-Betrieb, welcher in Groß Burgstall, in der Nähe von Horn, im Waldviertel liegt. Der Hof ist seit 1815 im Familienbesitz und wird seit 1995 biologisch-organisch bewirtschaftet. Seit 2006 ist dieser ein anerkannter zertifizierter Demeter-Betrieb. Neben dem Ackerbau, etwas Grünland und 21 Pferden (davon 7 eigene und 14 weitere von einem anderen Betrieb) ist vor allem der Kräuteraanbau ein großes Standbein, welcher auf knapp 13 ha seit dem Jahre 2012 praktiziert wird. Insgesamt fasst der Betrieb 97,5 ha. Die Versuchsflächen sind Teil des Pfefferminzfeldes, wodurch es möglich war, den Versuch praxis- und betriebsnah durchzuführen, um realistische Ergebnisse zu erzielen. Christian Rossnagl ist Innovationen gegenüber sehr offen und an den Effekten der Unterflur-Tropfbewässerung sehr interessiert. Vor allem durch die Auswirkungen des voranschreitenden Klimawandels werden potenzielle Alternativen der Bewässerung immer wichtiger, worauf es gilt, sich zeitig vorzubereiten. Als Produzent möchte er auch in Zukunft qualitativ und quantitativ hochwertige Ware produzieren. Neben der Pfefferminze werden auf dem Betrieb Rossnagl 11 verschiedene Kulturen wie Oregano, Anis, Ringelblumen, Zitronenmelisse und viele mehr, angebaut. Abnehmer der Produktion ist der Kräuter- und Gewürzhersteller Sonnentor mit Sitz in Sprögnitz (Rossnagl 2020).

4.1.2 Sonnentor

Der Kräuter- und Gewürzhersteller Sonnentor wurde im Jahre 1988 in Sprögnitz im Waldviertel gegründet. Am Beginn stand Johannes Gutmann, dessen Idee es war, die Wertschöpfung in der Waldviertler Region durch den Kräuteraanbau zu steigern. Von anfangs drei Landwirten, welche sich von seiner Idee begeistern ließen, sind es heute 300 Produzenten weltweit, welche mit Sonnentor zusammenarbeiten. Im Fokus stehen hier unter anderem faire Handelsbeziehungen, die Gesundheit und Sicherheit aller MitarbeiterInnen, Respekt gegenüber jedem Einzelnen und ökologische Nachhaltigkeit. Ziel ist nicht die eigene Gewinnmaximierung, sondern die Steigerung des Gemeinwohls. Sonnentor bezieht nicht nur die Produkte von Landwirten, sondern berät und unterstützt diese. Gemeinsam arbeiten beide Seiten einen optimalen Handelsvertrag aus. So wurde auch der vorliegende Versuch gemeinsam geplant; Sonnentor hat in die Anlage der Unterflur-Tropfbewässerung investiert und fördert hiermit zukünftige und nachhaltige Formen des landwirtschaftlichen Anbaus. Elfriede Stopper, Anbauberaterin für Sonnentor, hat das Experiment tatkräftig mit ihrer

Expertise in den geforderten Qualitätsansprüchen an den Kräuteraanbau unterstützt. Langfristig stabile Partner sind sehr wertvoll, so investiert das Unternehmen gerne und nachhaltig in ihre Partnerbeziehungen (Sonnentor 2020).

4.1.3 Firma Hydrip GmbH

HYDRIP® wurde 2007 in Wien gegründet. Die Firma entwickelt nachhaltige Bewässerungstechniken und berät die Kunden individuell im Bereich der Bodenbeschaffenheit und einer optimalen Bewässerung. Im Fokus steht die Unterflur-Tropfbewässerung, welche ursprünglich in Israel entwickelt wurde, nun aber vermehrt in Europa und auch in Österreich zum Einsatz kommt. HYDRIP® entwickelt und optimiert die Technik laufend und arbeitet vor allem in den Bereichen Landwirtschaft, Landschaftserhaltung und Privathäusern, kurz HYDRIP® agro, HYDRIP® green und HYDRIP® home. Mag. Stefan Glaser hat die Bewässerungstechnik für den Standort ausgewählt und stand, das Bewässerungsmanagement sowie die bodenphysikalischen Aspekte betreffend, beratend zur Seite (Hydrip GmbH 2020).

4.2 Standort

4.2.1 Boden

Das Pfefferminzfeld liegt auf einer Höhe von knapp 375 m. Das Feld ist schwach geneigt in Richtung Norden bis nord-west, es liegt im Horner Becken, durch welches die Kleine Taffa fließt. Der Boden ist eine Parabraunerde aus Löß mit der Horizontabfolge Ah/Al/Bt/C und gehört damit zu den Lessivès, den ausgewaschenen Böden. Mit 50-90 Bodenpunkten schneidet die Parabraunerde als günstiger Ackerstandort gut ab (Blume et al. 2010, S. 325) und hat hohe bis mäßige Nährstoffreserven vorzuweisen. Der Boden des Versuchsstandortes wurde mit 63 Bodenpunkten bewertet (Stand 2020). Die A-Horizonte sind an Ton verarmt, welcher sich im Bt-Horizont anreichert. Das führt zu einem geringeren Anteil an Grobporen und mehr Feinporen im Bt-Horizont (Blume et al. 2010, S. 323–325). Auf der vorliegenden Versuchsfläche neigt der Bt-Horizont zu einem Schmierhorizont, er ist verdichtet und damit wasserundurchlässiger. Zusätzlich tendieren Parabraunerden aus Löß zur Verschlammung und Erosion in Hanglage aufgrund von Verschleiffung des lessivierten Oberbodens. Dieser Fall lässt sich auf der Versuchsfläche bestätigen.

Die Anteile von Sand, Schluff und Ton betragen in den oberen 27-30 cm des Bodens im mittleren Teil des Feldes knapp 25 % Ton, gute 40 % Schluff und somit um die 35 % Sand (Unterfrauner 2020), es liegt ein schluffiger Lehm bzw. Lehm im oberen Boden vor. Unterhalb der 30 cm nimmt der Tonanteil zu, sodass ein toniger Lehm dominiert (Bestimmung mittels Fingerprobe am Feld). Die Horizonte verlaufen über die gesamte Feldlänge aufgrund der leichten Hangneigung unterschiedlich. Anhand von Bohrstock-Proben wurde folgende Horizont-Abfolge beobachtet, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Einteilung der beobachteten Horizonte mittels Bohrstockprobe, eigene Darstellung

Oberes Feld:			Unteres Feld:		
Ah - Horizont	0-25 cm	uL	Ah - Horizont	0-25 cm	L
Al - Horizont	25-40 cm	L	Bt - Horizont	25-65 cm*	tL
Bt - Horizont	40-70 cm	tL			

- Für den mittleren Teil des Feldes gelten die oben genannten Ton-, Schluff- und Sandanteile in den oberen 30 cm des Bodens.

* In einer Tiefe von 65 cm Wechsel zum C-Horizont

Das Feld neigt sich leicht nach unten ab, sodass ein gesamter Horizont abgetragen ist, vgl. Tabelle 6, der Al-Horizont fehlt im unteren Bereich des Feldes. Für den Versuch ist folgende Einteilung der Horizonte Grundlage für die Entnahme der Bodenproben, vgl. Tabelle 7:

Tabelle 7: Einteilung der Schichten für den Versuchsablauf, eigene Darstellung

0-10 cm	Ah – Horizont	bearbeitet	uL-L	= <i>Schicht 1</i>
10-20 cm	Ah – Horizont	unbearbeitet	uL-L	= <i>Schicht 2</i>
20-40 cm	Al – Horizont	oberes Feld	L	= <i>Schicht 3</i>
20-40 cm	Bt - Horizont	unteres Feld	tL	
40-70 cm	Bt - Horizont		tL	= <i>Schicht 4</i>
> 70 cm	Wechsel zum C - Horizont	War nicht Bestandteil der Probenahme		

Der Wechsel von *Schicht 2* zu *Schicht 3* in einer Tiefe von 20 cm orientiert sich am Bewässerungsschlauch, welcher 27 cm tief liegt. So liegt dieser mittig in *Schicht 3* und der Bewässerungseffekt kann per TDR-Sonde für die gesamte Schicht ermittelt werden.

Die nachfolgende Charakterisierung des Bodens bezieht sich hauptsächlich auf die oberen 27-30 cm des mittleren Feldes. Grundlage der Ergebnisse sind Parzelle 3, welche in der Versuchsperiode bewässert wurde, und Parzelle 8, welche auf der gleichen Höhe liegt, aber nicht bewässert wurde. Die Ergebnisse beider Parzellen, welche im Technischen Büro (TB) Unterfrauner GmbH (Wien) analysiert wurden, sind fast identisch, sodass sich nachfolgende Beschreibung auf beide Varianten bezieht, vgl. Anhang Kapitel 10.3 und 10.4.

„Die sandige / lehmige Bodenart bedingt einen leicht / mittelschweren Boden“ (Unterfrauner 2020, S. 5). Die Wasserspeicherkraft des Bodens ist recht hoch, bei vollständiger Wassersättigung kann der Boden um die 5 ml Wasser pro 10 g Boden zurückhalten, was einer Menge von über 900 m³ ha⁻¹ entspricht. Im Winter bzw. Frühjahr reicht eine solche Wassersättigung aus, um kurze Trockenperioden gut zu überstehen (Unterfrauner 2020, S. 5). Die Wasserdurchlässigkeit wird jedoch durch den tonigen B-Horizont eingeschränkt. Wie stark das Wasser im Boden gebunden ist, drückt die pF-Kurve aus, vgl. Abbildung 2. Der energetische „Knackpunkt“ liegt hier bei einem pF-Wert von 3,5 (roter Balken an der y-Achse). Wenn das Wasser mit einer stärkeren Saugspannung als pF 3,5 im Boden gebunden ist,

benötigt die Pflanze mehr Energie, um dem Boden das Wasser zu entziehen, als dass über die Photosynthese gebunden werden kann. Spätestens dann sollte der Boden bewässert werden, sofern möglich (Unterfrauner 2020, S. 5).

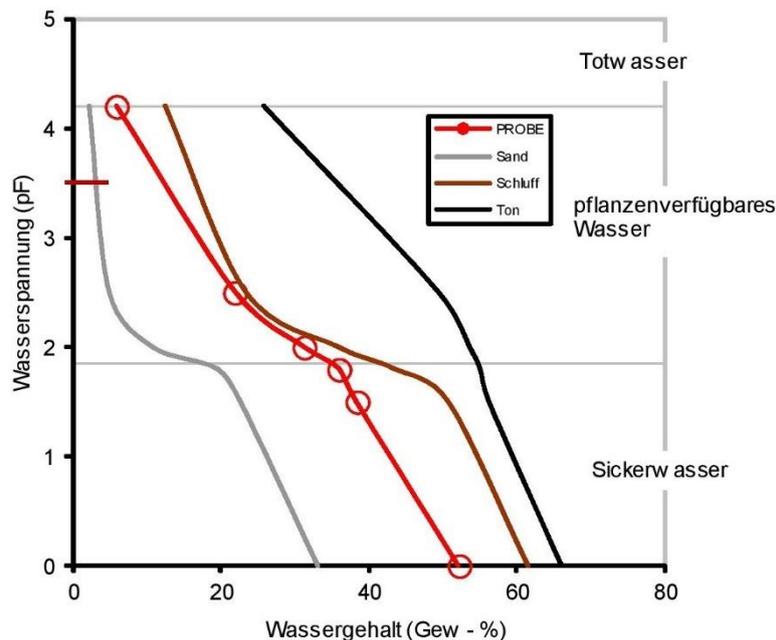


Abbildung 2: pF-Kurve, mittl. Bereich d. Versuchsfeldes, 0-30 cm, nach Unterfrauner 2020, S. 4

Die vorliegende pF-Kurve wurde nicht direkt gemessen, sondern aus dem KH Wert, s. u., über eine Regression errechnet. Die Regression stammt aus der Diplomarbeit Stefan Diringers (Diringer 2010), bei der von 50 Bodenproben die KH und pF-Werte ermittelt wurden. Für die pF-Werte wurden Stechzylinder auf Sandfilter mit Unterdruck eingestellt, anstatt in Drucktöpfen. Zusätzlich wurde eine Validierung mit 600 Bodenproben vorgenommen, um die Regression abzusichern (Unterfrauner 2020).

Unterhalb der 30 cm nimmt der Tongehalt im Boden zu, weshalb davon auszugehen ist, dass die Saugspannung steigt und das Wasser schwerer für die Pflanzen verfügbar ist, da der Anteil der Feinporen zunimmt. Über die zusätzliche spezifische Oberfläche kann zwar mehr Wasser gebunden werden, jedoch mit einer so hohen Saugspannung, dass das erhöhte gespeicherte Wasser den Pflanzen nicht zur Verfügung steht. Die pF-Kurve des Bodens < 30 cm würde somit etwas weiter rechts abgebildet sein als die Jetzige, vgl. Abbildung 2.

Die Klassifikation des leicht / mittelschweren Bodens ist auf den KH Wert, die Bodenschwere, zurückzuführen. Dieser bezieht sich auf die Korngrößenzusammensetzung und liegt mit einem Wert um die 50 im günstigen Bereich. „Der KH-Wert wird durch Zufügen von Wasser zu einer definierten Menge an Boden ermittelt, bis dessen „Plastizitätsgrenze“ erreicht ist. Je mehr Wasser der Boden aufnehmen kann, desto höher ist der Tongehalt und damit der KH-Wert“ (Matzer, S. 2). Dieser lässt außerdem Einschätzungen zur Bearbeitbarkeit und für den Wasserhaushalt zu (Pichler 2012, S. 29). Grundsätzlich gilt, „je höher der KH-Wert desto schwerer der Boden“ (Matzer, S. 2). Proben mit einem KH-Wert von < 80 können im

Texturdreieck angezeigt werden. Eingeteilt ist die Bodenschwere in fünf Klassen, welchen jeweils bestimmte Bodenarten zugeordnet werden, s. Tabelle 8.

Tabelle 8: Bodenschwereklassen und zugehörige Bodenarten nach (Pichler 2012, S. 29)

Bodenschwere		Zugehörige Bodenart
II	Sehr leicht	Sand, schluffiger Sand
I	Leicht	Lehmiger Sand, sandiger Schluff, Schluff
m	Mittelschwer	Toniger Sand, sandiger Lehm, lehmiger Schluff
s	Schwer	Sandiger Ton, Lehm, schluffiger Lehm
ss	Sehr schwer	Lehmiger Ton, Ton

Die Aggregatstabilität des Bodens ist beeinträchtigt. Dies kann durch Regen, Bearbeitung oder Befahren des Bodens verursacht werden. Bedingt wird dadurch eine hohe Erosionsgefahr, welche zusätzlich durch die leichte Hangneigung begünstigt wird. Außerdem können Probleme im Wasser- und Lufthaushalt auftreten (Unterfrauner 2020, S. 6).

Die exakte Lagerungsdichte (dB) des Bodens ist nicht bekannt. Beschrieben wird anhand dieser der Anteil des trockenen Bodens pro Volumen unter Berücksichtigung des Porenanteils. Die Einheit beträgt g cm^{-3} . Da jedoch zu jedem Erntetermin der volumetrische als auch gravimetrische Wassergehalt gemessen wurde, konnte der grav. WG per angenommener Lagerungsdichte in den vol. WG umgerechnet werden. Die passendsten Umrechnungen ergaben sich bei einer Lagerungsdichte von $1,6-1,8 \text{ g cm}^{-3}$.

Der pH-Wert_{Wasser} liegt in den oberen 27-30 cm mit 6,0 bzw. 6,4, vgl. Ökologische Basischarakterisierung im Anhang, Kapitel 10.3 und 10.4, im schwach bis mäßig sauren Bereich. Der pH-Wert_{KCl} liegt mit um die 4,8 im stark sauren Bereich, es liegt eine starke Säuredegradation vor. Dadurch lösen sich die Tonminerale in einzelne Bestandteile wie Aluminium (Al), Eisen (Fe) oder Silicium (Si) auf, gehen in die Bodenlösung ein und können ausgewaschen werden. Außerdem gehen Austauschflächen verloren, der Boden versauert und Aluminium ist toxisch für die Pflanzen und kann die Qualität der Ernteprodukte stark beeinträchtigen. Darüber hinaus wird die Aufnahme von Phosphor (P), Calcium (Ca) und Magnesium (Mg) aus der Bodenlösung beeinträchtigt (Unterfrauner 2020, S. 6). Laut der digitalen Bodenkarte eBOD werden die pH-Werte in den tieferen Horizonten neutral und unterhalb des Bt-Horizontes alkalisch (eBOD). Diese Angabe kann anhand eigener pH-Wert Bestimmungen bestätigt werden. Über eine $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ Suspension wurden in der *Unteren Schicht (40-70 cm)* in allen Parzellen pH-Werte um die 7 gemessen, in den Schichten oberhalb geringere pH-Werte von bis zu 6,3. Siehe Ergebnisse der pH-Werte im Anhang, Kapitel 10.5. Im Labor konnten außerdem Carbonatgehalte im tiefsten Horizont (40-70 cm) festgestellt werden, wogegen die oberen Horizonte kalkfrei sind.

Der Gehalt an organischer Substanz ist mit 1,5-1,8 % in den oberen 30 cm niedrig, wobei die Qualität der organischen Substanz günstig ist (Unterfrauner 2020; eBOD). Die AGES kommt mit Humusgehalten von 1,5-2,5 % zu ähnlichen Ergebnissen. Über die AGES wurden die

Schichten 0-10 cm, 10-20 cm und 20-30 cm separat analysiert. In Tendenz sind in den oberen 0-20 cm eher humose Gehalte vorzufinden und im Bereich 20-30 cm eher schwach humose Gehalte (AGES 2020). Bedingt werden die niedrigen Humusgehalte auch durch die sauren pH-Werte, wodurch eine Grundlage für acidophile (säureliebende) Mikroorganismen gefördert wird, sodass das Um- und Abbauverhalten der organischen Substanz im geringeren Ausmaß stattfindet (Unterfrauner 2020, S. 6).

Das C/N-Verhältnis ist mit Werten um die 8 günstig, mikrobiologische Prozesse sollten unter optimalen Witterungsbedingungen, sprich Temperatur und Feuchte, stattfinden können, doch der Säurehaushalt schränkt das Mineralisierungspotenzial aktuell ein (Unterfrauner 2020, S. 7; AGES 2020). So ist auch die Stickstoffversorgung zum Zeitpunkt der Probenahme am 04. Mai 2020, mit 43-63 kg ha⁻¹ mangelhaft (Unterfrauner 2020, S. 3).

Die elektrische Leitfähigkeit liegt mit 0,3-0,4 mS cm⁻¹ zum Zeitpunkt der Probenahme am 04. Mai 2020 unterhalb des günstigen Bereichs für die Vegetationsperiode (0,5-0,8 mS cm⁻¹) (Unterfrauner 2020, S. 6). Am Ende der Vegetationsperiode oder im Nachhinein sind solche niedrigeren Werte günstig. „Die Bodenlösung ist das wichtigste Medium für die Pflanzenernährung“ (Unterfrauner 2020, S. 7). Die gelösten Salze sind sehr wichtig für die Pflanzen und können nur in gelöster Form aus der Bodenlösung über die Wurzeln aufgenommen werden. Dafür muss die Zusammensetzung der einzelnen Nährstoffe im Gleichgewicht sein, siehe Mangel und Überschuss einzelner Elemente nachfolgend (Unterfrauner 2020, S. 7).

Die pflanzenverfügbaren Stoffe Phosphor, Kalium, Stickstoff, Eisen, Kupfer, Molybdän und Kobalt liegen im Mangel, siehe ebenso die Analysen auf P_{CAL} und N_{min} in Kapitel 5.5. Im Überschuss liegen Zink und Bor, zum Teil Eisen, Mangan und Silizium.

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) bezeichnet das Potenzial Nährstoffe an der negativ geladenen Oberfläche der organischen Substanz bzw. der Tonteilchen anzulagern. Dieses wird auch Sorptionskomplex genannt. Die potenzielle KAK (KAK_{pot}) beträgt um die 17 mmol_c / 100 g, die aktuelle KAK (KAK_{akt}) um die 10 mmol_c / 100 g. Damit ist der Boden aktuell mittel sorptionsstark (Unterfrauner 2020, S. 6). Die Basensättigung an Calcium, Magnesium, Kalium und Natrium liegt mit in Summe 56 % unterhalb des gewünschten Bereiches (70-90 %) und es besteht die Gefahr einer weiteren Versauerung und Abnahme der Bodenfruchtbarkeit. Letztere wird durch das Zusammenwirken vieler einzelner Faktoren bestimmt und ihr Potenzial nicht ausgeschöpft, die Säuren lagern sich statt der Nährstoffe im Austauschprozess an. Wird der Anteil an Säuren zu hoch, blockieren diese die Austauschkapazitäten und der Nährstoffgehalt in der Bodenlösung sinkt (Unterfrauner 2020, S. 8).

Aktuell mangelt es an der KAK_{akt} an Kalium, wogegen Calcium und Magnesium im Verhältnis im Überschuss verfügbar sind (Unterfrauner 2020, S. 8–10).

4.2.2 Klima

Das Klima im Waldviertel ist rau und wechselhaft. Häufig ist es hier etwas frischer als in anderen Gegenden Österreichs und Früh- sowie Spätfroste sind keine Seltenheit. Vor allem vom Frühjahr bis in den Herbst hinein prägen viele Sonnenstunden das Klima, während über die Wintermonate dichter Nebel Einzug hält. Klart es im Winter auf, dann wird es bitterkalt, da sich in den vielen Senken viel Kaltluft ansammelt. Im westlichen Waldviertel ist das Klima feuchter und kühler als im östlichen Waldviertel, wo auch der Versuchsstandort liegt (Waldviertel.at). Hier sind mildere Temperaturen und trockeneres Klima vorzufinden, wobei das Jahr 2020 von einem trockenen Frühjahr geprägt war, dann aber ein sehr nasses restliches Jahr folgte, mit einem Jahresniederschlag von 870,2 mm. Die durchschnittlichen Jahresniederschläge in Groß Burgstall liegen bei 472,9 mm (Rossnagl 2020).

4.3 Versuchsaufbau

Das Pfefferminzfeld, auf dem der Versuch durchgeführt wurde, war in 24 Beete aufgeteilt. Ein Beet war jeweils 180 cm breit und umfasste drei Reihen Pfefferminze, der Abstand dazwischen betrug jeweils 60 cm. Die mechanische Pflege fand nur zwischen den Beeten statt, wo auch gleichzeitig die Fahrspuren für die Erntemaschine waren. Drei Reihen konnten so in eine Beet-Form miteinander verwachsen, sodass der Ernteertrag stieg und der Unkrautdruck sank. Die Unkrautbekämpfung erfolgte manuell direkt vor der Ernte in den Beeten, um die Struktur möglichst wenig zu stören und den Bestand ohne Verunreinigungen abernten zu können.

Die Pfefferminze dieses Versuchs wurde im Sommer 2019 gepflanzt. Die Pflanztiefe beider Varianten betrug 8-10 cm. Der Abstand der Pflanzen in der Reihe betrug 38 cm, sodass bei einem Abstand von 60 cm zwischen den Reihen 6 Pflanzen pro m² gepflanzt wurden. Unter dem einen Bestand, welcher zuerst am 10. Juni 2019 gepflanzt wurde, lagen die Bewässerungsschläuche in einer Tiefe von 15 cm. Das Verlegen der Schläuche und das Auspflanzen der Pfefferminze erfolgte in einem Arbeitsgang. Das Schlauchsystem ist eine kostengünstigere Variante, welche von kurzer Dauer (ca. 3-4 Jahre) im Boden verbleibt. Der Wasserzufluss erfolgte oberirdisch. Zum besseren Aufwuchs wurde die Pfefferminze im Sommer 2019 bewässert, so konnte diese Variante gut anwachsen, da die Wurzeln schnell den Bewässerungsschlauch erreichten. Im Jahre 2020 wurde dieser Bestand **nicht** bewässert, dieser ist die Kontrolle bzw. **unbewässerte Variante** in dem vorliegenden Versuch, s. Abbildung 3.

Der andere Bestand wurde 6 Wochen später, Ende Juli 2019, gepflanzt. Hier wurden zuerst die Schläuche in einer Tiefe von 27 cm verlegt und in einem zweiten Arbeitsgang wurde die Pfefferminze gepflanzt. Das System hier ist sehr hochwertig und langlebig, 20-30 Jahre kann es im Boden verweilen. Der Wasserzufluss erfolgte unterirdisch, verwendet wurde Grundwasser. Diese Variante wurde ebenfalls im Sommer 2019 bewässert, allerdings erreichten die Wurzeln die Schläuche nicht so schnell, da diese tiefer lagen. Der spätere Pflanzzeitpunkt und zusätzlicher Mäusebefall in dem hiesigen Bestand trugen zu einem Wachstumsverzug bei, sodass die beiden Varianten mit ungleichen Bedingungen in die

Vegetationsperiode 2020 gestartet sind. Letztere Variante gilt fortlaufend als die **bewässerte Variante**, s. Abbildung 4, da diese in der Versuchsphase bewässert wurde, siehe Kapitel 4.6, und die Auswirkungen dieses Bewässerungssystems hier getestet wurden.



Abbildung 3: Pfefferminze **unbewässert**, 04. Mai 2020, eigene Aufnahme



Abbildung 4: Pfefferminze **bewässert**, 04. Mai 2020, eigene Aufnahme

Das Pfefferminzfeld ist ca. 250 m lang, alle Parzellen lagen im mittleren Bereich des Feldes, ungefähr parallel zueinander. Fünf Parzellen waren in einem Beet der bewässerten Variante platziert, fünf weitere Parzellen in einem Beet der unbewässerten Variante. Neben den Beeten mit den Versuchspartellen lag mindestens ein Beet der gleichen Variante, um Randeffekte zu vermeiden. Siehe Feldskizze in Abbildung 5.

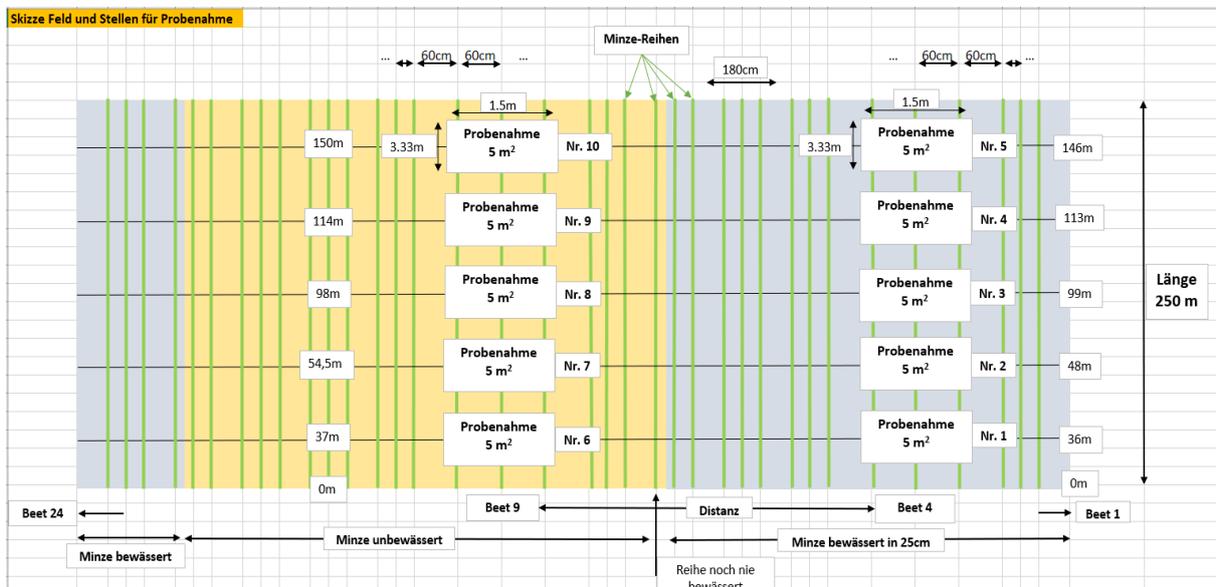


Abbildung 5: Feldskizze, eigene Darstellung

Die Parzellen waren jeweils 5 m² groß. Die Breite jeder Parzelle von 1,5 m zog sich über die drei Pfefferminz-Reihen eines Beetes, ohne dass Fahrspuren Teil der Parzellen waren. Die

Länge betrug 3,33 m. Jede Parzelle wurde halbiert, die eine Hälfte war für die TDR-Sonden reserviert, die andere Hälfte blieb ungestört für die Entnahme der Bodenproben, s. Abbildung 6.

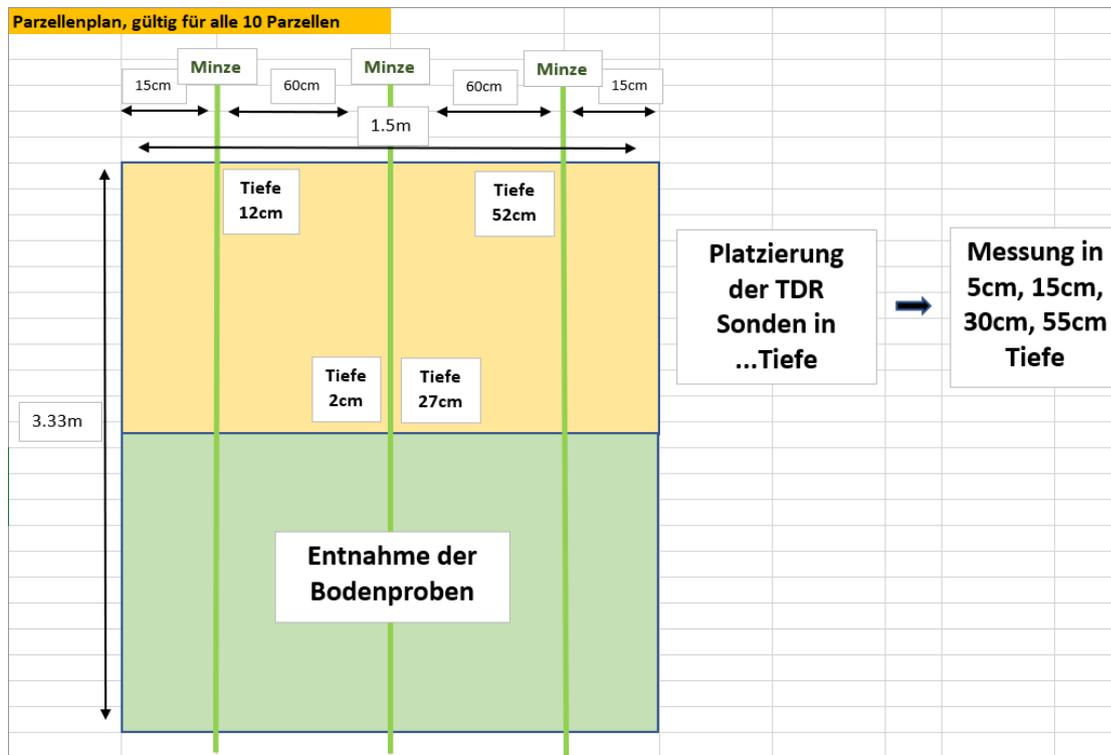


Abbildung 6: Parzellenplan, eigene Darstellung

Die TDR-Sonden wurden in jeder Schicht eingesetzt, jeweils in der Mitte der Schicht. Da die Spitzen der Sonden 6 cm lang sind, wurde der Sonden-Schaft 3 cm über der zu messenden Tiefe eingesteckt, sodass im Mittel in folgenden Tiefen gemessen wurde, s. Tabelle 9.

Tabelle 9: Einbau der TDR-Sonden, eigene Darstellung

Schichten:	Messtiefe:	Einstecktiefe:
0 – 10 cm	5 cm	2 cm
10 – 20 cm	15 cm	12 cm
20 – 40 cm	30 cm	27 cm
40 – 70 cm	55 cm	52 cm

Für die Ernte der Pfefferminze wurde jede Parzelle um einen halben Meter in die Länge vergrößert, sodass ausreichend Frischmasse, bzw. dann Trockenmasse für die Analysen zur Verfügung stand. Die abgeerntete Fläche betrug nun 5,745 m² mit einer Länge von 3,83 m und einer Breite von 1,5 m, s. Abbildung 7.

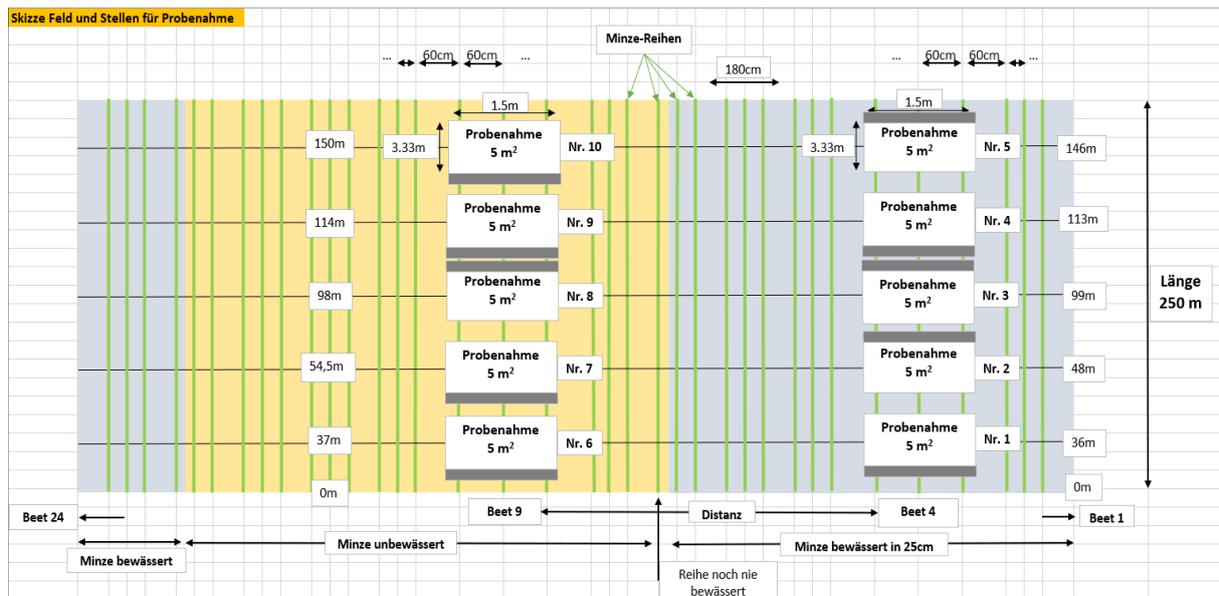
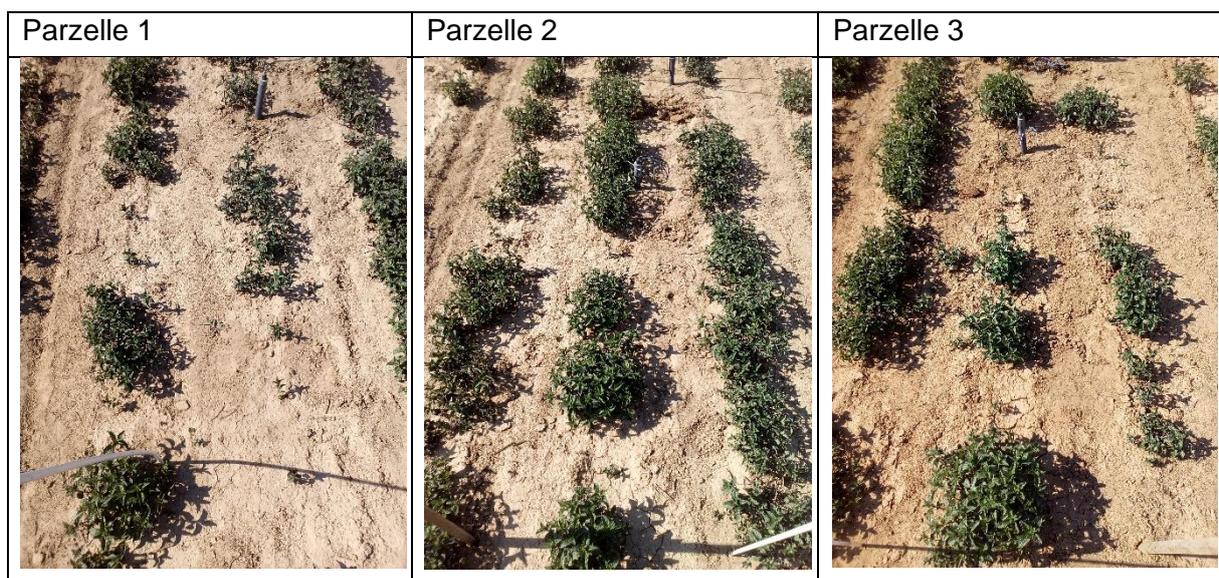


Abbildung 7: vergrößerte Parzellen zur Ernte, eigene Darstellung

4.4 Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der zwei Varianten

Die unterschiedlichen Wachstumsstadien der Pfefferminze zu Beginn der Versuchsperiode wurden anhand von Aufnahmen mittels der Software **Soil Cover** ausgewertet. Von jeder Parzelle wurde am 18. Mai 2020 ein Foto gemacht. Damit wurde der Grad der Pflanzenbedeckung ermittelt. Das Programm wird vom Josephinum Research Wieselburg zur Verfügung gestellt (Josephinum Research Wieselburg). Grundlage für die Ergebnisse waren folgende Fotografien, s. Tabelle 10. Parzelle 1-5 sind der bewässerten Variante zugeordnet, Parzelle 6-10 der unbewässerten Variante.

Tabelle 10: Unterschiedliche Ausgangsbedingungen der Pfefferminze, eigene Aufnahmen



Parzelle 4	Parzelle 5	
		
Parzelle 6	Parzelle 7	Parzelle 8
		
Parzelle 9	Parzelle 10	
		

Zu beachten ist die Qualität der Aufnahmen: Die Fotografien wurden nicht im 90° Winkel gemacht, jedoch wurden alle Parzellen aus einem ähnlichen Winkel aufgenommen. So sind die Unterschiede in der Bodenbedeckung zum einen optisch, zum anderen über die Ergebnisse der Soil Cover Software deutlich erkennbar, vgl. Kapitel 5.6. Die Differenz konnte als Co-Variable *Bedeckungsgrad* in der statistischen Auswertung in Betracht bezogen werden, vgl. 4.14.4.

4.5 Die eingesetzte Unterflur-Tropfbewässerung

Die im Versuch eingesetzte Bewässerungsanlage stammt von der Firma PARGA. Die verwendeten Schläuche tragen den Produktnamen „UNIRAM“, haben einen Durchmesser von 16 mm, ca. 1 mm dicke Schlauchwände und bestehen aus PE, sodass die Schläuche stets ihre runde Form behalten und sich nicht flexibel biegen lassen. Die Tropfer sind in Abständen von 50 cm in den Schlauch integriert und haben eine Ausflussrate von 1,6 l h⁻¹ je Tropfer. Verlegt sind die Schläuche in einer Tiefe von 27 cm und an beiden Enden an eine Versorgungsleitung angeschlossen. Von der etwas höher gelegenen Seite des Feldes wird das Wasser in das Bewässerungssystem befördert, das geschlossene System ermöglicht eine Wasserverteilung mit gleichbleibendem Druck über die gesamte Länge. Das Wasser wird mit einem Druck von 2 bar zum Feld befördert, gefiltert und dort auf einen Druck von 0,5 bar reguliert, mit dem es dann in die Schläuche weitergeleitet wird. Die Kosten des Systems betragen um die 12.000 – 13.000 EUR pro ha an variablen Kosten. Die anfänglichen Fixkosten wie Filter, Zuleitung und dergleichen sind individuell von der Hoflogistik abhängig. Das System zählt zu den langlebigen Systemen, 20-30 Jahre kann es im Boden verweilen (Prognose).

4.6 Bewässerung, Niederschläge und potenzielle Verdunstung

Das Bewässerungsmanagement wurde dem Landwirt überlassen, da Christian Rosnagl seine Flächen am besten kennt, vor Ort ist und die Bewässerung selbst durchführte. Die Entscheidung zur Bewässerung fiel in Abhängigkeit der Niederschlagsmengen. Da die Vegetationsperiode 2020 sehr nass war, konnte lediglich sechsmal in diesem Versuch bewässert werden, s. Tabelle 11.

Tabelle 11: Bewässerungsereignisse 2020, eigene Darstellung

04. Mai	13. Mai	18. Mai	11. Aug.	17. Aug.	20. Sept.
---------	---------	---------	----------	----------	-----------

Die Bewässerungsmenge betrug jeweils 9 l m⁻². Das Wasser konnte aus einem Dorfbrunnen entnommen werden, dann wurde der Tank ans Feld gefahren; in Zukunft wird Grundwasser aus dem eigenen Brunnen verwendet. Innerhalb einer Stunde war die gesamte Fläche bewässert; mit einem Verzug von ca. 20 Minuten war das Wasser am anderen Feld-Ende angekommen. Siehe die Auswirkungen der Bewässerungs- und Regenereignisse auf den Bodenwassergehalt in Kapitel 5.2 und 5.3.

Die lokalen Niederschlagsmengen wurden einmal täglich in Groß Burgstall erfasst (mm).

Die potenziellen Verdunstungsdaten wurden von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, kurz ZAMG, zur Verfügung gestellt. Die ZAMG hat im Rahmen des Projektes WINFORE seit 1961 die potenzielle Verdunstung für ganz Österreich aufgearbeitet (Haslinger 2015). Die Daten liegen in einer räumlichen Auflösung von einem km² und einem zeitlichen Intervall von einem Tag vor. Für den vorliegenden Versuch steht eine Gitterpunktzeitreihe aus Winfore mit der potenziellen Evapotranspiration zur Verfügung. Mittels der Hargreaves-Methode wurden die Verdunstungsdaten in Winfore bis ins Jahr 1961 zurück berechnet. Für diese Methode werden die minimal- und maximal-Temperaturen sowie die Höhenlage benötigt, weshalb diese Methode der Penman-Monteith Methode in diesem Fall vorzuziehen ist, da letztere für eine solche Berechnung weitere Wetterdaten benötigt, die nicht bis ins Jahr 1961 zurück vorhanden sind (Haslinger 2015).

Die erfassten Daten wurden mittels der klimatischen Wasserbilanz ausgewertet, vgl. Kapitel 5.4.

4.7 Messung und Berechnung des Bodenwassergehaltes

Die Messung des Bodenwassergehaltes erfolgte durchschnittlich einmal pro Woche. Alle vier TDR-Sonden wurden mit einem Messgerät ausgelesen, s. Abbildung 8 und Abbildung 9. Ein besonderes Augenmerk lag auf der Bewässerung, sodass der Bodenwassergehalt teilweise vor und nach der Bewässerung erfasst wurde. Eine intensive Messreihe über vier Tage war ebenfalls Bestandteil der Datenaufnahme, um die genaue Verteilung des Wassers nach einer Bewässerung im Boden zu beobachten und daraus auf den besten Auslesezeitpunkt nach der Bewässerung zu schließen. Dieser fiel auf den Tag direkt nach der Bewässerung, da sich das Wasser zügig in allen Schichten verteilte und durch die Kapillarkräfte bis an die Bodenoberfläche gezogen wurde. Am deutlichsten wirkte sich die Bewässerung jedoch in der *Schicht 3 (20-40 cm)* aus, in welcher der Schlauch lag.

Die TDR-Sonden messen den volumetrischen Wassergehalt, so wird der Anteil an Wasser, bezogen auf das Volumen, für die jeweilige Schicht gemessen. Siehe alle Messergebnisse in Kapitel 5.2.

Zur Berechnung der tatsächlichen Wassermenge im Boden wurde der Messwert (MW) mit der Mächtigkeit des Horizontes, welchem er zugeordnet ist, multipliziert. Ein Beispiel: Die oberste Schicht, *Schicht 1*, ist 10 cm tief, somit wird von einem Bodenvolumen von 100 dm³ m⁻² ausgegangen. Die TDR-Sonden Messwerte werden in Vol. % ausgelesen, somit gab der MW von *Schicht 1* direkt die tatsächliche Wassermenge in dm³ m⁻² wieder. Bei einer Mächtigkeit von z. B. 20 cm wurde der MW mit 200 multipliziert, um die tatsächliche Wassermenge zu berechnen und dann durch 100 dividiert, um die Einheit dm³ m⁻² zu erhalten.

Für die Auswertung des Bodenwassergehaltes wurden zunächst die einzelnen Schichten zur **Oberen** und **Unteren Schicht** zusammengefasst. Die *Obere Schicht* umfasst die drei oberen einzelnen Schichten, die *Untere Schicht* die tiefste Schicht. Der Gesamtwassergehalt der *Oberen Schicht* wurde als $(100 * MW1 + 100 * MW2 + 200 * MW3) / 100$ errechnet, wobei

MW1 der Messwert von *Schicht 1* ist usw. Die *Untere Schicht* errechnete sich somit als $(300 * MW4) / 100$. Später folgten punktuelle Auswertungen der einzelnen Schichten von Terminen, an denen signifikante Unterschiede zu vermuten waren.

Anhand des ermittelten gravimetrischen Wassergehaltes, vgl. Kapitel 4.9.2, wurde nach dem gleichen Vorgehen die tatsächlich vorhandene Wassermenge in jeder Schicht berechnet, bezogen auf das Volumen (dm^3) der jeweiligen Schicht.

Für die deskriptive Darstellung der Bodenwassermengen wurde von jeder Variante der Mittelwert jeder einzelnen Schicht errechnet, mit der Mächtigkeit des jeweiligen Horizontes multipliziert und daraufhin die oberen drei Schichten als *Obere Schicht* addiert und alle vier Schichten zur *Gesamten Bodenwassermenge* addiert, s. Abbildung 20 in Kapitel 5.2.



Abbildung 8: TDR-Sonden, verschiedene Größen, eigene Aufnahme



Abbildung 9: Auslese-Gerät der TDR-Sonden, eigene Aufnahme

4.8 Entnahme der Bodenproben

Die Entnahme der Bodenproben fand jeweils direkt am Tag nach der Ernte statt, am 09. Juli, am 11. August und am 20. Oktober 2020. Dafür wurden acht Bohrstöcke in dem für die Bodenproben reservierten Teil der Parzellen 70 cm tief mit dem Schlaghammer in den Boden eingeführt. Das Material aus den Bohrstöcken wurde gemäß der *Schichten 0-10 cm, 10-20 cm, 20-40 cm* und *40-70 cm* in jeweils einen Eimer gegeben und gut vermischt. Mit acht Einstichen kam ausreichend Material zur Analyse zusammen und eine für die Parzelle repräsentative Stichprobe. Von jeder Schicht wurden für die Analyse von P_{CAL} 200 g in ein Sackerl gegeben, dieses Material wurde an der Luft getrocknet. Für die Analyse von N_{min} und dem grav. WG wurden 250 g in ein weiteres Sackerl gegeben, das sofort in einer Kühlbox gekühlt und dann im Labor eingefroren wurde. Die Aufbereitung der Proben erfolgte im Labor, vgl. Kapitel 4.9.

4.9 Methodik Labor

Im Labor wurden die Bodenproben auf P_{CAL} , N_{min} und den grav. Wassergehalt analysiert. Nachfolgend wird die Vorgehensweise geschildert.

4.9.1 Pflanzenverfügbare Phosphor

P_{CAL} wurde an den luftgetrockneten Proben bestimmt, welche nach jedem Schnitt aus jeder Schicht der einzelnen Parzellen entnommen wurden. Zweimal 2,5 g jeder Probe wurden ausgewogen und mit einer Extraktionslösung von 50 ml versetzt. Zusätzlich wurden pro Satz zwei Standardböden analysiert, um einen Referenzwert bei der Messung zu erhalten sowie zwei Blindproben der Extraktionslösung, zur Kontrolle dieser. Für die Extraktionslösung wurde zuerst eine **Vorratslösung** hergestellt, indem

- 77 g Calciumlactat in heißem Deionat gelöst wurden,
- 39,5 g Calciumacetat in heißem Deionat gelöst und dann mit dem gelösten Calciumlactat vermischt wurden und
- 89,5 ml reine Essigsäure dazu gegeben wurden, worauf die Lösung in einem 1 l Messkolben mit Deionat bis zur Markierung aufgefüllt wurde und abkühlte.

Die Vorratslösung wurde in einem 5 l Messkolben mit Deionat verdünnt. Die 5 l insgesamt ergaben die **Extraktionslösung**, welche den pH-Wert 4,1 betragen sollte. Falls nötig, konnte mit Essigsäure auf diesen Wert korrigiert werden.

Die Flaschen, in welche die abgewogenen Proben mit der Extraktionslösung gegeben wurden, wurden verschlossen und für 30 Minuten in den Schüttler gegeben. Dieser war auf 21 Umdrehungen pro Minute eingestellt. Beim Schütteln wurde der Phosphor aus der Probe extrahiert. Im Anschluss wurden die Flaschen kurz stehen gelassen, sodass sich die Probe am Boden absetzte. Darauf wurde die Lösung durch einen Filter gegeben, sodass die Extraktionslösung ohne Verunreinigungen in einer kleinen Laborflasche eingefroren werden konnte. Als die Phosphor-Extrakte aller Proben hergestellt waren, wurden diese in einem Durchgang gemessen.

Der pflanzenverfügbare Phosphor wurde nach der Molybdatmethode bestimmt. Dafür wurde eine Eichgerade hergestellt, gegen welche die Proben auf Phosphat gemessen wurden. Die Grundlage bildete Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4), welches ein Gewicht von $136,08 \text{ g mol}^{-1}$ hat. KH_2PO_4 steht in einem Verhältnis von $136,08 \text{ g mol}^{-1}$ zu $30,97 \text{ g mol}^{-1}$ Phosphor (P); das ergibt $4,394 \text{ g l}^{-1} KH_2PO_4$, welches 1 g l^{-1} P entspricht, also 1000 ppm P. Die Stammeichlösung bestand aus $0,4394 \text{ g KH}_2PO_4$, gelöst in 100 ml Extraktionsmittel (siehe oben). Für die Gebrauchseichlösung wurden 1000 ppm P auf das 20-fache verdünnt, sodass man 50 ppm P, sprich 5 mg P auf 100 ml erhielt, um die Standard- bzw. Gebrauchseichlösung zu kalibrieren. Davon wurden jeweils in 25 ml Kolben 0 ml für 0 ppm gegeben, 2,5 ml für 5 ppm, 5 ml für 10 ppm, 7,5 ml für 15 ppm und 10 ml für 20 ppm Phosphor.

Für die Bestimmung des Phosphors wurde die Ammoniumheptamolybdat-Stammlösung hergestellt: 1,26 g gelöstes Ammoniumheptamolybdat wurden mit 14 ml reiner Schwefelsäure und mit 0,05 g gelöstem Kaliumantimonyltartrat vermischt und in einem 100 ml Messkolben

mit Deionat aufgefüllt. Die sogenannte Stammlösung wurde in einem Verhältnis von 1:10 verdünnt, sprich 100 ml Stammlösung wurden in einem 1 l Messkolben mit Deionat aufgefüllt, damit war die Ammoniumheptamolybdat-Gebrauchslösung hergestellt. Zuletzt wurde die Ascorbinsäure vorbereitet. Hiervon wurden 0,44 g in einen 100 ml Messkolben gegeben und mit Deionat aufgefüllt und gelöst.

Von den aufgetauten Extraktionslösungen wurden je 0,5 ml bzw. 2 ml in separate Erlenmeyerkolben gegeben und mit 8 ml der zuvor hergestellten Ammoniumheptamolybdat-Gebrauchslösung und 1 ml gelöster Ascorbinsäure versetzt. Die Substrate in den Erlenmeyerkolben wurden gut geschüttelt. Nach 15 Minuten setzte bei Raumtemperatur eine Farbreaktion ein, die Stärke der Blau-Färbung ließ auf die Höhe des pflanzenverfügbaren Phosphorgehaltes schließen. Mittels Spektralphotometer (Wellenlänge 600 nm) wurde dieser gemessen. 300 µl jeder einzelnen Probe wurden dafür in die Mikrotiterplatte pipettiert. Eine Standardreihe wurde am Anfang und Ende auf jeder Platte zur Kalibrierung mitgemessen. Anhand der spektralphotometrischen Messung wurden die Rohdaten erfasst und in die Einzelkonzentration in µg ml⁻¹ umgerechnet (ÖNORM L 1087 2006). Das Ergebnis der Einzelkonzentration wurde in Bezug zur eingesetzten Extraktionslösung sowie der trockenen Einwaage gesetzt, um die Menge an pflanzenverfügbarem Phosphor in mg kg⁻¹ zu erhalten. Folgende Formel wurde verwendet:

Gemessene Einzelkonzentration (µg ml⁻¹) * 50 ml Extraktionslösung * 1000 g kg⁻¹ Boden / Einwaage (g) = P_{CAL} in µg kg⁻¹ Boden. Das Ergebnis dividiert durch 1000 ergibt P_{CAL} in mg kg⁻¹ Boden. Siehe Ergebnisse in Kapitel 5.5.

4.9.2 Mineralischer Stickstoff und gravimetrischer Wassergehalt

N_{min} und der grav. WG wurden aus den tiefgefrorenen Proben bestimmt, welche nach jedem Schnitt aus jeder Schicht der einzelnen Parzellen entnommen wurden. Bei N_{min} wird zwischen Ammonium-Stickstoff und Nitrat-Stickstoff unterschieden. Beide Stickstoff-Formen sind pflanzenverfügbar. In einer Probenserie des 1. Schnitts wurde Ammonium analysiert. Da alle Werte im Bereich des Minimums lagen, wurde Ammonium bei Schnitt 2 und 3 nicht weiter bestimmt.

Für die Messung von Ammonium- und Nitratstickstoff wurden zunächst aus jeder Bodenprobe Extrakte hergestellt. Von jeder Probe wurden zweimal (Doppelbestimmung) 50 g feldfeuchter Boden in 500 ml Kunststoffschüttelflaschen eingewogen. Dazu wurden 200 ml Extraktionslösung gegeben, dann wurden die Flaschen im Überkopfschüttler bei 21 Umdrehungen pro Minute 30 Minuten lang geschüttelt. Im Anschluss setzten sich die Feststoffe nach einer kurzen Wartezeit ab und die Extraktionslösung wurde in Kunststoffflaschen filtriert und eingefroren. Die Extraktionslösung bestand aus 1,84 g Calciumchlorid-Dihydrat (CaCl₂ · 2H₂O) pro Liter Deionat; das entspricht 0,0125 mol l⁻¹. (CaCl₂ · 2H₂O hat 147,02 g mol⁻¹).

Für die Bestimmung von Ammonium wurde zunächst eine **Mischreagenz** vorbereitet. Diese bestand aus Deionat, 0,3 mol Natriumhydroxid (NaOH = 40,0 g mol⁻¹ bei 1,2 g pro 100 ml

NaOH) und einer Nitroprussid-Natriumsalicylat-Lösung (8,5 g Natriumsalicylat mit 0,06 g Nitroprussid-Natrium-Dihydrat in Deionat gelöst, insgesamt 50 ml) zu jeweils gleichen Anteilen. Die Mischreagenz durfte erst direkt vor Verwendung in der angegebenen Reihenfolge gemischt werden. Außerdem wurde **Dichlorisocyanursäure** benötigt; davon wurden 0,05 g mit 50 ml Deionat gemischt.

Zur Erstellung der **Eichgeraden** wurde zunächst eine Stammeichlösung aus Ammoniumchlorid (NH_4Cl) mit 1000 ppm Stickstoff (N) hergestellt. 1 mol Stickstoff besteht aus $14,01 \text{ g mol}^{-1}$ N, Ammoniumchlorid besteht aus $53,50 \text{ g mol}^{-1}$ NH_4Cl . Werden Stickstoff und Ammoniumchlorid miteinander ins Verhältnis gesetzt, enthalten 381,90 mg pro 100 ml 1000 ppm N. So wurden 382 mg NH_4Cl in 100 ml Deionat gelöst. Darauf wurden der Stammeichlösung 5 ml entnommen und wiederum bis 100 ml mit Deionat aufgefüllt, diese stellte die Gebrauchseichlösung dar, mit 50 ppm N. Für die Erstellung der Eichreihe wurden dieser 0, 125, 250, 500, 750 und 1000 μl entnommen und jeweils in 25 ml Kolben gegeben und mit Calciumchlorid aufgefüllt, sodass die Standardreihe aus 0 – 0,25 – 0,5 – 1 – 1,5 – 2 ppm N bestand.

Für die Messung wurde als erstes zweimal die Standardreihe pipettiert (je 100 μl), zum Kalibrieren, dann zum Messen. Dann folgten von jeder Probe doppelte Ansätze, jeweils 100 μl . Mit Mehrkanalpipetten wurden 50 μl der Mischreagenz, Herstellung s. o. und 40 μl der Dichlorisocyanursäure-Lösung dazu gegeben. Im Inkubator wurden die Mikrotiterplatten bei 25° für 30 Minuten geschüttelt und im Anschluss sofort bei 660 nm vermessen (ÖNORM L 1091 2020).

Für die Bestimmung von Nitrat wurde nach dem gleichen Prinzip vorgegangen, jedoch wurden andere Reagenzien verwendet: Zuerst wurde eine 1 mol starke Wasserstoffchlorid-Lösung (HCl) hergestellt, indem 5 ml 32%ige HCl bis zu 50 ml mit Deionat vermischt wurden. Darauf wurde die Lösung zu 400 mg **Vanadium(III)-chlorid** gegeben, sodass sich dieses löste, dann wurde es filtriert. Für die NEDD Reagenz wurden 50 mg N-(1-Naphthyl)ethylendiamin-dihydrochlorid mit bis zu 250 ml Deionat vermischt. Dann wurde eine 3 mol starke Wasserstoffchlorid-Lösung hergestellt, indem 150 ml 32%ige HCl mit bis zu 500 ml Deionat vermischt wurden. Diese wurde dann zu 5 g Sulfanilsäure gegeben und bis zu 500 ml aufgefüllt. Die NEDD Reagenz und Sulfanilsäure stellten die **Mischreagenz** dar, welche unmittelbar vor Verwendung zu gleichen Volumenanteilen gemischt wurde.

Zur Erstellung der **Eichgeraden** wurde Kaliumnitrat (KNO_3) verwendet. Dieses besteht aus $101,11 \text{ g mol}^{-1}$ und wurde mit Stickstoff ($14,01 \text{ g mol}^{-1}$) ins Verhältnis gesetzt, sodass 721,70 mg KNO_3 pro 100 ml 1000 ppm N enthalten. 722 mg KNO_3 wurden mit Deionat bis zu 100 ml aufgefüllt und stellten die Stammeichlösung dar. Davon wurden 5 ml mit bis zu 100 ml Deionat verdünnt, sodass die Gebrauchseichlösung entstand, welche aus 50 ppm N bestand. Davon wurden 0, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 und 2500 μl jeweils in 25 ml Kolben gegeben und mit Calciumchlorid aufgefüllt, sodass die Standardreihe aus 0 – 0,5 – 1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 7 ppm N bestand.

Für die Messung wurde auch hier zunächst zweimal die Standardreihe (100 μl) pipettiert, zum Kalibrieren, dann zum Messen und darauf jeweils zwei Ansätze einer Probe (100 μl). Mit Mehrkanalpipetten wurden jeweils 100 μl Vanadium(III)-chloridlösung, Herstellung s. o. und

100 µl der Mischreagenz, Herstellung s. o., dazu gegeben. Die Mikrotiterplatten wurden bei 37° für 30 Minuten in den Inkubator gegeben und im Anschluss sofort bei 540 nm vermessen (ÖNORM L 1091 2020).

Sowohl Ammonium- als auch Nitratstickstoff wurden in µg ml⁻¹ gemessen. Für die Zieleinheit **N_{min} in mg kg⁻¹ Trockenboden** wurde folgende Berechnung durchgeführt:

$$\mathbf{N_{min} (mg\ kg^{-1})} = (((\text{Ammonium } (\mu\text{g ml}^{-1}) - \text{BW } (\mu\text{g ml}^{-1})) + (\text{Nitrat } (\mu\text{g ml}^{-1}) - \text{BW } (\mu\text{g ml}^{-1})) * 200 \text{ ml Gesamtvolumen des Extraktes} * 1000 \text{ g kg}^{-1} \text{ Trockenboden} / (\text{Einwaage}_{\text{feucht}} (\text{g}) / \text{Trocksubstanzfaktor})) / 1000$$

* BW = Blindwert

* Trockensubstanzfaktor = $\text{Einwaage}_{(\text{feucht})} / \text{Auswaage}_{(\text{trocken})}$

Für die Berechnung von **N_{min} in kg ha⁻¹** wurde folgende Formel angewendet:

$$\mathbf{N_{min} (kg\ ha^{-1})} = ((\text{Ammonium } (\mu\text{g ml}^{-1}) - \text{BW } (\mu\text{g ml}^{-1})) + (\text{Nitrat } (\mu\text{g ml}^{-1}) - \text{BW } (\mu\text{g ml}^{-1})) * 200 \text{ ml Gesamtvolumen des Extraktes} / (\text{Einwaage}_{\text{feucht}} (\text{g}) / \text{Trocksubstanzfaktor}) * \text{Tiefe} (\text{dm}) * \text{Bodendichte} (\text{kg dm}^{-3})$$

Für die Tiefe (dm) wurde die jeweilige Schicht herangezogen, aus der das Ergebnis stammte. Als Lagerungsdichte wurde für die beiden oberen Schichten ein Wert von 1,4 kg dm⁻³ verwendet, für die unteren beiden Schichten der Wert von 1,6 kg dm⁻³. Dafür ausschlaggebend waren eigene Messungen des grav. und vol. WGs, welche sich meistens anhand der höheren Faktoren von 1,6 – 1,8 kg dm⁻³ ineinander umrechnen ließen.

Für die **Ermittlung des pH-Wertes** wurde 10 g lufttrockene Feinerde von jeder Probe des 1. Schnitts in Schüttelflaschen abgewogen und mit 25 ml 0,01 mol CaCl₂ · 2H₂O versetzt. 30 Minuten lang wurden die Flaschen geschüttelt, dann mehrere Tage stehen gelassen, sodass sich die Erde gut absetzen konnte. Mit dem pH-Meter wurde der pH-Wert gemessen, dieses ist ein elektrochemisches Messgerät. Anhand des pH-Wertes wird der Säure- und Basengehalt des Bodens ausgedrückt. Zwischen jeder einzelnen Messung wurde die Messelektrode mit Deionat abgespült (VDLUF A Methodenbuch 2012). Siehe Ergebnisse im Anhang, Kapitel 10.5.

Für die Bestimmung des gravimetrischen Wassergehaltes wurden 20 g der eingefrorenen Probe in eine Petrischale eingewogen. Für 24 h verblieben die Proben bei 105°C im Trockenschrank und wurden im Anschluss auf Gewichtsverluste ausgewogen. Mit folgender Formel wurde der grav. WG für jede einzelne Schicht berechnet:

Gravimetrischer Wassergehalt:

$$= \text{Wassermasse} / \text{Bodentrockenmasse} = (\text{EW (-Petrischale)} - \text{AW (-Petrischale)}) / \text{AW}$$

* EW = Einwaage

* AW = Auswaage

4.10 Ernteprozedere

In der Vegetationsperiode 2020 fanden insgesamt drei Schnitte statt. Die erste Ernte war mit dem 08. Juli spät, bedingt durch die vielen Niederschläge, da das Feld vorher nicht befahrbar war. Ausschlaggebende Kriterien für den Erntezeitpunkt sind zum einen der Anteil der gelben Blätter, zum anderen, wenn die Minze anfängt in den Blütenstand überzugehen. Heuer waren jedoch die Niederschläge das entscheidende Kriterium für den späten Erntetermin. Die Ernte der Parzellen erfolgte parallel zur Betriebsernte, zum einen, weil es die Trocknungsabläufe vereinfachte, zum anderen, weil der Versuch möglichst nah am Betriebsgeschehen durchgeführt werden sollte. Alle zehn Parzellen wurden manuell mit Gartenscheren geerntet. Die Parzellen wurden dafür um einen halben Meter verlängert, um ausreichend Masse für die Analysen zu erhalten. Die Schnitthöhe wurde auf die maschinelle Schnitthöhe angepasst. Da die Minze zum ersten Schnitt eine Höhe von bis zu 80 cm erreichte (beide Varianten), s. Abbildung 10, wurde auf einer Höhe von 30 cm abgeerntet, s. Abbildung 11, um den Stängelanteil sowie den Anteil der gelben Blätter möglichst gering zu halten.



Abbildung 10: Wuchshöhe 1. Schnitt, eigene Aufnahme



Abbildung 11: Schnitthöhe 1. Schnitt, eigene Aufnahme

Ein anschließender Reinigungsschnitt blieb allerdings aus, sodass der Stängelanteil im zweiten Schnitt entsprechen hoch war.

Nachdem ein paar Parzellen abgeerntet waren, wurde sofort am Hof die Frischmasse der jeweiligen Parzelle gewogen. Das Feld liegt ca. 500 m vom Hof entfernt, sodass die Masseverluste durch die sofort einsetzende Verdunstung gering sein sollten. Anschließend wurde das Erntegut auf beschrifteten Rahmen verteilt, je 1-2 Rahmen pro Parzelle, und in der Trocknungsanlage am Hof getrocknet. Da das Parzellengut nicht zerkleinert wurde und die trockenen Stängel zum Auszählen der Blatt-Stängel-Verhältnisse relevant waren, dauerte der

Trocknungsprozess einige Tage, bis vor allem die dicken Stängel gut durchgetrocknet waren. Die Trocknungstemperatur betrug ca. 40°C und wurde über die Sonneneinstrahlung, welche das schwarze Dach aufheizt, sowie die Umgebungsluft, welche zwischen den zwei Schichten des Daches in die Trocknungsanlage strömt, gewonnen. Betrug die Trocknungstemperatur weniger als 40°C, wurde zusätzliche Hitze über einen Öl-Ofen zugeführt. Das Parzellengut wurde mit der gleichen Temperatur wie die restliche Pfefferminze getrocknet.

Die Pfefferminze, die nicht Teil des Versuchs war, wird zuerst zerkleinert, dann windgesichtet, sodass die schweren Stängelanteile aussortiert werden und über ein Förderband in die Trocknungsanlage geleitet. Diese besteht insgesamt aus drei Ebenen. Nach einigen Stunden auf der obersten Ebene, werden die einzelnen Schienen um 90° gedreht, sodass die Minze eine Ebene tiefer fällt und nun von der anderen Seite getrocknet wird. Nach dem gleichen System fällt die Pfefferminze auf die unterste Ebene. Nach ca. 24 Stunden ist die Ware getrocknet, dann wird diese über Förderbänder in große Sackerl abgefüllt. Siehe Ernteprozess in Abbildung 12 bis Abbildung 17.



Abbildung 12: Erntemaschine, eigene Aufnahme



Abbildung 13: Pfefferminze wird angeliefert und zerkleinert, eigene Aufnahme



Abbildung 14: zerkleinerte Pfefferminze z. Windsichten nach oben transportiert, eigene Aufnahme



Abbildung 15: Trockenraum, eigene Aufnahme



Abbildung 16: Parzellengut wird separat in Rahmen getrocknet, eigene Aufnahme



Abbildung 17: Trockengut fällt eine Ebene tiefer, eigene Aufnahme

Der zweite und dritte Schnitt wurde nach dem gleichen Prinzip durchgeführt. Der zweite Schnitt fand einen Monat später, am 10. August statt. Die bewässerte Variante erreichte hier eine Höhe von guten 30 cm bis zu max. 50 cm, die unbewässerte Variante erreichte maximal eine Höhe von 30 cm. Hier betrug die Schnitthöhe ca. 10 cm. So wurden alle alten Stängelanteile vom ersten Schnitt ebenfalls mit geerntet, was den Stängelanteil immens in die Höhe trieb. Dieses ermöglichte der Pfefferminze jedoch einen erneuten kräftigen Aufwuchs.

Der dritte Schnitt fand am 19. Oktober statt. Hier war die Pfefferminze der bewässerten Variante ca. 40 cm hochgewachsen, die der unbewässerten Variante knapp 30 cm hoch. Die

Schnitthöhe lag hier etwas höher als beim 2. Schnitt, bei ca. 10-15 cm. Im Gegensatz zu den vorherigen Ernten war das Erntewetter mit 8-10°C schon relativ kühl und die Tau-Bildung dadurch höher, was Auswirkungen auf das Gewicht der Frischmasse haben könnte, da die Minze relativ feucht abgeerntet wurde.

4.11 Analyse der Trockenmasse

Nachdem das Erntegut der Parzellen nach 3-4 Tagen am Hof getrocknet war, wurde es in Sackerl abgefüllt und zu Sonnentor zum Rebelln transportiert. Mit vielen helfenden Händen wurden manuell alle Blätter von den Stängeln getrennt und die gelben / braunen Blätter separat sortiert, um das Blatt-Stängel-Verhältnis, den Anteil der braunen Blätter sowie die gesamte Trockenmasse auszuwiegen. In manchen Parzellen war der Wildtyp vorzufinden, welcher direkt separat abgeerntet und auch getrocknet wurde. Dieser wurde bei der Analyse vernachlässigt, war aber für das gesamte Trockengewicht der Parzellen relevant.

Vom 1. und 2. Schnitt wurde jeweils eine Mischprobe der bewässerten Variante à 1000 g und eine Mischprobe der unbewässerten Variante à 1000 g über Sonnentor in das Labor Gesellschaft zur Bioanalytik mbH, GBA, eingeschickt, zur Analyse auf

- den aw-Wert
- den Restfeuchtegehalt
- Pestizide
- Mykotoxine (Aflatoxine / Ochratoxin A)
- Mikrobiologie
- den Öl-Bestandteil (Menthol, Menthon und weitere)
- Schwermetalle (Blei, Cadmium, Quecksilber)
- und den Aschegehalt.

Die Mischproben setzten sich aus dem Parzellengut aller bewässerten bzw. unbewässerten Parzellen zusammen. Dafür wurde von jeder Parzelle das jeweils ausgewogene Blatt-Stängel-Verhältnis anteilig auf 200 g herunter gerechnet, sodass 5 Parzellen einer Variante zusammen 1000 g ergaben.

Ein Befund von Pestiziden wurde nicht erwartet, dennoch waren diese Bestandteil der Analyse, falls durch Abdrift Spritzmittel auf das Feld gelangten. Der Einsatz chemisch-synthetischer Pestizide ist im Demeter-Anbau untersagt, weshalb von einem pestizidfreien Erntegut auszugehen wurde.

Vom 3. Schnitt wurden von vier Parzellen der bewässerten Variante und vier Parzellen der unbewässerten Variante Einzelanalysen durchgeführt. Dafür wurden je 1000 g Trockenmasse, anteilig des Blatt-Stängel-Verhältnisses, ins Labor zur Analyse auf

- den aw-Wert
- den Restfeuchtegehalt
- die Öl-Bestandteile und
- den Aschegehalt, eingeschickt.

Anhand von Mischproben, eine bestehend aus dem Erntegut der vier bewässerten Parzellen und eine andere zusammengesetzt aus dem Erntegut der vier unbewässerten Parzellen, wurden die Mykotoxine, die Mikrobiologie und die Schwermetalle analysiert, an einer gesamten Mischprobprobe (bewässert und unbewässert) die Pestizide. Die Parzellen 3 (= bewässert) und 8 (= unbewässert) waren nicht Bestandteil der Einzelanalysen, der Mischproben und der Gesamtprobe; diese wurden über die TB Unterfrauner GmbH für eine Ökologische Pflanzencharakterisierung herangezogen, zur Nährstoffanalyse der trockenen Pflanzen. Daraus konnte der Nährstoffentzug pro Fläche abgeleitet werden, vgl. Kapitel 5.8.

Wassernutzungseffizienz

Die WNE wurde für den 3. Schnitt ermittelt, da die Ertragsmengen der trockenen Blätter zum 1. Schnitt zwischen den Varianten ähnlich hoch ausfielen und vor dem 2. Schnitt nicht bewässert wurde. Die WNE bezieht sich auf den Trockenmasseertrag und wurde anhand folgender Formel ermittelt (Schittenhelm 2009, S. 3):

$$\text{WNE (kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}) = \text{Mehrertrag (kg ha}^{-1}) / \text{Bewässerungsmenge (mm)}$$

4.12 Verkostung

Die Verkostung wurde mit drei Expertinnen von Sonnentor durchgeführt, welche regelmäßig neue Produkte auf ihre Qualität sowie den Geschmack überprüfen, bevor diese zugelassen werden. Anhaltspunkt für die Bewertung ist ein Produkt aus dem Sortiment, das bereits auf dem Markt erhältlich ist. Zum Teil werden dafür besonders gut bewertete Exemplare aufgehoben. Für die Proben dieses Versuches wurde der Pfefferminztee eines anderen österreichischen Landwirtes als Standardprobe eingesetzt. Verkostet wurden 6 Mischproben, je eine Mischprobe bewässert und unbewässert pro Schnitt. Für die Zubereitung der Probe wurde je ein gehäufte Esslöffel mit 200 ml kochendem Wasser aufgegossen, die Ziehzeit des Tees betrug 7 Minuten. Die erste Verkostungsrunde erfolgte bei ca. 60°C, zuletzt befanden sich die Verkostungsproben bei Raumtemperatur, bei welcher der Geschmack sehr deutlich wahrgenommen werden konnte. Die Proben wurden zügig hintereinander verkostet, um diese gut untereinander vergleichen zu können. Bewertet wurde die Optik der Blätter, die Farbe des Tees sowie der Geschmack, welcher anhand von vier Kriterien, jeweils auf einer Skala von 0-10, beurteilt wurde. Die Kriterien waren die Menthol- bzw. Menthon-Note, sprich die *typische Pfefferminznote*, die *Süße* der Pfefferminze, die *herbe Note* und die *krautige Note*. Siehe die Ergebnisse in Kapitel 5.9.

4.13 Analyse des Wurzelbildes

Die Analyse des Wurzelbildes erfolgte am 25. November 2020. Der späte Zeitpunkt wurde durch die vielen Niederschläge zuvor bedingt. Dennoch war das Feld nass; dadurch konnte leicht ein grobes Loch in die Tiefe gegraben werden. Die Auswahl der Standorte der Profile fiel in die Nähe der beiden mittleren Parzellen jeder Variante, da alle zusätzlichen Analysen, vgl. die Pflanzenanalyse in Kapitel 5.8 sowie die Ökologische Basischarakterisierung im

dann wurde die Variable mit „_neu_2“ betitelt. Das Signifikanzniveau lag bei allen Tests bei 5 %.

4.14.1 Bodenwassergehalt

Anhand der gemessenen und ausgewogenen Bodenwassergehalte, volumetrisch (vol. WG) und gravimetrisch (grav. WG), wurden für die statistische Auswertung die tatsächlich vorhandenen Wassermengen in jeder Schicht berechnet, vgl. Kapitel 4.7.

Der volumetrische Wassergehalt wurde zunächst anhand von Varianzanalysen der *Gesamten*, *Oberen* und *Unteren Schicht* ausgewertet. Beim gravimetrischen Wassergehalt wurden zusätzlich statistische Tests anhand der einzelnen Schichten durchgeführt. Die signifikanten Ergebnisse des volumetrischen und gravimetrischen Wassergehaltes bildeten die Entscheidungsgrundlage für weitere statistische Auswertungen der einzelnen Schichten des volumetrischen Wassergehaltes. Die einzelnen Schichten wurden somit nur zu den Messterminen ausgewertet, an denen signifikante Unterschiede zu erwarten waren. Das primäre Modell sowohl für den volumetrischen als auch den gravimetrischen Wassergehalt war die zweifaktorielle ANOVA. Diese wurde der einfaktoriellen ANOVA zunächst vorgezogen, um die unerklärte Varianz anhand der zwei Faktoren zu verringern. Den ersten Faktor stellte die *Bewässerung (ja / nein)* dar, den zweiten Faktor der Faktor *Block*, welcher anhand seiner Abstufung (1, 2, 3, 4, 5) den Gradienten des Feldes beschrieb. War der Einfluss des Faktors *Block* nicht entscheidend, also lag der *p-Wert* über ca. 10 %, wurde die einfaktorielle ANOVA verwendet. Anhand der Residuen wurde sowohl bei der zweifaktoriellen als auch bei der einfaktoriellen ANOVA die Voraussetzung der Varianzhomogenität geprüft. War diese beispielsweise bei der einfaktoriellen ANOVA nicht erfüllt, das Ergebnis aber signifikant, wurde im Einzelfall trotzdem das Ergebnis der zweifaktoriellen ANOVA verwendet, auch wenn der Einfluss des Faktors *Block* über 10 % lag. (Solche Einzelfälle sind im Anhang, Kapitel 10.7 und 10.8, markiert.) Die Modelle hinter den signifikanten Ergebnissen sind in den Diagrammen im Ergebnisteil farbig markiert. Die verwendeten Modelle hinter den nicht signifikanten Ergebnissen sowie alle numerischen Werte sind im Anhang, in Kapitel 10.7 und 10.8, zu finden.

4.14.2 Klima-Daten

Neben der Berechnung der klimatischen Wasserbilanz wurde mittels Streudiagramm und Spearman Korrelation der Zusammenhang zwischen dem Niederschlag und den Bodenwassergehalten berechnet. Die Spearman Korrelation wurde ausgewählt, weil die Daten nicht normalverteilt waren.

4.14.3 Bodenproben

Die Ergebnisse der Bodenproben von P_{CAL} und N_{min} wurden, sofern der Stichprobenumfang $N \geq 8$ war, mittels einfaktorieller ANOVA in jeder einzelnen Schicht zwischen den beiden Varianten auf Unterschiede zwischen den Behandlungen getestet. Den Faktor stellte die

Bewässerung dar. Eine zweifaktorielle ANOVA mit dem zusätzlichen Faktor *Block* wurde nicht verwendet, da die Blockeffekte keinen entscheidenden Einfluss darstellten.

4.14.4 Ernte-Ergebnisse

Die Ernte-Ergebnisse betreffend wurden sämtliche Erträge zunächst auf den Hektar hochgerechnet und dann mittels einer einfaktoriellen ANOVA zwischen den beiden Varianten bewässert und unbewässert auf Signifikanzen analysiert. Dabei wurde die Varianzhomogenität anhand von Residuenplots überprüft. In Situationen von nicht signifikanten Ergebnissen wurde das Kriterium der Varianzhomogenität vernachlässigt. Beim 2. Schnitt ergab die ANOVA der Parameter *Frischmasse* und *TM Blätter* jedoch signifikante Ergebnisse ohne Varianzhomogenität im Residuenplot, sodass diese Daten zuerst mit $\ln(x+1)$ logarithmisch transformiert und daraufhin mittels einfaktorieller ANOVA analysiert wurden, s. Ergebnisse in Kapitel 5.7.2. Die neuen Residuenplots erfüllten die Voraussetzung der Varianzhomogenität etwas besser, sodass diese Ergebnisse verwendet wurden. Von einer zweifaktoriellen ANOVA mit einem zusätzlichen festen Faktor *Block*, welcher den Gradienten im Feld berücksichtigen und die unerklärte Varianz verringern sollte, wurde abgesehen, da dies zu weniger signifikanten Ergebnissen führte und die Blockeffekte ausblieben.

Die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der bewässerten und unbewässerten Pfefferminze sollten mittels der Co-Variable *Bedeckungsgrad* berücksichtigt werden, um den Wachstumsvorsprung der unbewässerten Variante zu mindern. Jedoch blieb der erhoffte Effekt aus und die signifikanten Ergebnisse verringerten sich sogar, sodass keine Berechnungen inklusive einer Co-Variable weiterverfolgt wurden.

Weitere inhaltliche Analyse-Ergebnisse, welche über Sonnentor und die GBA zur Verfügung standen, wurden überwiegend in Säulendiagrammen zur besseren Vergleichbarkeit abgetragen und mit den restlichen Ergebnissen in Bezug gesetzt. Lediglich der Ölgehalt, der aw-Wert, die Restfeuchte und der Aschgehalt des 3. Schnitts ließen sich anhand des *t*-Tests auf signifikante Unterschiede zwischen den Behandlungen prüfen, da pro Variante vier Wiederholungen zur Verfügung standen. Jedoch ist die statistische Aussagekraft aufgrund des kleinen Stichprobenumfangs gering.

4.14.5 Blatt-Stängel-Verhältnis

Das Blatt-Stängel-Verhältnis wurde zunächst als $(\text{TM Blätter} + \text{TM braune Blätter}) / \text{TM Stängel}$ für jede einzelne Parzelle berechnet und dann mittels einfaktorieller ANOVA ausgewertet. Von einer Auswertung per zweifaktorieller ANOVA wurde abgesehen, da der *Blockeffekt*, s. o., ausblieb.

5 Ergebnisse

5.1 Niederschlagsmengen und Bewässerungsereignisse

Die Vegetationsperiode 2020 war von vielen Niederschlägen geprägt, sodass die Bewässerungsereignisse gering ausfielen, s. Abbildung 19.

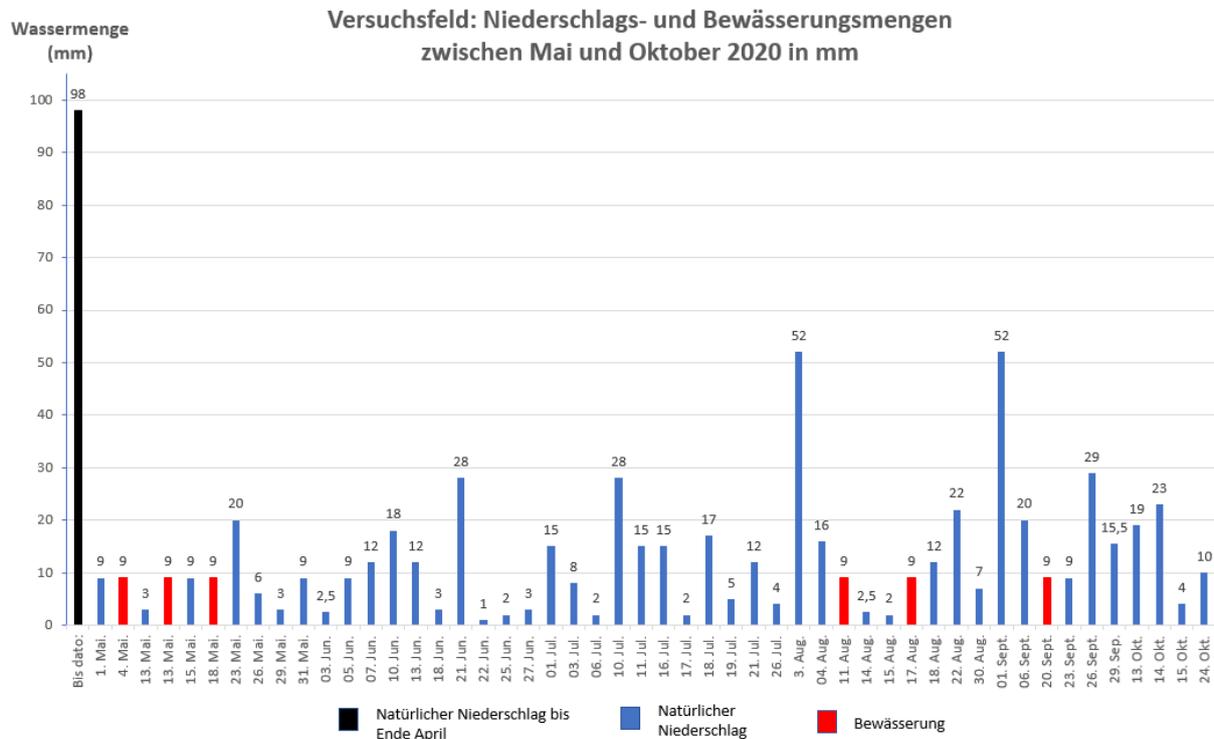


Abbildung 19: Natürlicher Niederschlag und Bewässerungsereignisse, eigene Darstellung²

Das Frühjahr 2020 war recht trocken, in den ersten vier Monaten des Jahres gab es knapp 100 mm Niederschlag (schwarze Säule). So war der Boden zu Beginn des Versuches Anfang Mai recht hart und es konnte dreimal im Mai bewässert werden (rote Säulen). Anhand der natürlichen Niederschlagsmengen (blaue Säulen) zeichnete sich eine sehr feuchte Vegetationsperiode ab, sodass die weiteren drei Bewässerungsereignisse erst im Spätsommer folgten. Zwischen dem 01. Mai und dem 24. Oktober, der Zeit der Versuchsdurchführung, fielen 567,5 mm natürlicher Niederschlag, zusätzlich wurde mit insgesamt 54 mm bewässert.

5.2 Volumetrischer Bodenwassergehalt

Die mittels TDR-Sonden ausgelesenen Bodenwassergehalte wurden in mm umgerechnet und sind in Abbildung 20 dargestellt (Ausreißer wurden hierbei **nicht** berücksichtigt, vgl. die Variablen mit dem Zusatz „_neu“). Abgebildet sind die *Obere Schicht (0-40 cm)* (hellblau für die bewässerte Variante, gelb für die unbewässerte Variante), die *Untere Schicht (40-70 cm)*

² x-Achse **nicht** linear skaliert

(dunkelblau für bewässert, orange für unbewässert) und die *Gesamte Schicht (0-70 cm)* (dunkelgrau für bewässert, braun für unbewässert). Signifikante Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA sind rot gekennzeichnet, signifikante Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA schwarz. Die genauen Messwerte sind im Anhang in Kapitel 10.6 zu finden, die Ergebnisse der statistischen Auswertung sowie die Modelle hinter den nicht signifikanten Ergebnissen in Kapitel 10.7.

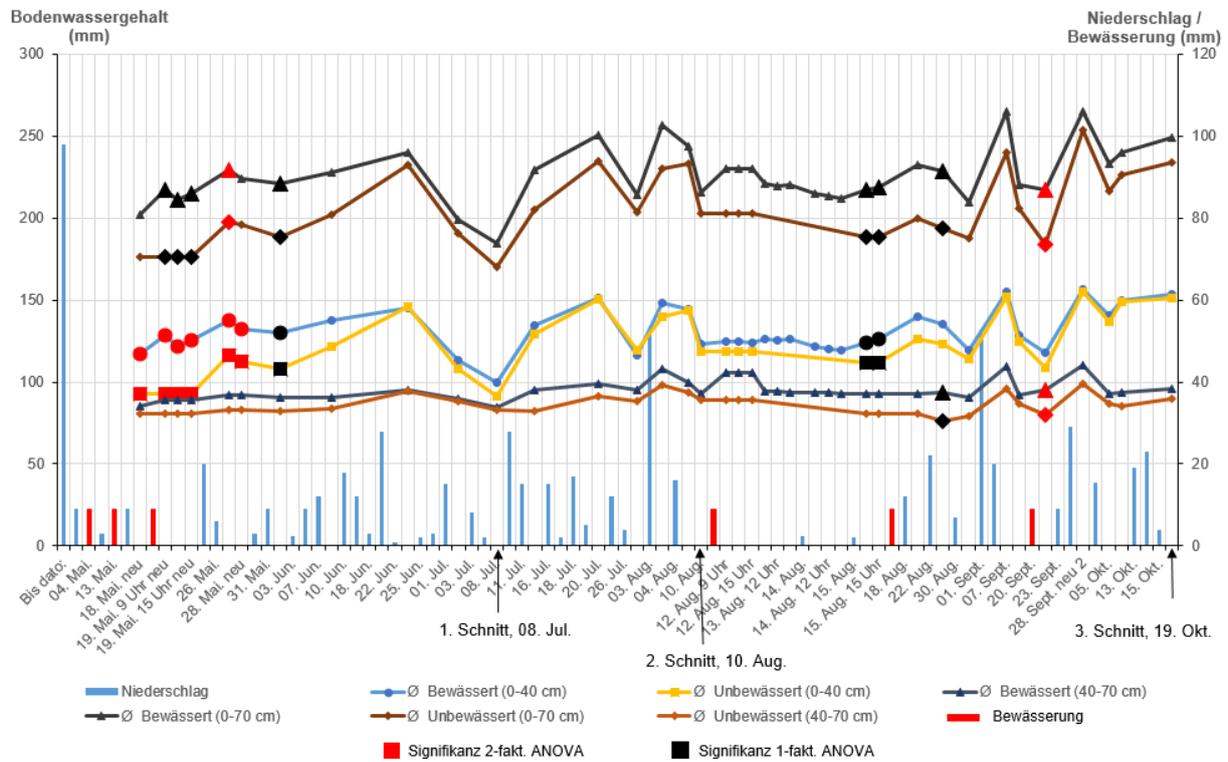


Abbildung 20: Volumetrischer Bodenwassergehalt, Varianzanalyse, eigene Darstellung³

Die Auswirkungen der Regenereignisse sind gut erkennbar. Die Bodenwassergehalte änderten sich in der *Oberen Schicht* stark, in der *Unteren Schicht* kaum. Differenzen zwischen den Varianten waren vor allem zu Beginn der Versuchsdurchführung im Mai in der *Oberen Schicht* und somit auch in der *Gesamten Schicht* zu beobachten. Die Unterschiede fielen signifikant aus. Im weiteren Verlauf waren die Bodenwassergehalte beider Varianten zum Großteil sehr ähnlich, vor allem in den oberen 40 cm. Am 15. August 2020 wurden zwei signifikante Ergebnisse in der *Oberen Schicht* ausgewertet, am 25. August und 21. September 2020 zwei weitere in der *Unteren Schicht*, welche die einzigen signifikanten Unterschiede in dieser Schicht darstellten, vgl. von Abbildung 20. Die signifikanten Unterschiede in der *Oberen* und *Unteren Schicht* sind jeweils in den signifikanten Ergebnissen der *Gesamten Schicht* wiederzufinden, bis auf das Messergebnis vom 28. Mai, welches nur in der *Oberen Schicht* als signifikant nachgewiesen werden konnte.

³ x-Achse **nicht** linear skaliert

Die soeben beschriebenen Ergebnisse wie auch die signifikanten Ereignisse des gravimetrischen Wassergehaltes im folgenden Kapitel 5.3 waren die Entscheidungsgrundlage für weitere Varianzanalysen der einzelnen Schichten des volumetrischen Wassergehaltes, siehe Abbildung 21 bis Abbildung 23, um die signifikanten Unterschiede genauer zu erfassen. Die x-Achsen sind jeweils nicht linear skaliert.

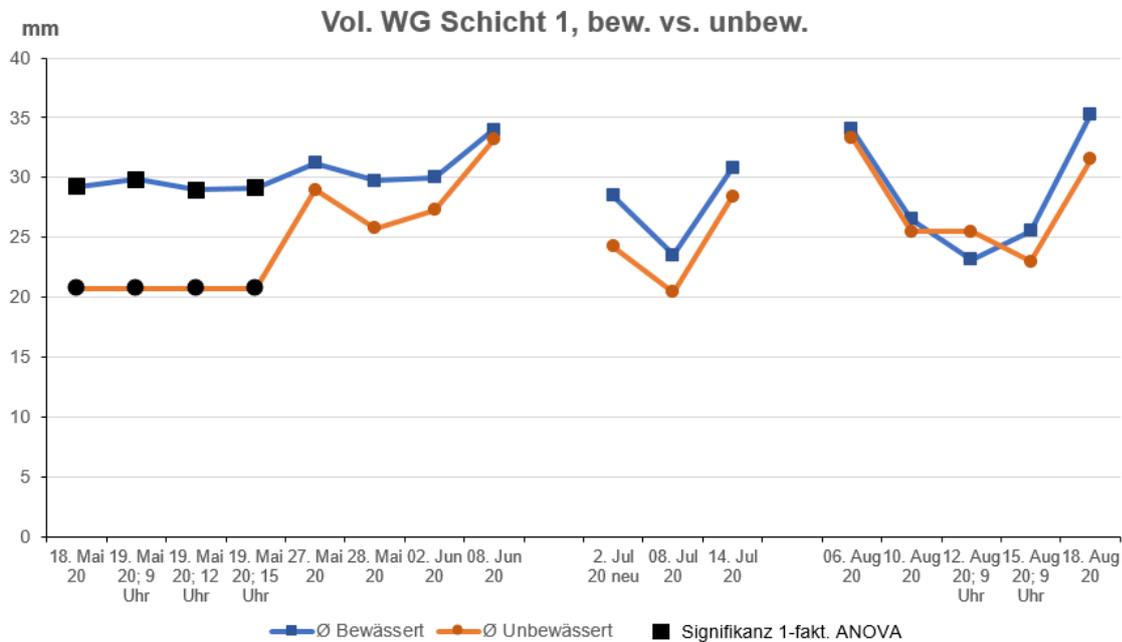


Abbildung 21: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 1 (0-10 cm), eigene Darstellung

Schicht 1 bezieht sich auf 0-10 cm des Bodenprofils. Die Wassergehalte der beiden Varianten unterschieden sich am 18. und 19. Mai 2020 signifikant voneinander. Im weiteren Verlauf der Versuchsperiode waren die Wassergehalte der beiden Varianten ähnlich hoch.

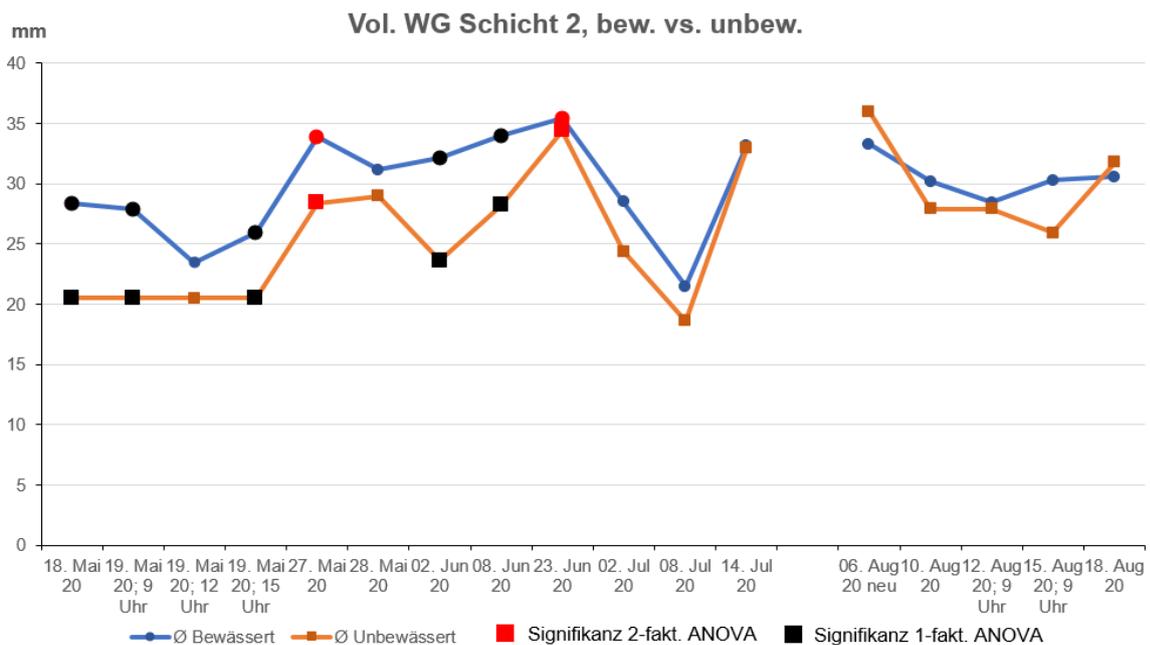


Abbildung 22: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 2 (10-20 cm), eigene Darstellung

Schicht 2 beschreibt 10-20 cm des Bodenprofils. Hier wurden weitere signifikante Ereignisse ermittelt, auch solche der zweifaktoriellen ANOVA. Die Signifikanzen lagen auch hier zu Beginn der Versuchsperiode. Im weiteren Verlauf waren die Wassergehalte der bewässerten und unbewässerten Variante auf einem ähnlichen Niveau.

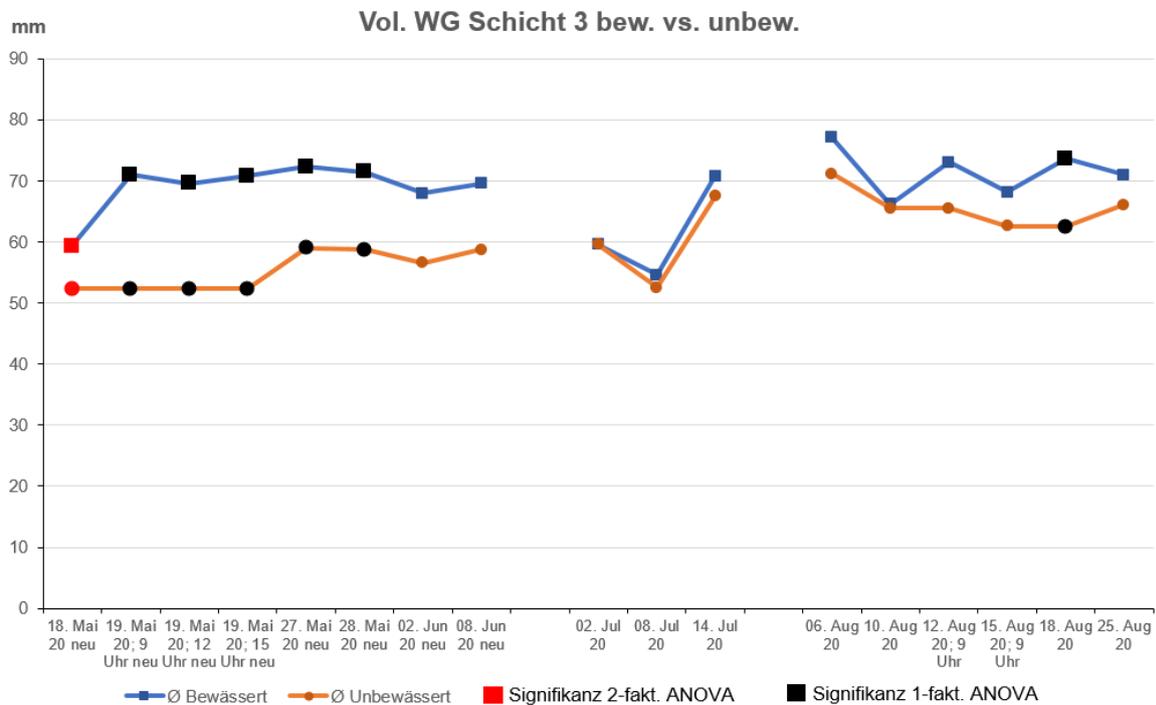


Abbildung 23: Varianzanalyse vol. WG, Schicht 3 (20-40 cm), eigene Darstellung

Schicht 3 bezieht sich auf 20-40 cm des Bodenprofils. Auch hier zeigten die ersten Messtermine signifikante Ergebnisse. Der weitere Verlauf zeigte ähnlich hohe Wassergehalte zwischen den beiden Varianten, bis auf das Ergebnis vom 18. August 2020, welches signifikant ausfiel.

Die Wassergehalte von *Schicht 4* entsprechen der *Unteren Schicht* (40-70 cm), die Ergebnisse sind Abbildung 20 zu entnehmen. Alle numerischen Ergebnisse sind im Anhang in Kapitel 10.7 aufgeführt.

5.3 Gravimetrischer Bodenwassergehalt

In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Ergebnisse des gravimetrischen Wassergehaltes dargestellt. Zu vergleichen ist jeweils die dunkle Farbe mit der gebleichten desselben Farbtons und desselben Schnitts. Dargestellt ist der mittlere Wassergehalt der jeweiligen Schicht in mm. Die Mächtigkeit der Schicht bedingt zum einen die unterschiedlich hohen Wassergehalte, zum anderen wirken sich die Niederschlagsmengen auf die Bodenwassergehalte aus. Im Mittel ist ein Anstieg der Wassergehalte in jeder Variante über die drei Schnitte hinweg zu verzeichnen, außer in der unbewässerten Variante von *Schicht 3*, welche beim 3. Schnitt ($M = 42,4$, $SD = 0,6$) etwas niedriger lag als beim 2. Schnitt ($M = 43,8$, $SD = 3,6$).

Beim 1. Schnitt war der gravimetrische Wassergehalt der bewässerten Variante von *Schicht 1* ($M = 12,7$, $SD = 1,7$) höher als in der unbewässerten Variante ($M = 11,9$, $SD = 1,6$). Dieser Unterschied wurde mittels zweifaktorieller ANOVA als signifikant nachgewiesen ($F(5,4) = 52,53$; $p = ,001$). Die Faktoren waren *Bewässerung* und *Block*, wie auch bei den weiteren Ergebnissen der zweifaktoriellen ANOVA. Der gleiche Fall bestand in *Schicht 2* der bewässerten Variante ($M = 15,1$, $SD = 1,4$) im Vergleich zur unbewässerten Variante ($M = 13,3$, $SD = 1,4$). Hier war der Unterschied ebenfalls signifikant ($F(5,4) = 6,27$; $p = ,049$). In *Schicht 4* lag die bewässerte Variante ($M = 58,3$, $SD = 3,2$) signifikant höher als die unbewässerte ($M = 49,7$, $SD = 2,7$). Hier wurde der signifikante Unterschied mittels einfaktorieller ANOVA untersucht ($F(1,8) = 20,93$; $p = ,002$), es griff hier nur der Faktor *Bewässerung*, wie auch bei weiteren Ergebnissen der einfaktoriellen ANOVA.

Beim 2. Schnitt wurde nur ein Ergebnis der zweifaktoriellen ANOVA als signifikant analysiert ($F(5,4) = 11,93$; $p = ,016$). Hier lag jedoch die unbewässerte Variante ($M = 43,8$, $SD = 3,7$) höher als die bewässerte ($M = 38,9$, $SD = 6,3$).

Beim 3. Schnitt fiel keines der Ergebnisse als signifikant aus. Weitere numerische Ergebnisse sind im Anhang in Kapitel 10.8 zu finden.

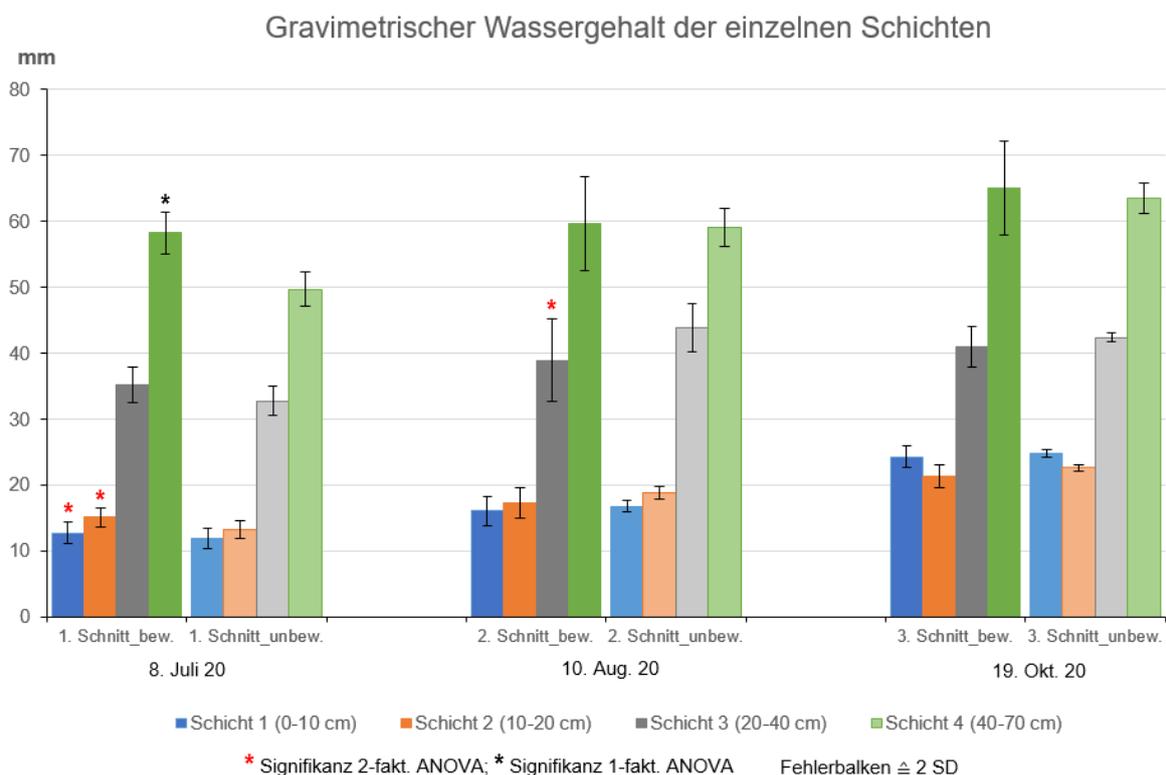


Abbildung 24: Varianzanalyse grav. WG der einzelnen Schichten, eigene Darstellung

Beim gravimetrischen Wassergehalt der *Oberen* und *Unteren Schicht* sind ähnliche Sachverhalte zu beobachten. Auch hier steigen die Wassergehalte im Mittel über die drei Schnitte an, wenn auch zum Teil nur gering, vergleiche *Untere Schicht* in Abbildung 25. In der *Oberen Schicht* sowie der *Gesamten Schicht* ist der Anstieg des Wassergehaltes hingegen deutlich erkennbar, vgl. dieselbe Abbildung. Signifikant höhere Ergebnisse der bewässerten Variante sind nur beim 1. Schnitt zu beobachten. Der gravimetrische Wassergehalt der *Oberen*

Schicht der bewässerten Variante ($M = 62,9$, $SD = 5,2$) lag höher als der der unbewässerten Variante ($M = 57,8$, $SD = 5,0$) mit einem signifikanten Unterschied ($F(5,4) = 23,44$; $p = ,005$). Zurückzuführen ist das Ergebnis auf das Modell der zweifaktoriellen ANOVA. Die *Untere Schicht* entspricht den Daten von *Schicht 4*; der signifikante Unterschied der bewässerten Variante beim 1. Schnitt wurde im Absatz zuvor dargelegt. Ebenfalls auf die zweifaktorielle ANOVA zurückzuführen ist das höhere Ergebnis der bewässerten Variante der *Gesamten Schicht* ($M = 121,2$, $SD = 3,8$) beim 1. Schnitt im Vergleich zur unbewässerten ($M = 107,6$, $SD = 4,5$). Der Unterschied war auch hier signifikant ($F(5,4) = 16,89$; $p = ,009$). Alle weiteren Ergebnisse, siehe auch im Anhang, Kapitel 10.8, unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Varianten. Zum Teil lag der Wassergehalt der unbewässerten Variante nominell höher als der der bewässerten, vgl. Abbildung 25.

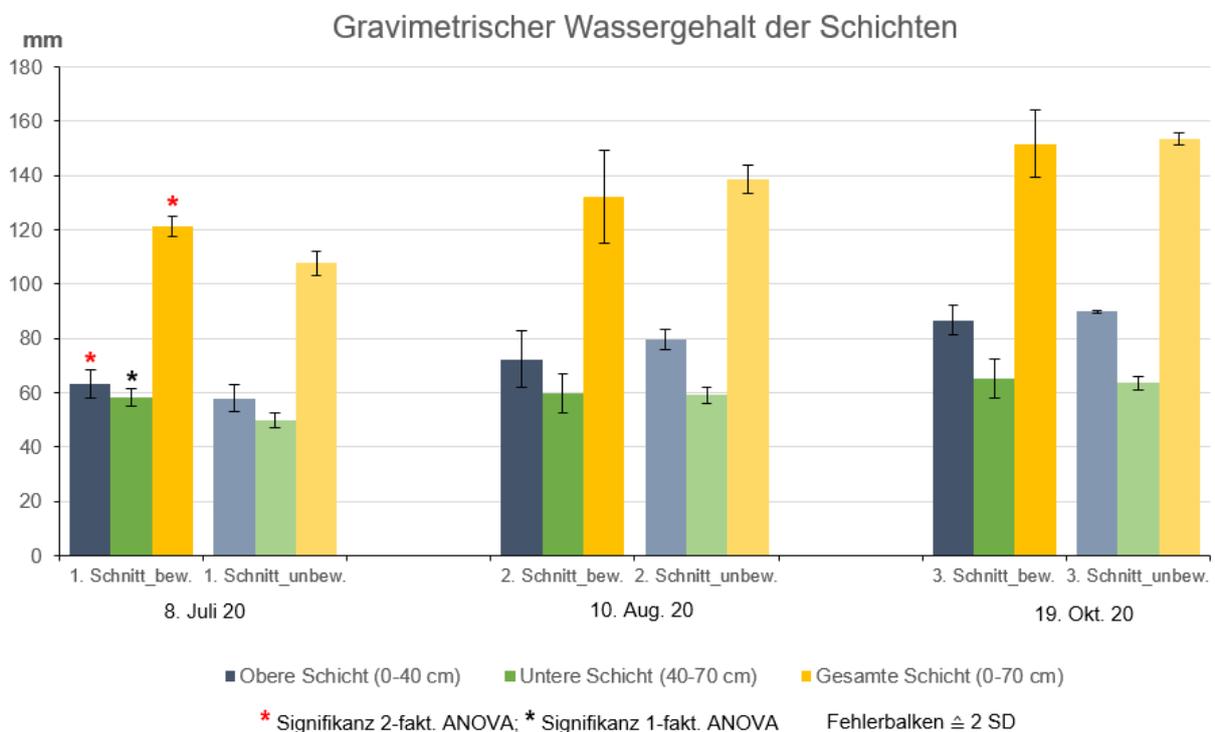


Abbildung 25: Varianzanalyse grav. WG der gesamten Schichten, eigene Darstellung

5.4 Potenzielle Evapotranspiration und Klimatische Wasserbilanz

Die potenziellen Evapotranspirationsdaten lagen in Tagesintervallen vor und wurden von der ZAMG zur Verfügung gestellt. Die gesamte potenzielle Evapotranspiration zwischen dem 01. Mai und 24. Oktober 2020 betrug 567 mm. Damit verdunstete in diesem Zeitraum etwa die gleiche Menge, welche über die Niederschläge in den Boden gelangte, exklusive der Bewässerungsmengen. In Abbildung 26 wird deutlich, dass die pot. Evapotranspiration im Mittel bis in den Juni hinein leicht anstieg und den Juli über die höchsten Evapotranspirationsraten stattfanden. Ab Anfang August verringerten sich die Mengen bis in den Herbst hinein. Siehe den Verlauf der potenziellen Evapotranspiration in Abbildung 26, graue Linie, gemeinsam mit den Niederschlagsmengen und Bewässerungsereignissen.

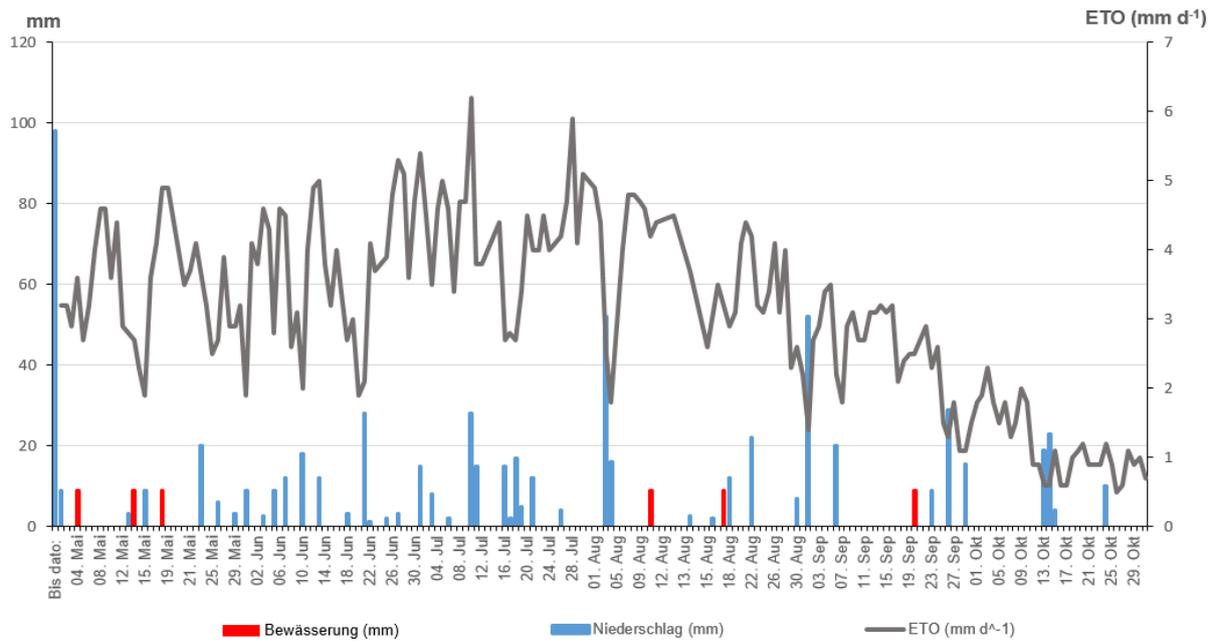


Abbildung 26: Potenzielle tägliche Evapotranspiration, eigene Darstellung⁴

Die wöchentlichen Überschuss- bzw. Defizitmengen sind in Abbildung 27 dargestellt. Anhand derer wird deutlich, ob pro Woche mehr Wasser über die Niederschlags- und Bewässerungsereignisse in den Boden gelangte (braune bzw. schwarze Säulen im pos. Bereich) oder ob mehr Wasser verdunstete (braune oder schwarze Säulen im neg. Bereich). Die braunen Säulen bilden die Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung ab, die schwarzen Säulen zeigen die veränderten Überschuss- bzw. Defizitmengen durch den zusätzlichen Einfluss der Bewässerungsereignisse. Die temporären Defizite wurden dadurch verringert bzw. führten die Bewässerungsereignisse zu leicht positiven Bilanzen, vgl. die schwarzen Säulen in Abbildung 27. Gezeigt werden die Differenzen jeder einzelnen Kalenderwoche, gekennzeichnet durch die transparente Farbgebung im Hintergrund.

⁴ x-Achse **nicht** linear skaliert

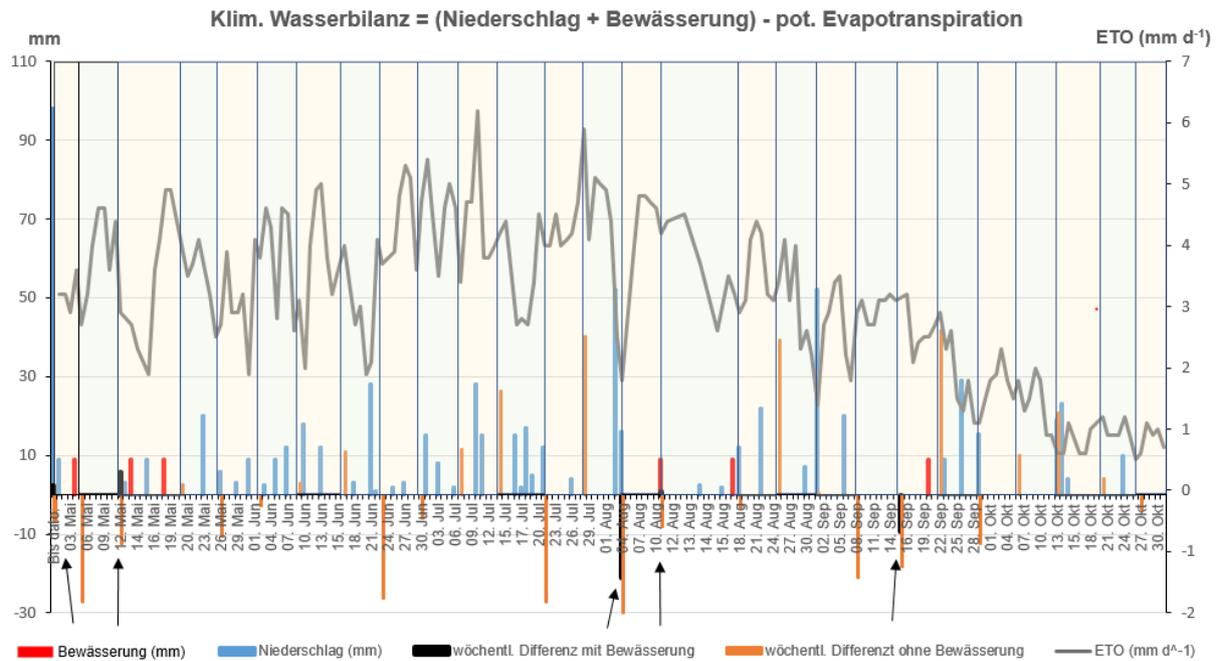


Abbildung 27: Wöchentliche Klimatische Wasserbilanz, eigene Darstellung⁵

Der Zusammenhang zwischen den Niederschlägen und Bodenwassergehalten wurde anhand eines Streudiagramms und der Spearman-Korrelation untersucht, vgl. Abbildung 28 und Tabelle 11.

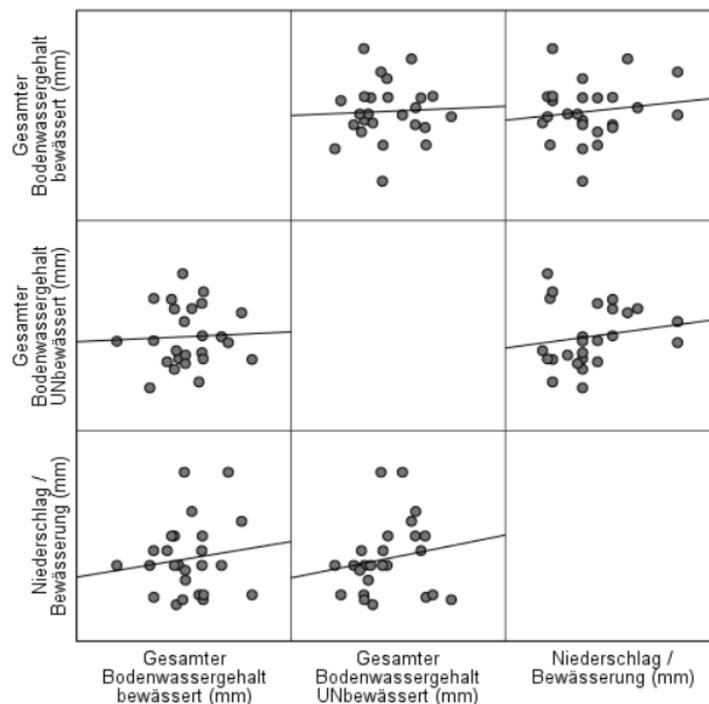


Abbildung 28: Streudiagramm, Niederschlag – Bodenwassergehalt, eigene Darstellung

⁵ x-Achse **nicht** linear skaliert

Sowohl das Streudiagramm als auch die nicht signifikante Spearman-Korrelation sowie der Korrelationskoeffizient, welcher nur knapp über Null lag, wiesen auf einen geringen Zusammenhang hin, sodass von weiteren statistischen Auswertungen abgesehen wurde.

Tabelle 12: Spearman Korrelation Ergebnisse, eigene Darstellung

Parameter	N	Korrelationskoeffizient	p-Wert (2-seitig)
Gesamter Bodenwassergehalt_bew.	38	,101	,548
Niederschlag / Bewässerung	49		
Gesamter Bodenwassergehalt_unbew.	25	,209	,315
Niederschlag / Bewässerung	49		

5.5 Ergebnisse Bodenproben, P_{CAL} und N_{min}

Die **pflanzenverfügbaren Phosphorgehalte (P_{CAL})** am Versuchsstandort waren sehr gering bzw. mangelhaft und nahmen im Laufe der Vegetationsperiode fast ganz ab. Die Werte lagen meist unter 10 mg Phosphor kg⁻¹ Boden und zum 3. Erntetermin nicht selten bei null bzw. so wenig mg P kg⁻¹ Boden, dass die Werte unter die Nachweisgrenze fielen, vgl. Abbildung 29 bis Abbildung 38. Parzelle 1-5 betreffen die bewässerte Variante, Parzelle 6-10 die unbewässerte. Siehe alle numerischen Ergebnisse im Anhang, Kapitel 10.9. Eine Ausnahme bildeten hier Parzelle 6 und Parzelle 7, bei welchen zum 1. Schnitt Werte von 20-30 mg P kg⁻¹ Boden gemessen wurden. Die Schichten, in denen ausreichend viele Werte an Phosphor bestimmt wurden, wurden mittels einfaktorieller ANOVA auf Signifikanzen geprüft. Die Ergebnisse fielen nicht signifikant aus, vgl. Anhang, Kapitel 10.10, mit Ausnahme des Phosphorgehaltes von *Schicht 1* beim 3. Erntetermin. Hier lag der Phosphorgehalt der bewässerten Variante ($M=2,9; SD=0,5$) signifikant höher als der der unbewässerten Variante ($M=1,4; SD=1,3$). Der signifikante Unterschied lag bei ($F(1,7) = 6,17; p = ,042$). Auch die Ökologischen Basischarakterisierungen von H. Unterfrauner, vgl. Anhang, Kapitel 10.3 und 10.4, zeigen mangelhafte Ergebnisse an pflanzenverfügbarem Phosphor (wasserlöslicher plus austauschbarer Phosphor); analysiert wurde hier je eine Bodenprobe der bewässerten und unbewässerten Variante. Letztere Analyse zeigt aber auch, dass der Boden hohe Phosphorreserven vorweist, ca. 900 kg ha⁻¹ organischen Phosphor, welchen es zu mobilisieren gilt, vgl. dieselbe Analyse im Anhang.

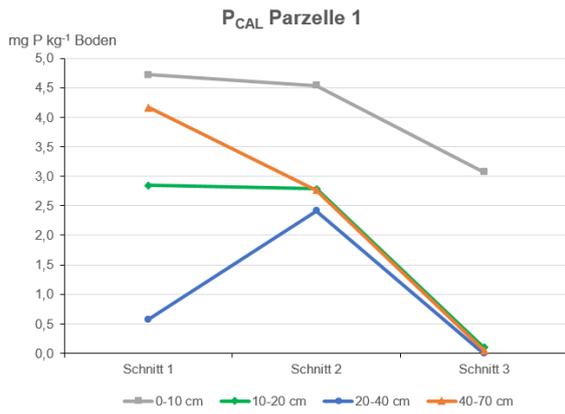


Abbildung 29: P_{CAL} Parzelle 1, eigene Darstellung

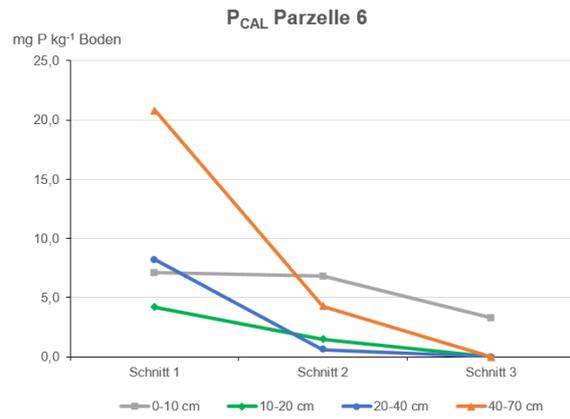


Abbildung 30: P_{CAL} Parzelle 6, eigene Darstellung

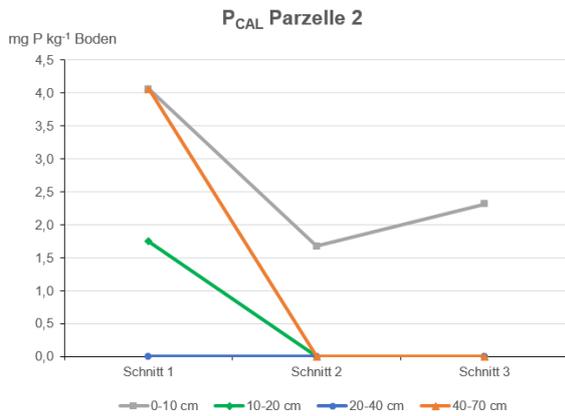


Abbildung 31: P_{CAL} Parzelle 2, eigene Darstellung

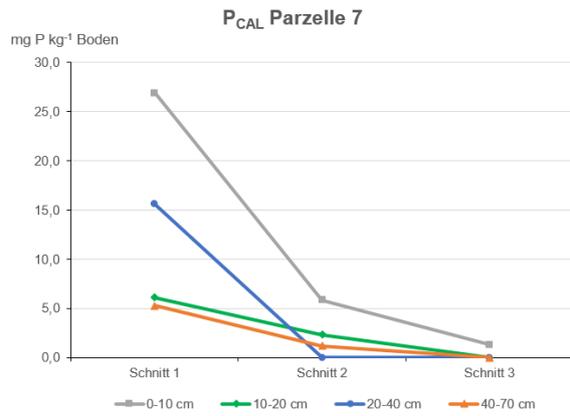


Abbildung 32: P_{CAL} Parzelle 7, eigene Darstellung

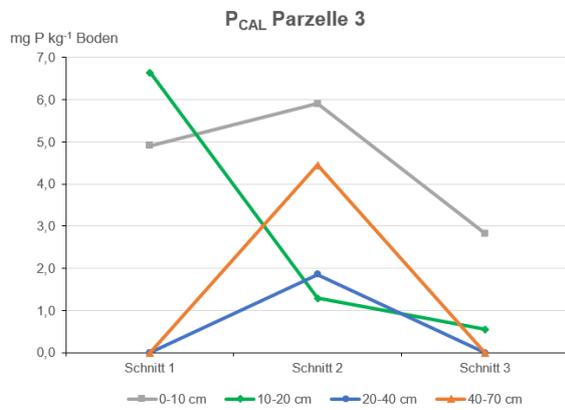


Abbildung 33: P_{CAL} Parzelle 3, eigene Darstellung

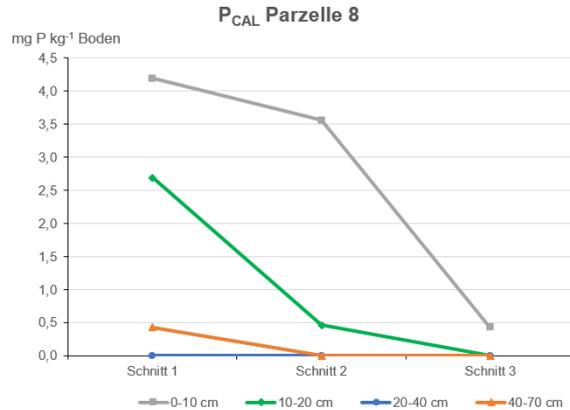


Abbildung 34: P_{CAL} Parzelle 8, eigene Darstellung

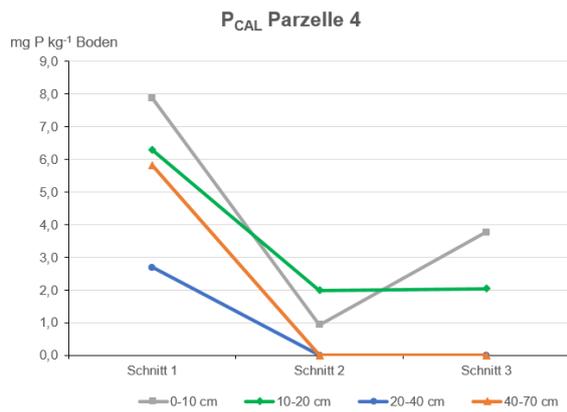


Abbildung 35: P_{CAL} Parzelle 4, eigene Darstellung

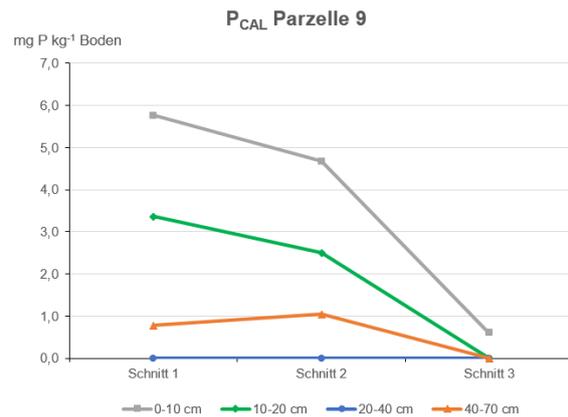


Abbildung 36: P_{CAL} Parzelle 9, eigene Darstellung

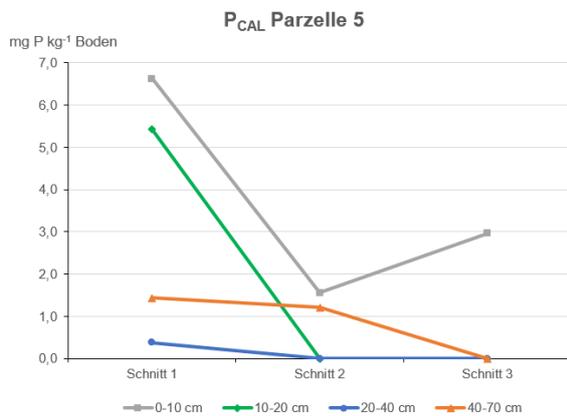


Abbildung 37: P_{CAL} Parzelle 5, eigene Darstellung

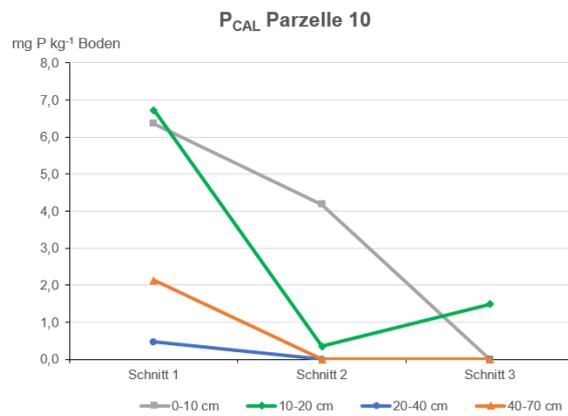


Abbildung 38: P_{CAL} Parzelle 10, eigene Darstellung

Die **mineralischen Stickstoffgehalte (N_{min})** am Versuchsstandort waren ebenfalls sehr gering bzw. mangelhaft und nahmen im Laufe der Vegetationsperiode fast ganz ab. Die Werte lagen alle unter 5 mg kg⁻¹ N_{min}. Beim 1. Schnitt wurde zusätzlich zu Nitrat-Stickstoff auch Ammonium-Stickstoff analysiert. Anhand der Extrakte für die Analyse von Ammonium konnten deutlich geringere Mengen an Stickstoff gemessen werden als mit den Extrakten für Nitrat. Daher konnten für den 1. Schnitt in fast allen Parzellen und Schichten pflanzenverfügbarer Stickstoff gemessen werden, viele der Messergebnisse lagen jedoch unter 1 mg kg⁻¹, vgl. Tabelle 13. Im Vergleich der zwei Varianten untereinander lagen die Werte der bewässerten etwas höher als die der unbewässerten Variante; die Messergebnisse der unbewässerten Variante lagen beim 1. Schnitt alle unter 0,5 mg kg⁻¹ und zeigten beim 2. und 3. Schnitt keine Messwerte. In der bewässerten Variante dagegen wurden beim 2. Schnitt in den unteren beiden Schichten einzelne Werte an N_{min} gemessen. Statistische Auswertungen per einfaktorieller ANOVA konnten nur beim 1. Schnitt in *Schicht 1*, *Schicht 2* und *Schicht 4* durchgeführt werden, da hier ein Stichprobenumfang von ≥ 8 vorliegt, s. die Ergebnisse im Anhang, Kapitel 10.12. Die Unterschiede zwischen den beiden Varianten fielen nicht signifikant aus.

Die Ergebnisse berechnet auf N_{min} in kg ha⁻¹ lagen somit ebenfalls im niedrigen Bereich mit hauptsächlich Werten von weit unter 10 kg ha⁻¹, s. Anhang, Kapitel 10.11. Auch in der Ökologischen Basischarakterisierung von H. Unterfrauner, vgl. Anhang, Kapitel 10.3 und 10.4

wurden niedrige pflanzenverfügbare Stickstoffgehalte (wasserlöslich plus austauschbar) ermittelt. Jedoch sind auch hier hohe organische Stickstoffreserven von ~5.000 kg ha⁻¹ vorhanden, welche es zu mineralisieren gilt.

Tabelle 13: N_{min} Messergebnisse in mg kg⁻¹, eigene Darstellung

mg kg ⁻¹	Bewässert			Unbewässert		
	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3
	Parzelle 1			Parzelle 6		
0-10 cm	0,37	-	-	0,05	-	-
10-20 cm	0,27	-	-	0,06	-	-
20-40 cm	0,33	0,36	-	0,06	-	-
40-70 cm	2,67	0,80	-	-	-	-
	Parzelle 2			Parzelle 7		
0-10 cm	0,15	-	-	-	-	-
10-20 cm	1,72	-	-	0,05	-	-
20-40 cm	2,07	1,90	-	-	-	-
40-70 cm	2,78	0,83	-	0,24	-	-
	Parzelle 3			Parzelle 8		
0-10 cm	0,13	-	-	0,09	-	-
10-20 cm	0,22	-	-	0,01	-	-
20-40 cm	1,36	0,45	-	-	-	-
40-70 cm	3,62	0,23	-	0,003	-	-
	Parzelle 4			Parzelle 9		
0-10 cm	0,05	-	-	0,08	-	-
10-20 cm	0,27	-	-	-	-	-
20-40 cm	0,14	-	-	-	-	-
40-70 cm	2,93	0,61	-	-	-	-
	Parzelle 5			Parzelle 10		
0-10 cm	-	-	-	0,19	-	-
10-20 cm	-	-	-	0,12	-	-
20-40 cm	0,13	-	-	0,08	-	-
40-70 cm	2,61	-	-	0,12	-	-

5.6 Ergebnisse unterschiedlicher Ausgangsbedingungen

Mittels der Software **Soil Cover** (Josephinum Research Wieselburg) wurden die verschiedenen Bodenbedeckungsgrade, welche auf die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen zu Beginn der Vegetationsperiode zurückzuführen sind, in den beiden Varianten berechnet, s. Tabelle 14. Mit durchschnittlich 24,8 % lebende Biomasse wurde in den unbewässerten Parzellen 6-10 ein deutlich höherer Bedeckungsgrad ermittelt als in den

bewässerten Parzellen 1-5, mit durchschnittlich 8,8 %. Die unbewachsene Oberfläche war somit in der bewässerten Variante mit durchschnittlich 61,4 % Erde deutlich höher als in der unbewässerten Variante mit durchschnittlich 47,4 % Erde.

Tabelle 14: Bodenbedeckungsgrad der Parzellen, eigene Darstellung

Parzelle	Lebende Biomasse (%)	Tote Biomasse (%)	Erde (%)
Parzelle 1	4	18	78
Parzelle 2	12	23	66
Parzelle 3	9	36	55
Parzelle 4	5	41	54
Parzelle 5	14	32	54
∅	8,8	30,0	61,4
Parzelle 6	24	25	51
Parzelle 7	14	29	57
Parzelle 8	30	25	45
Parzelle 9	39	24	36
Parzelle 10	17	35	48
∅	24,8	27,6	47,4

5.7 Ernte-Ergebnisse, quantitative und qualitative Parameter

5.7.1 Optik

Das optische Erscheinungsbild ist im Blattkräuteranbau für den Kunden von großer Bedeutung. Anhand dessen wird die Ware in unterschiedliche Qualitätsklassen eingeteilt, vgl. Produktspezifikation Sonnentor im Anhang, Kapitel 10.1. An den nachfolgenden Aufnahmen, s. Tabelle 15 bis Tabelle 17, lässt sich eine unterschiedliche Pflanzenentwicklung erkennen, vor allem am Ende der Vegetationsperiode.

Tabelle 15: Optik bewässert und unbewässert, 1. Schnitt, eigene Aufnahmen

	Bewässert, Parz. 3	Unbewässert, Parz. 8
1. Schnitt		

Beide Varianten erreichten zum 1. Schnitt eine Höhe von 80 cm, standen im kräftigen grün und hatten gut ausgeformte Blätter. Gelbe Blätter hatten sich jeweils im unteren Stängelbereich gebildet, aufgrund des späten Erntetermins (08. Juli 2020). Die unbewässerte Variante befand sich ansatzweise schon im generativen Stadium, erkennbar an den silbernen Köpfen, die bewässerte Variante nicht. Die gut ausgeformten Blätter waren auch in der Trockenmasse wiederzuerkennen.

Tabelle 16: Optik bewässert und unbewässert, 2. Schnitt, eigene Aufnahmen

	Bewässert, Parz. 3	Unbewässert, Parz. 8
2. Schnitt		

Beim 2. Schnitt (10. August 2020) erreichten die bewässerten Pflanzen eine Höhe von bis zu 50 cm, die unbewässerte Variante war um die 30 cm hochgewachsen. Das Wachstum der bewässerten Variante war etwas kräftiger als das der unbewässerten; diese Tatsache war anhand der geringeren Höhe und des helleren Blattgrüns der unbewässerten Variante erkennbar, vgl. Tabelle 16. Die getrockneten Blätter des 2. Schnitts sahen somit etwas „gekräuselter“ aus im Vergleich zum 1. Schnitt, vor allem die der unbewässerten Variante.

Tabelle 17: Optik bewässert und unbewässert, 3. Schnitt, eigene Aufnahmen

	Bewässert, Parz. 3	Unbewässert, Parz. 8
3. Schnitt		

Beim 3. Schnitt (19. Oktober 2020) waren die Unterschiede in der Optik am besten zu erkennen, vgl. Tabelle 17. Die bewässerten Pflanzen waren bis zu 40 cm hochgewachsen, die unbewässerten bis zu 30 cm hoch. Die bewässerten Pflanzen standen in einem kräftigen grün, die unbewässerten waren hell bis matt grün. Die Pflanzen der bewässerten Variante waren größer und hatten gut ausgeformte Blätter, wogegen die Blätter der Kontrollvariante klein und kümmerlich waren. Dieser Sachverhalt ist ebenfalls in der Trockenware ersichtlich, s. Tabelle 18.

Tabelle 18: Optik TM bewässert und unbewässert, 3. Schnitt, eigene Aufnahmen

3. Schnitt	Bewässert, Parz. 4	Unbewässert, Parz. 6
		

5.7.2 Quantitative Ergebnisse

Die quantitativen Ernteparameter wurden von der Parzellenfläche (5,745 m²) auf einen Hektar hochgerechnet und werden nachfolgend in dt ha⁻¹ dargestellt. Die Ernteerträge der einzelnen Parzellen sind im Anhang in Kapitel 10.12 zu finden, die statistischen Ergebnisse, bezogen auf den Hektar, ebenfalls im Anhang, Kapitel 10.14.

5.7.2.1 Gesamte Frischmasse

Die gesamte Frischmasse aller drei Schnitte ist in Abbildung 39 dargestellt. Beim 1. Schnitt lag die Frischmasse der unbewässerten Variante mit 126,7 dt ha⁻¹ höher als die bewässerte Variante (116,3 dt ha⁻¹), was auf den Wachstumsvorsprung dieser zu Beginn der Vegetationsperiode zurückzuführen ist. Beim 2. und 3. Schnitt lag jeweils die Frischmasse der bewässerten Variante signifikant höher als die der unbewässerten. Die Signifikanz im 2. Schnitt wurde anhand von logarithmisch transformierten Daten ermittelt, so lag die bewässerte Variante ($M = 4,9$; $SD = 0,11$) signifikant höher ($F(1,8) = 7,66$; $p = ,024$) als die unbewässerte Variante ($M = 4,8$; $SD = 0,06$). Für eine bessere Vergleichbarkeit zu den anderen Schnitten sind im Diagramm jedoch die mittleren Erträge der Originaldaten abgetragen. Der signifikant höhere Ertrag der bewässerten Variante ($M = 120,8$; $SD = 24,71$) beim 3. Schnitt wurde mittels der Originaldaten analysiert. Dieser liegt hier um 75 % höher als der der unbewässerten Variante ($M = 69,9$; $SD = 13,95$). Die Signifikanz beträgt ($F(1,8) = 16,05$; $p = ,004$).

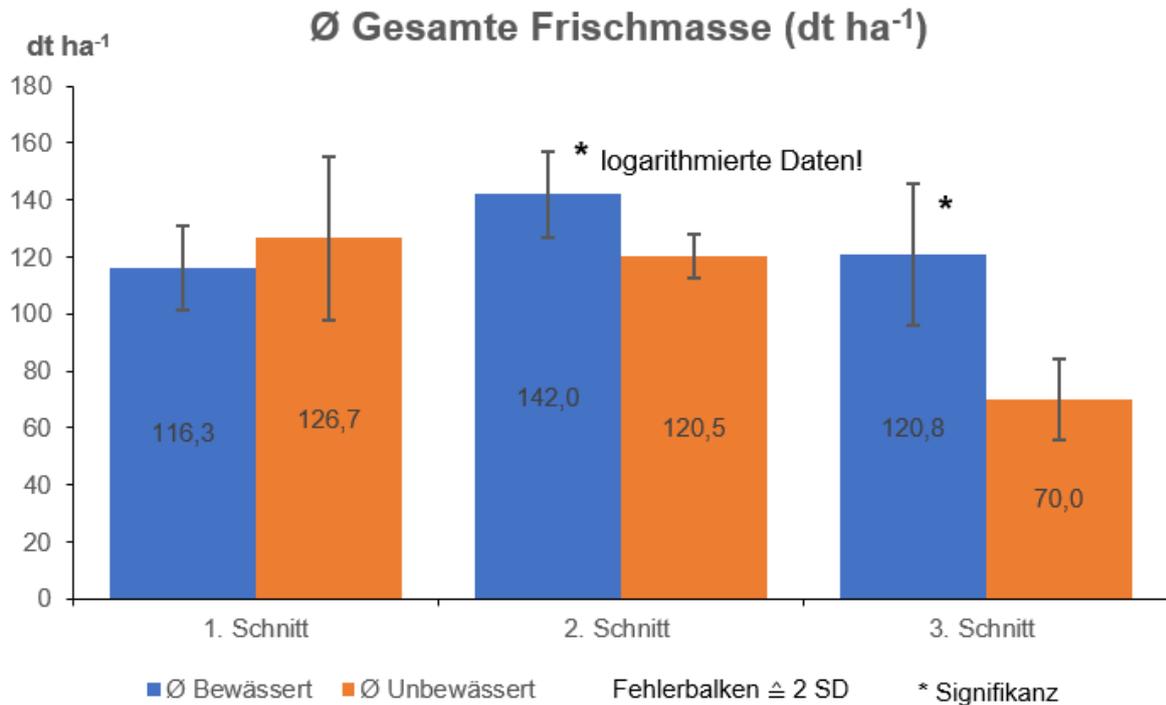


Abbildung 39: Gesamte Frischmasse aller drei Schnitte in dt ha⁻¹, eigene Darstellung

5.7.2.2 Trockenmasse Blätter

Die Trockenmasse der Blätter, Abbildung 40, war im Vergleich der Schnitte untereinander, in beiden Varianten beim 1. Schnitt am höchsten. Mit 17,5 dt ha⁻¹ trockene Blattmasse lagen die Erträge der beiden Varianten gleich hoch. Beim 2. und 3. Schnitt lag der Ertrag der bewässerten Variante signifikant höher als der der unbewässerten. Die Signifikanz beim 2. Schnitt wurde mittels logarithmisch transformierter Daten ermittelt. Die bewässerte Variante ($M = 2,6$; $SD = 0,13$) lag signifikant höher ($F(1,8) = 15,17$; $p = ,005$) als die unbewässerte Variante ($M = 2,4$; $SD = 0,06$). Im Diagramm sind jedoch die mittleren Erträge der Originaldaten für eine bessere Vergleichbarkeit der Schnitte untereinander abgebildet. Die Signifikanz des 3. Schnitts wurde anhand der Originaldaten ermittelt. Hier lag die bewässerte Variante ($M = 15,2$; $SD = 2,16$) signifikant höher ($F(1,8) = 12,18$; $p = ,008$) als die unbewässerte Variante ($M = 10,2$; $SD = 2,38$).

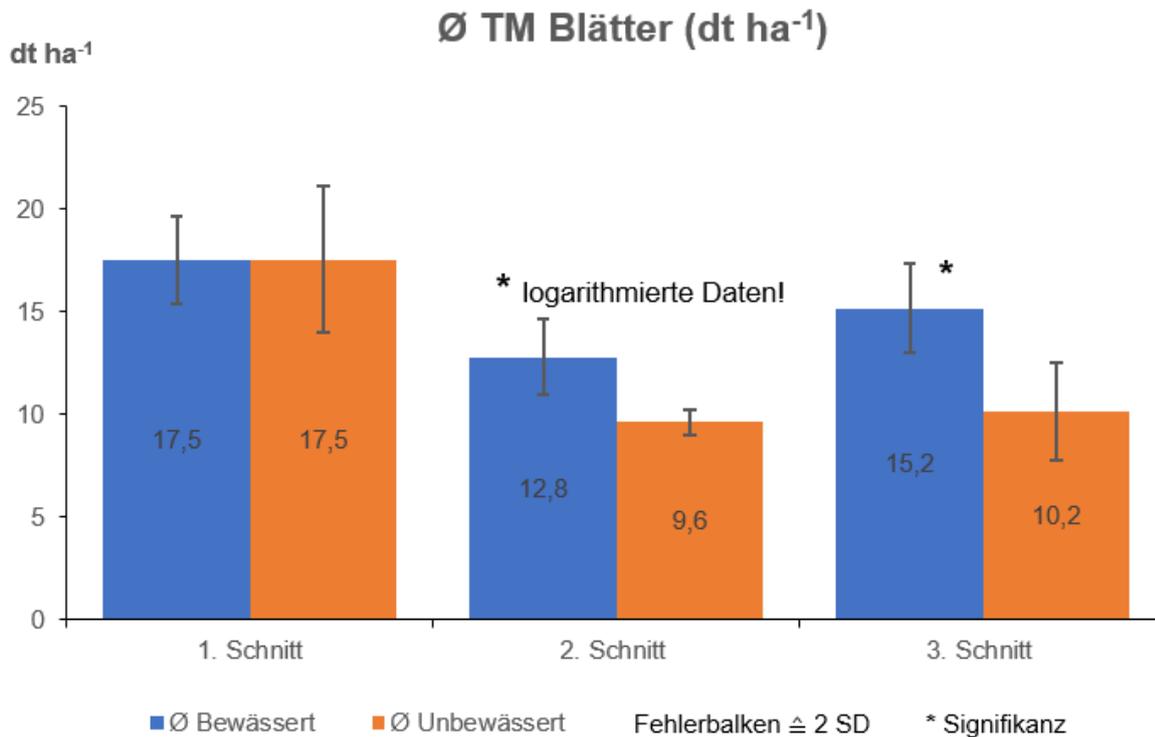


Abbildung 40: TM Blätter aller drei Schnitte in dt ha⁻¹, eigene Darstellung

5.7.2.3 Trockenmasse Braune Blätter

Die Trockenmasse der braunen Blätter ist in Abbildung 41 zusätzlich zur trockenen Blattmasse dargestellt. Einen signifikant höheren Anteil ($F(1,8) = 8,53$; $p = ,019$) der unbewässerten Variante ($M = 0,6$; $SD = 0,16$) im Vergleich zur bewässerten Variante ($M = 0,3$; $SD = 0,15$) gab es im 2. Schnitt. Die Anteile der braunen Blätter unterschieden sich bei den anderen beiden Schnitten nicht deutlich zwischen den Varianten. Beim 3. Schnitt war der braune Blattanteil beider Varianten am höchsten. Erklären lässt sich dieses durch die herbstliche Witterung, da der 3. Erntetermin am 19. Oktober 2020 stattfand.

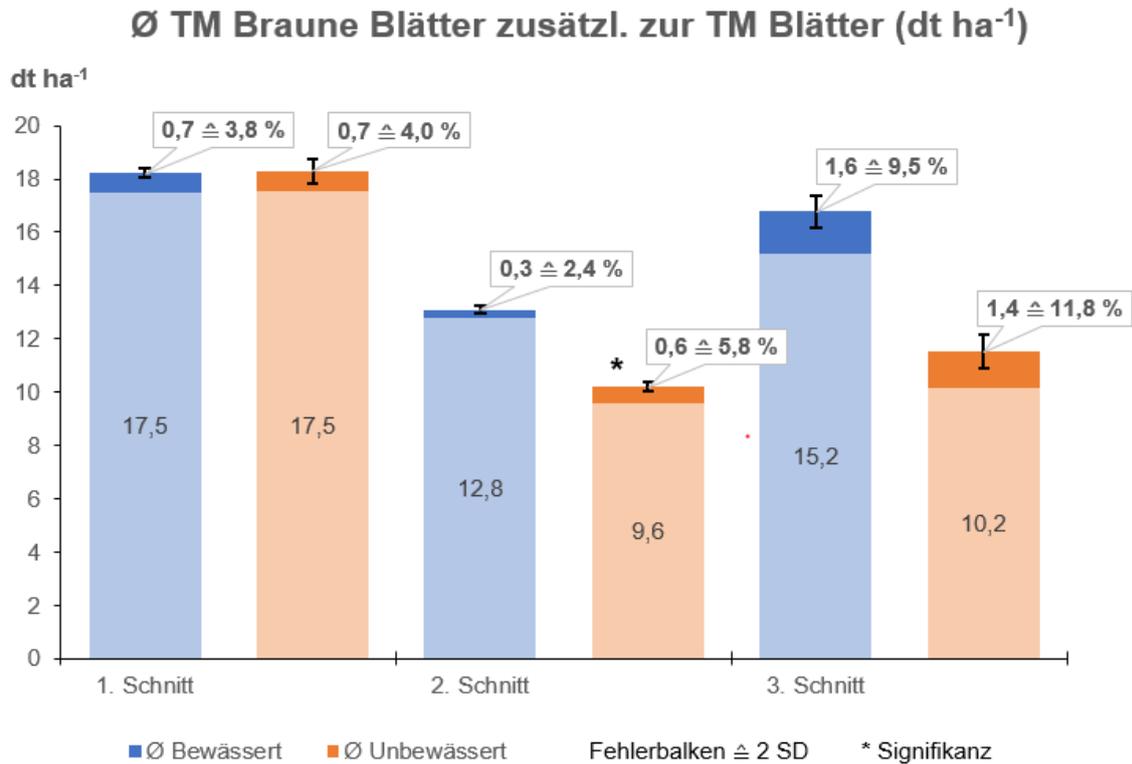


Abbildung 41: TM Braune Blätter aller drei Schnitte in dt ha⁻¹, eigene Darstellung

5.7.2.4 Trockenmasse Stängel

Die Trockenmasse der Stängel, s. Abbildung 42, lag beim 1. und 2. Schnitt mit 12,4 dt ha⁻¹ und 18,1 dt ha⁻¹ in der unbewässerten Variante höher als in der bewässerten (hier 9,7 dt ha⁻¹ und 17,3 dt ha⁻¹). Beim 2. Schnitt war das Niveau der trockenen Stängel in beiden Varianten mit 17-18 dt ha⁻¹ insgesamt am höchsten. Da die Pflanzen beim 1. Schnitt auf einer Höhe von ca. 30 cm abgeerntet wurden und im Anschluss kein Reinigungsschnitt erfolgte, sind die Stängelreste bis zum 2. Erntetermin stehen geblieben und wurden in diesem Arbeitsgang abgeerntet. Damit ist die insgesamt hohe Stängeltrockenmasse des 2. Schnitts zu erklären. Beim 3. Schnitt war die Stängeltrockenmasse der bewässerten Variante ($M = 12,8$; $SD = 1,74$) signifikant höher ($F(1,8) = 23,12$; $p = ,002$) als die der unbewässerten ($M = 7,9$; $SD = 1,42$). Zurückzuführen ist diese Tatsache auf den insgesamt deutlich höheren Ertrag der bewässerten Variante beim 3. Schnitt.

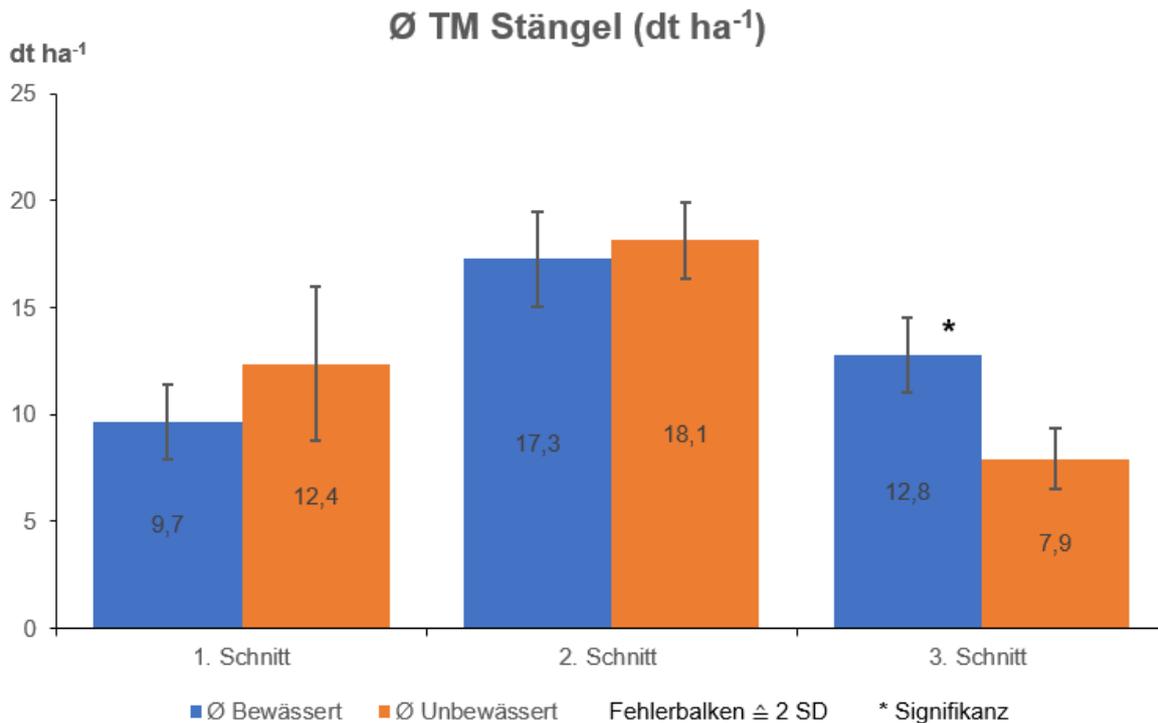


Abbildung 42: TM Stängel aller drei Schnitte in dt ha⁻¹, eigene Darstellung

5.7.2.5 Trockenmasse gesamt

Die gesamte Trockenmasse ist in Abbildung 43 dargestellt. Diese umfasst alle bisher dargestellten trockenen Ernteparameter sowie den Wildtyp. Der Wildtyp kam nur in einzelnen Parzellen in sehr geringen Mengen vor und wurde somit statistisch nicht ausgewertet. Beim 1. Schnitt lag die gesamte Trockenmasse in der unbewässerten Variante mit 31,0 dt ha⁻¹ etwas höher als in der bewässerten Variante mit 28,0 dt ha⁻¹, was auf den Wachstumsvorsprung der unbewässerten Variante zurückzuführen ist. Beim 2. und 3. Schnitt lag die gesamte Trockenmasse der bewässerten Variante höher. Beim 3. Schnitt war der Unterschied mit ($M = 29,6$; $SD = 3,74$) bewässert und ($M = 19,7$; $SD = 4,26$) unbewässert signifikant ($F(1,8) = 15,39$; $p = ,005$). Damit spiegelt sich das Ergebnis der gesamten Frischmasse wider, vgl. Abbildung 39. Insgesamt lagen die Erträge der gesamten Trockenmasse mit durchschnittlich 29,6 dt ha⁻¹ auf einem ähnlichen Niveau, ausgenommen der Ertragsmenge der unbewässerten Variante beim 3. Schnitt mit 19,7 dt ha⁻¹.

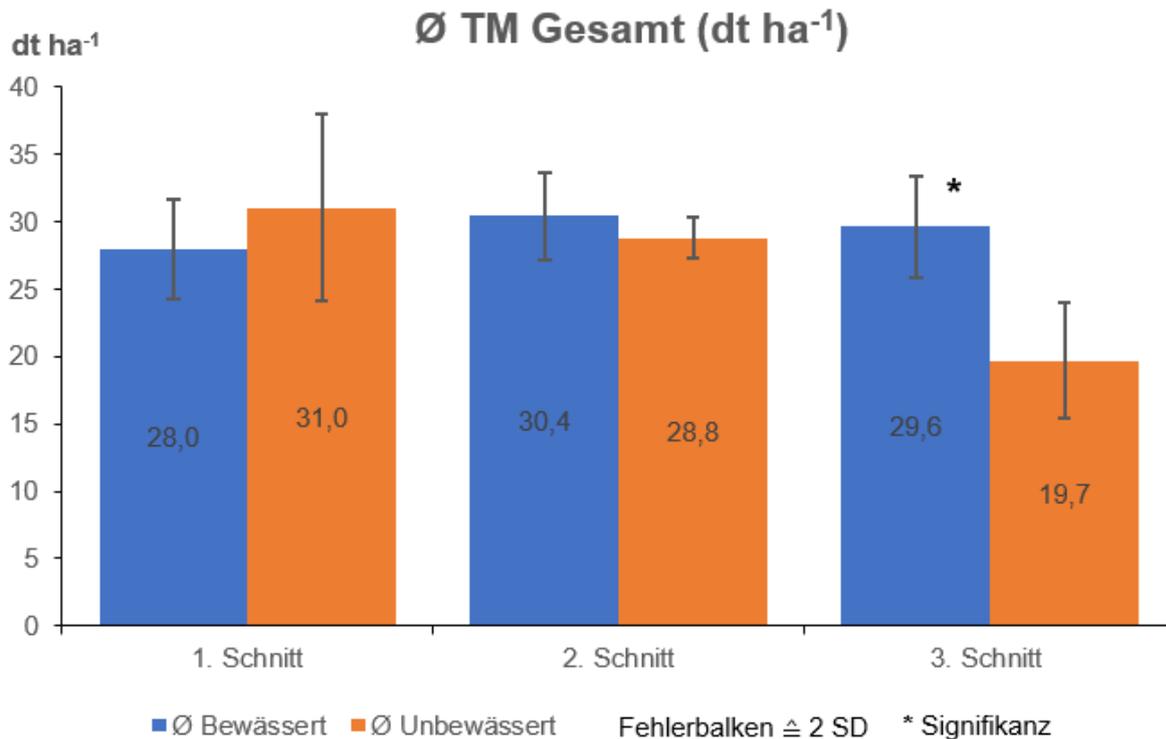


Abbildung 43: Gesamte Trockenmasse aller drei Schnitte in dt ha⁻¹, eigene Darstellung

5.7.3 Blatt-Stängel-Verhältnis

Die Blatt-Stängel-Verhältnisse variieren zwischen den Schnitten und Varianten, geben aber die Ertragsverhältnisse der Blätter (TM) und Stängel (TM) exakt wieder. Beim 1. Schnitt lag das Blatt-Stängel-Verhältnis der bewässerten Variante höher, der Unterschied war signifikant. Beim 2. Schnitt ebenso, hier waren die Blatt-Stängel-Verhältnisse beider Varianten mit Werten < 1 am ungünstigsten, was auf den Reinigungsschnitt zurückzuführen ist. Beim 3. Schnitt fiel das Ergebnis nicht signifikant aus. Hier war das Blatt-Stängel-Verhältnis der unbewässerten Variante besser als das der bewässerten. Ebenso wie bei den quantitativen Ernte-Ergebnissen lassen sich die Blatt-Stängel-Verhältnisse über die Witterung, die späten Erntezeitpunkte, die Schnitthöhe der Pflanzen usw. erläutern. Siehe die Ergebnisse in Abbildung 44 sowie die statistische Auswertung im Anhang, Kapitel 10.15.

Blatt-Stängel-Verhältnis

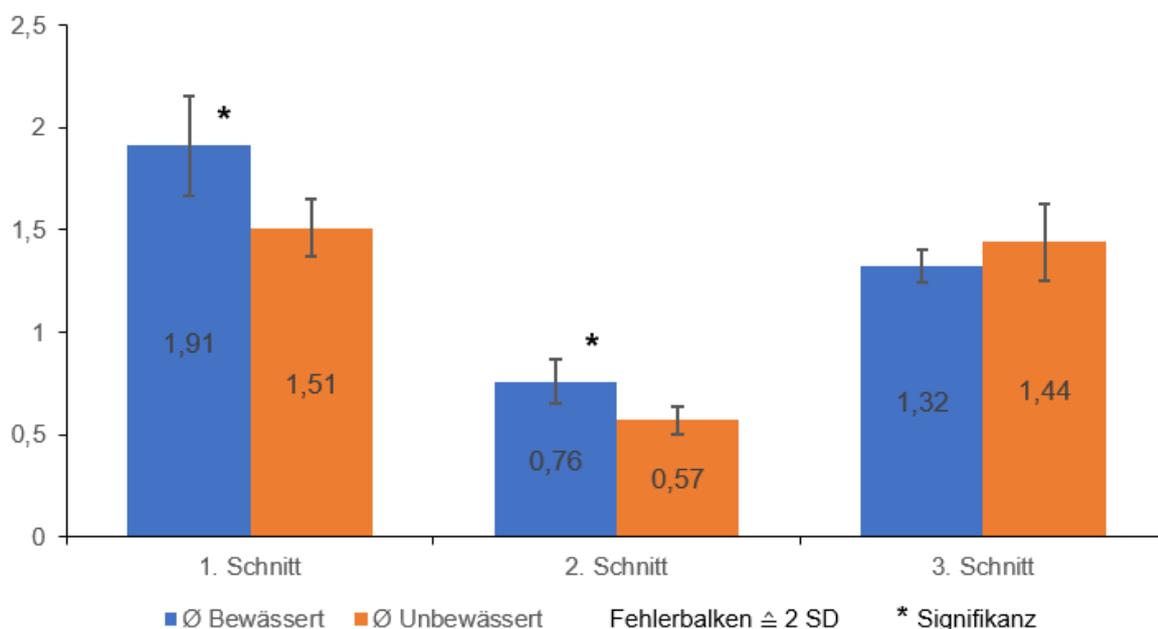


Abbildung 44: Blatt-Stängel-Verhältnis, eigene Darstellung

5.7.4 Qualitative Ergebnisse

5.7.4.1 Ölgehalt

Die ätherischen Ölgehalte (volatile oil) sind beim Pfefferminzanbau von großer Bedeutung. Beim 1. und 3. Schnitt lagen diese mit um die 1,5-2 % ähnlich hoch und waren beim 2. Schnitt mit um die 3 % am höchsten, vgl. Abbildung 45, rote Linie, bezogen auf die Sekundär-Achse. Minimal höher lag bei allen Schnitten der ätherische Ölgehalt der unbewässerten Variante, die Differenz ist beim 2. Schnitt mit 0,6 % am größten.

Bei Pfefferminze sind vor allem die Menthol- und Menthongehalte wichtige Größen, weitere Komponenten des ätherischen Öls sind in geringen Mengen relevant, vgl. Kapitel 3.8. Bei der Darstellung handelt es sich um die 100%-Methode, d. h. die Summe aller Signale in der Probe beträgt 100 %. So auch in Abbildung 45. An der y-Achse ist erkennbar, dass die gesamten Komponenten des ätherischen Öls um die 90 % betragen, sprich die weiteren 10 % konnten nicht erfasst werden oder es sind andere Komponenten von geringerer Relevanz.

Die Ölgehalte unterschieden sich nicht stark zwischen den Varianten, lagen aber unterschiedlich hoch zwischen den verschiedenen Schnitten. Die Mentholgehalte, (rote Säulenabschnitte), lagen beim 1. und 2. Schnitt mit um die 13 % im Bereich des Minimums, beim 3. Schnitt mit gut 37 % im Mittelfeld. Die Menthongehalte, (gelbe Säulenabschnitte), lagen mit um die 60 % beim 1. und 2. Schnitt im oberen Bereich, beim 3. Schnitt mit knapp 35 % im mittleren Bereich.

Die restlichen Ölgehalte lagen im einstelligen Bereich und meist unter der 5 % Marke, was auch erwünscht ist. Siehe die numerischen Ergebnisse im Anhang, Kapitel 10.16.

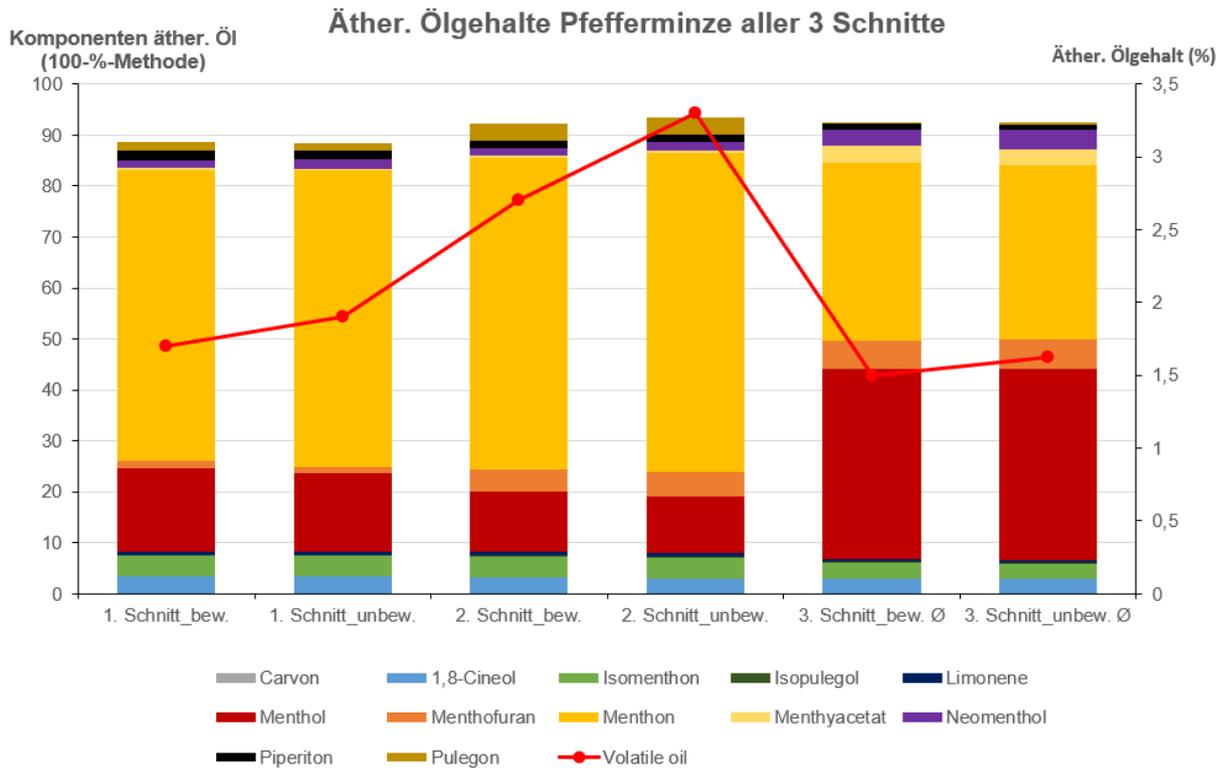


Abbildung 45: Ätherische Ölgehalte aller drei Schnitte, eigene Darstellung

Beim 3. Schnitt wurden Einzelanalysen von jeweils vier Parzellen jeder Variante durchgeführt. Signifikanzen lagen keine vor, die Ergebnisse fielen ähnlich hoch zwischen den beiden Varianten aus. Zu beachten ist der geringe Stichprobenumfang bei der Aussagekraft der Ergebnisse, aber auch die geringe Standardabweichung, s. Abbildung 46.

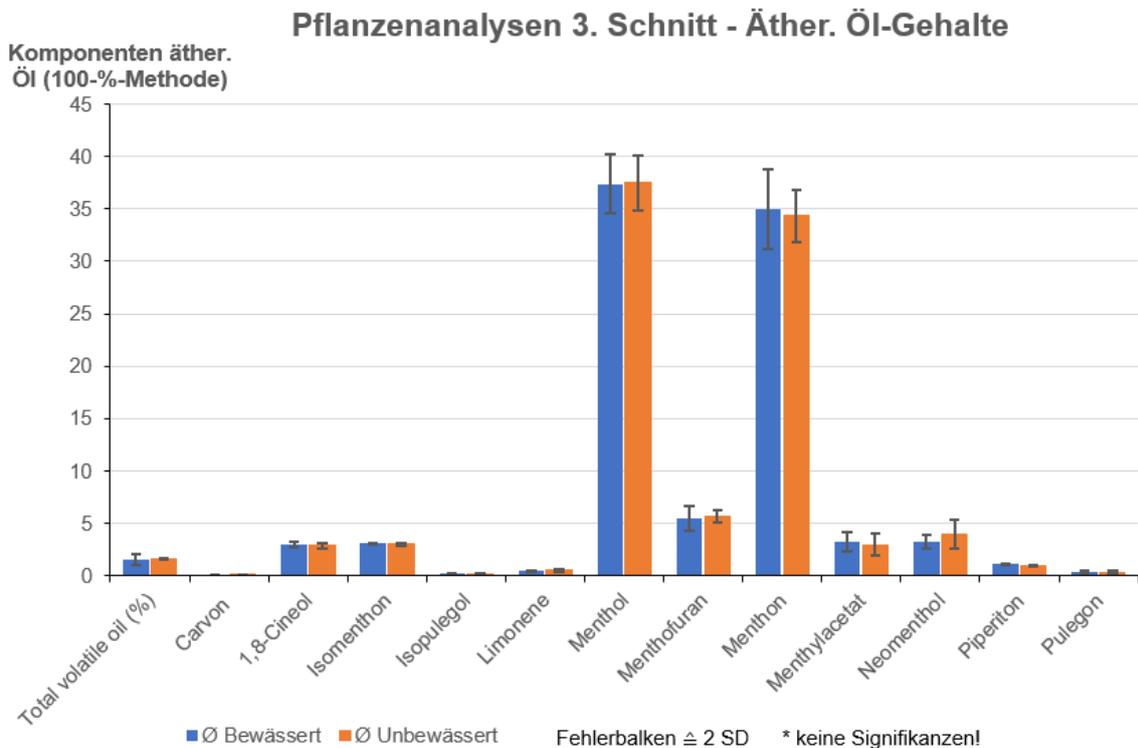


Abbildung 46: Einzelanalysen 3. Schnitt, ätherische Ölgehalte, eigene Darstellung

5.7.4.2 Feuchte-, Aschegehalt, aw-Wert

Der Feuchtegehalt der getrockneten Pfefferminze variierte sowohl zwischen den Varianten als auch zwischen den einzelnen Schnitten. Beim 1. Schnitt war dieser in der unbewässerten Variante mit knapp 10 g pro 100 g höher als in der bewässerten Variante mit 6,6 g pro 100 g. Beim 2. Schnitt lag der Feuchtegehalt insgesamt auf einem geringeren Niveau, der der unbewässerten Variante war ca. 2 g geringer als der der bewässerten Variante mit 5,1 g pro 100 g. Beim 3. Schnitt lag der Feuchtegehalt beider Varianten bei gut 8 g pro 100 g. Vgl. die Ergebnisse in Abbildung 47 und siehe mögliche Ursachen dafür in der Diskussion, Kapitel 6. Die Aschegehalte hingegen waren in beiden Varianten sowie in allen Schnitten mit um die 8 g pro 100 g auf einem ähnlich hohen Niveau, vgl. dieselbe Abbildung.

Die aw-Werte lagen beim 1. Schnitt etwas weiter auseinander (bewässert bei knapp 0,5, unbewässert bei knapp 0,7) und näherten sich im Verlauf der Schnitte an, bis beim 3. Schnitt die Werte beider Varianten bei knapp 0,5 lagen, s. Abbildung 47. Die aw-Werte sind an den Feuchtegehalt angelehnt, ein hoher Feuchtegehalt bedingt einen hohen aw-Wert derselben Variante, diese Tatsache findet sich in den Ergebnissen wieder.

Feuchte-, Aschegehalt & aw-Wert Pfefferminze (TM) aller 3 Schnitte

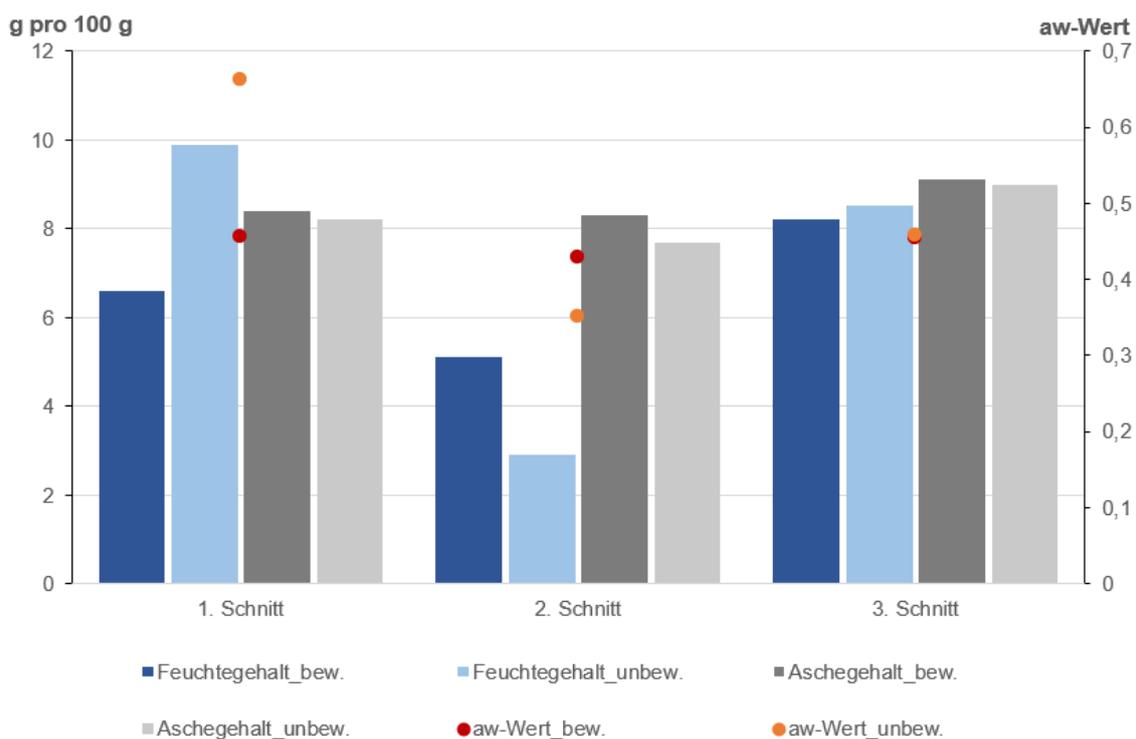


Abbildung 47: Feuchte-, Aschegehalt und aw-Wert aller drei Schnitte, eigene Darstellung

Auch hierzu wurden Einzelanalysen beim 3. Schnitt durchgeführt. Die Ergebnisse waren nicht signifikant, die Standardabweichung war gering und es lag ein geringer Stichprobenumfang vor. Die Ergebnisse beider Varianten lagen jeweils auf einem ähnlichen Niveau, s. Abbildung 48.

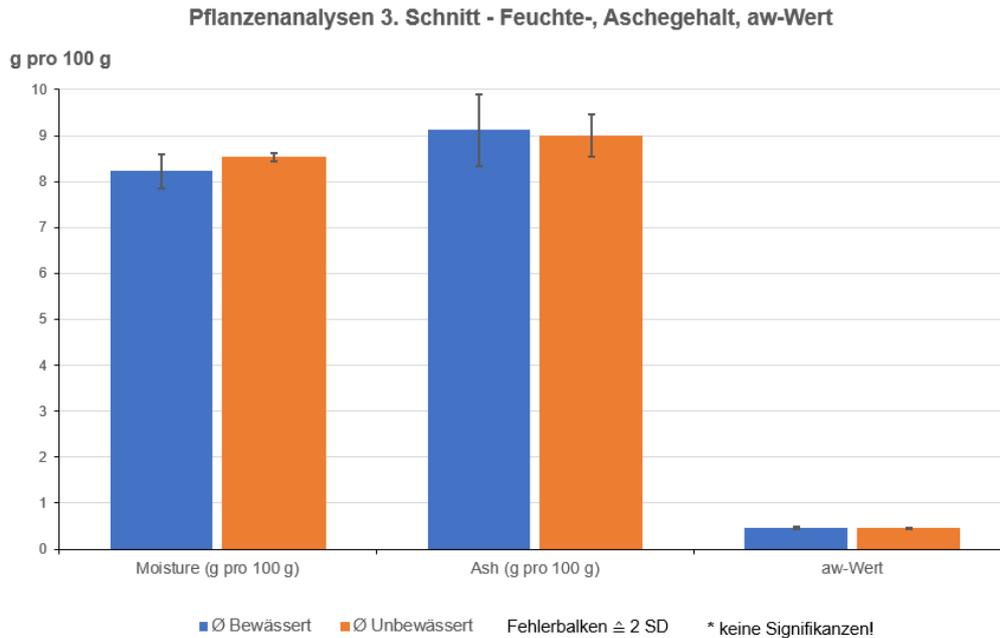


Abbildung 48: Feuchte-, Aschegehalt und aw-Wert 3. Schnitt, eigene Darstellung

5.7.4.3 Mikrobiologie und Pestizide

Mikrobiologische Untersuchungen sowie Analysen auf Pestizide fielen in allen Varianten sowie in allen Schnitten negativ aus bzw. lagen im Toleranzbereich.

5.7.4.4 Schwermetalle

Die Ergebnisse der Schwermetalle lagen alle im Toleranzbereich (maximal 5 mg kg⁻¹ Blei, maximal 0,1 mg kg⁻¹ Quecksilber (Hoppe 2013, S. 342) und maximal 0,05 mg kg⁻¹ Cadmium (GBA 2020, S. 2)). Im Laufe der Vegetationsperiode war ein leichter Anstieg der Gehalte zu verzeichnen. Dieser war am deutlichsten im Bleigehalt. Minimale Spuren von Cadmium waren in der Trockenmasse des 2. und 3. Schnitts vorzufinden, von Quecksilber beim 3. Schnitt. Zwischen den Varianten unterschieden sich die Schwermetallgehalte kaum, jedoch zwischen den Ernteterminen, vgl. Tabelle 19.

Tabelle 19: Schwermetalle aller drei Schnitt, eigene Darstellung

	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Blei_bew.	0,071	0,17	0,66
Blei_unbew.	0,046	0,16	0,69
Cadmium_bew.	<0,010	0,015	0,017
Cadmium_unbew.	<0,010	0,01	0,015
Quecksilber_bew.	<0,010	<0,010	0,016
Quecksilber_unbew.	<0,010	<0,010	0,02

5.8 Nährstoffabtrag Pfefferminze und Wassernutzungseffizienz

Die Nährstoffabträge der Pfefferminze wurden über das TB Unterfrauner, GmbH, analysiert. Grundlage für die vorliegenden Daten war die Trockenmasse des 3. Schnitts. Der 3. Schnitt wurde ausgewählt, da der 1. Schnitt beider Varianten kräftig war und die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der unbewässerten Variante einen Vorteil erbrachten, sodass kaum Differenzen bezüglich des Nährstoffabtrags zu erwarten waren. So auch beim 2. Schnitt; in den Wochen zwischen dem 1. und 2. Schnitt konnte nicht bewässert werden, da diese Zeit von Regenereignissen geprägt war, sodass keine Unterschiede bezüglich der Nährstoffgehalte zu erwarten waren.

Analysiert wurde die Trockenmasse der Blätter, Stängel sowie der gesamten Pflanze, jeweils von Parzelle 3, welche der bewässerten Variante angehörte, und Parzelle 8, welche der unbewässerten Variante zugeordnet war. Aus diesen Parzellen wurden ebenfalls die Bodenproben für die Ökologische Basischarakterisierung entnommen, vgl. Anhang, Kapitel 10.3 und 10.4. Die Nährstoffträge sind in kg ha^{-1} bzw. g ha^{-1} angegeben, vgl. Tabelle 20 und Tabelle 21. Dafür wurden die Originaldaten (mg kg^{-1}) anhand der geernteten Menge von Parzelle 3 und 8 auf die Nährstoffabträge pro Hektar hochgerechnet. Die Daten beziehen sich somit auf die konkreten Rahmenbedingungen der Parzelle 3 und 8.

Tabelle 20: Nährstoffabtrag Pfefferminze, Makronährstoffe und weitere Angaben nach (Unterfrauner 2020), eigene Hochrechnung auf kg ha^{-1}

Nährstoffgehalte:		kg ha^{-1}						%		
		Ca	Mg	P	N	S	K	WG	C _{org}	C/N
Parz. 3 (bew.)	Blätter	21,75	9,28	3,89	39,52	4,33	25,89	11	47	18,2
	Stängel	9,86	3,00	1,91	11,32	0,66	21,68	9	44	48,9
	Ganze Pfl.	38,02	13,16	6,87	51,47	3,39	53,22	8	45	25,4
Parz. 8 (unbew.)	Blätter	16,94	5,82	2,75	20,07	2,35	17,38	11	47	25,2
	Stängel	6,31	1,40	1,51	6,13	0,66	13,32	9	44	56,6
	Ganze Pfl.	27,58	9,92	4,35	31,03	2,49	30,82	8	46	30

Tabelle 21: Nährstoffabtrag Pfefferminze, Mikronährstoffe und Schwermetalle nach (Unterfrauner 2020), eigene Hochrechnung auf g ha^{-1}

Nährstoffgehalte:		g ha^{-1}									
		Al	As	B	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo
Parz. 3 (bew.)	Blätter	1110,53	0,46	0,00	0,00	0,46	2,44	18,23	1095,21	91,29	0,30
	Stängel	362,19	0,12	0,00	0,00	0,12	0,75	18,67	349,66	28,70	0,12
	Ganze Pfl.	1930,03	0,88	0,00	0,00	0,88	3,51	40,94	1930,03	140,37	0,29
Parz. 8 (unbew.)	Blätter	430,60	0,22	0,00	0,00	0,22	1,19	11,87	452,18	61,41	0,32
	Stängel	195,04	0,08	0,00	0,00	0,08	0,39	10,89	202,87	22,56	0,08
	Ganze Pfl.	1032,18	0,41	0,00	0,00	0,61	2,43	24,33	1072,73	107,27	0,41

Die Nährstoffabträge der bewässerten Variante waren bei allen Nährstoffen höher als die der unbewässerten Variante, ausgenommen Schwefel (S); hier war der Anteil in den Stängeln in beiden Varianten gleich hoch. Je höher die Abträge insgesamt waren, umso größer die Differenz von der bewässerten zur unbewässerten Variante. Bei geringen Mengen, die abgetragen wurden, waren die Unterschiede zwischen den Varianten nicht so groß. Die Werte des Wassergehaltes sowie des organisch gebundenen Kohlenstoffs lagen in beiden Varianten gleich bzw. ähnlich hoch, das C/N-Verhältnis war in der unbewässerten Variante höher als in der bewässerten. Der Wassergehalt der gesamten Pflanze lag ähnlich hoch wie der der Einzelanalysen des 3. Schnitts, s. Abbildung 48.

Wassernutzungseffizienz

Die Wassernutzungseffizienz wurde anhand des Mehrertrags des 3. Schnitts errechnet. Der Mehrertrag der trockenen Blätter beträgt $501,31 \text{ kg ha}^{-1}$, die Bewässerungsmenge vor dem 3. Schnitt war 27 mm . Daraus ergab sich eine WNE von $18,57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ für die trockene Blattmasse. Die WNE der gesamten Trockenmasse lag bei $36,81 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$.

5.9 Verkostungsergebnisse

Im Rahmen der Verkostung wurden die trockenen Blätter zunächst optisch bewertet. Die Bewertung erfolgte pro Schnitt im Vergleich der Schnitte untereinander, vgl. Tabelle 22.

Tabelle 22: Optische Bewertung der Pfefferminze, eigene Darstellung

1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
<ul style="list-style-type: none"> - Schöne, große und gut ausgeformte Blätter, kaum Bruchware - Kräftiges, sattes Grün - Ca. 5 cm lange Blätter 	<ul style="list-style-type: none"> - Mattes, braunes Grün - Mehr Bruchware als beim 3. Schnitt - Ca. 3 cm lange Blätter 	<ul style="list-style-type: none"> - Dunkleres Grün als Blätter des 1. Schnitts - Mehr Bruchware als beim 1. Schnitt - Unbewässert mehr Bruchware als Bewässert - Ca. 3 cm lange Blätter

Optisch wurde der 1. Schnitt am besten bewertet. Große und vor allem ganze Blätter gelten als Qualitätskriterium, da solche das ätherische Öl gut und lange speichern können. Sind die Blätter und damit auch die Zellen zerbrochen, verfliegt das Aroma schnell. Auch die Farbe der trockenen Blätter war hier am ansprechendsten für den Konsumenten. Die Ware des 3. Schnitts erhielt eine mittlere Bewertung, da die Blätter etwas kleiner waren und mehr Bruchware vorhanden war. Die trockenen Blätter des 2. Schnitt bestanden aus der meisten Bruchware und waren matt-braun bis grün gefärbt; dieser Schnitt erhielt die schlechteste Bewertung im Vergleich der Schnitte untereinander.

Bei der Farbgebung des Tees ließen sich kleine Unterschiede zwischen den Schnitten erkennen, vgl. Tabelle 23.

Tabelle 23: Färbung Pfefferminz-Tee, eigene Darstellung

1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Helles, frisches Grün	Dunkles Grün	Relativ helles Grün

Auch hier erfolgte die Bewertung der Tee-Färbung im Vergleich der Schnitte untereinander. Aus Konsumenten-Perspektive schnitt der 1. Schnitt mit seinem hellen, frischen Grün am besten ab, der Tee des 3. Schnitts folgte und die dunkelste Färbung hatte der 2. Schnitt. Eine dunkle Färbung wird durch den Gerbstoffgehalt (=Bitterstoffe) bestimmt. Je dunkler der Tee, umso stärker die *bittere Note*. So war anzunehmen, dass sich die Beobachtungen im Geschmack widerspiegeln.

In Tabelle 24 sind die Ergebnisse der sensorischen Bewertung zu finden. Eine höhere Zahl steht für eine stärkere Merkmalsausprägung (maximal 10).

Tabelle 24: Bewertung Geschmack der Pfefferminze, eigene Darstellung

Kriterium	1._bew.	1._unbew.	2._bew.	2._unbew.	3._bew.	3._unbew.
Typische Pfefferminznote	6	7	3	4	5	9
Süße	4	4	2	2	5	3
Herbe Note	1	1	2	3	2	3
Krautige Note	0	0	5	4	1	1

Die *typische Pfefferminznote* setzt sich aus dem Menthol- und Menthongehalt zusammen. Diese schnitt beim 1. Schnitt gut ab, jedoch auch die unbewässerte Variante des 3. Schnitts wies eine starke *typische Pfefferminznote* vor. Dieses Kriterium sowie die *Süße* der Pfefferminze bilden einen angenehmen Geschmack für den Konsumenten. Jedoch darf die *typische Pfefferminznote* nicht zu scharf werden, da dieses wiederum unangenehm wird. Ausschlaggebend ist das Zusammenspiel der einzelnen Kriterien und ein gutes Gleichgewicht. Eine *krautige Note* ist jedoch eher unerwünscht, da diese den Geschmack durch ihre grasige, holzige Komponente abwertet, eine latent *herbe Note* kann den Geschmack jedoch sehr rund machen. Da Geschmack eine sehr subjektive Wahrnehmung ist, sind Erfahrung, Schulung sowie mehrere Meinungen wichtig, um eine objektive Bewertung zu erzielen.

Das Fazit der Verkostung: Der 1. Schnitt erhielt die beste Bewertung im Vergleich der drei Schnitte untereinander. Sowohl optisch schnitt dieser mit den großen, gut ausgeformten Blättern gut ab als auch geschmacklich mit der frischen, leichten, süßlichen, runden Note. Der 3. Schnitt erhielt eine mittlere Bewertung, die Optik war durch etwas Bruchware gemindert und der Geschmack war sehr intensiv durch die starke *Pfefferminznote*. Dadurch litt der Geschmack an Leichtigkeit und wirkte weniger rund. Der 2. Schnitt erhielt im Vergleich zwischen den drei Schnitten untereinander die schlechteste Bewertung. Optisch waren die Blätter durch viel Bruchware nicht ansprechend und geschmacklich dominierte die *herbe, krautige Note*, die *typische Pfefferminznote* war nur schwach ausgeprägt. Jedoch schnitten alle Proben sensorisch besser ab als die Standardprobe.

5.10 Wurzelbild

Für die Bestimmung des Wurzelbildes wurde je eine Profilgrube der bewässerten und unbewässerten Variante gegraben, s. Abbildung 49 und Abbildung 50.



Abbildung 49: Wurzelprofil bewässert, eigene Aufnahme



Abbildung 50: Wurzelprofil unbewässert, eigene Aufnahme

Beide Wurzelprofile waren ca. 55 cm tief. In beiden Tiefen waren Wurzeln vorzufinden, deren Wurzelspitzen jeweils nicht ergündet wurden, sodass von Wurzeltiefen über 55 cm auszugehen war. In solche Tiefen führten lediglich vereinzelte Primärwurzeln mit Wurzelabzweigungen, das feine, dichte Wurzelnetz befand sich in den oberen 15 cm. Ein Wachstum der Wurzeln in Richtung des Bewässerungsschlauches konnte nicht festgestellt werden.

Der größte und einzige Unterschied bestand in der Wurzelfarbe. Die Wurzeln der bewässerten Variante waren hell und wirkten frisch, wogegen die der unbewässerten Variante eher dunkel und teilweise verholzt waren.

5.11 Berechnung monetärer Mehrerträge

Abhängig von der Qualität wird die Pfefferminze für Mono-Teepackungen, für Tee-Mischungen oder kleine Teebeutel verwendet. Große Blattware, welche für Mono-Teepackungen verwendet wird, entspricht der Klasse 1 und wird derzeit (Ernte 2020) mit 8,30 EUR pro kg Trockenware bezahlt (Netto-Preis Bio-Qualität, Demeter-Ware erhält einen Zuschlag von 10 %). Weitere Klassen, siehe Produktspezifikation Sonnentor, Kapitel 10.1 im Anhang, erhalten Preisabschläge (Klasse 2 erhält -10 %, Klasse 5 erhält einen Abschlag von -50 %). In Tabelle 25 sind **Näherungsrechnungen** für jene Klassen zu finden, in welche jeweils ein Großteil des Ernteguts eingeteilt wurde. Durch die sorgfältige Aufbereitung des Ernteguts kann die Ware des gleichen Schnitts bei unterschiedlicher Qualität in der entsprechenden Klasse

vermarktet werden. Beim 3. Schnitt war die Differenz in den Ertragsmengen zwischen den beiden Varianten am größten. Der Mehrertrag der bewässerten Variante ergab einen monetären Wert von 3.742 EUR bei einem Kilopreis von 7,47 EUR kg⁻¹, ein Großteil des Ernteguts wurde in Klasse 2 eingeteilt.

Tabelle 25: Monetäre Mehrerträge, eigene Darstellung

1. Schnitt	TM-Ertrag Blätter (kg ha⁻¹)	Klasse	Monetäre Einnahmen (EUR ha⁻¹)
Ø Bewässert	1751	1 (8,30 EUR kg ⁻¹)	14.533
Ø Unbewässert	1755		14.567
2. Schnitt			
Ø Bewässert	1278	2 (7,47 EUR kg ⁻¹)	9.547
Ø Unbewässert	961		7.179
3. Schnitt			
Ø Bewässert	1518	2 (7,47 EUR kg ⁻¹)	11.339
Ø Unbewässert	1017		7.597

6 Diskussion

Ziel der Arbeit war es, die positiven Effekte der Unterflur-Tropfbewässerung per wissenschaftlicher Methoden zu prüfen. Die übergeordnete Forschungsfrage des vorliegenden Versuches „**Welche Vorteile bietet eine Unterflur-Tropfbewässerung im Anbau von Bio-Pfefferminze in Bezug auf diverse Boden- und Pflanzenparameter?**“ lässt sich wie folgt beantworten: Die Verwendung einer UTB erhöht (kurzzeitig) den Bodenwassergehalt und gleicht damit negative Wasserbilanzen aus. Die Verfügbarkeit von Wasser und etwas mineralischem Stickstoff, (P_{CAL} kann aufgrund der geringen Ausgangsmengen nicht beantwortet werden), wird für die Pflanze erhöht, die Ertragsmengen werden gesteigert und die optische Qualität wird verbessert, vgl. Ergebnisse des 3. Schnitts in Kapitel 5.7.1; außerdem lässt sich das Unkrautmanagement durch den feuchten Boden leichter durchführen. Nachfolgend werden die einzelnen Parameter diskutiert und die untergeordneten Forschungsfragen separat beantwortet.

Unterscheiden sich der volumetrische und gravimetrische Wassergehalt zwischen der bewässerten und unbewässerten Variante? Es wurde hypothetisiert, dass die Wassergehalte in der bewässerten Variante höher sind. Die Versuchsperiode war von vielen Regenereignissen geprägt, sodass insgesamt nur sechsmal bewässert werden konnte. Drei der Bewässerungsereignisse fanden direkt zu Beginn der Datenaufnahme in der ersten Mai-Hälfte statt (04., 13. und 18. Mai). Die ersten Messtermine am 18. Mai (vor dem Bewässerungsereignis) und 19. Mai ergeben signifikant höhere Werte der bewässerten Variante in der *Oberen Schicht (0-40 cm)*. Die Differenz ist nach dem Bewässerungsereignis am 19. Mai größer als am Tag zuvor. Obwohl in den folgenden Wochen nicht bewässert wurde, halten die signifikant höheren Messergebnisse in der *Oberen Schicht* bis zum 02. Juni an. Zurückzuführen ist diese Tatsache auf die sandige / lehmige Bodenart (diese wurde anhand der oberen 30 cm des Bodens ermittelt), welche ausreichend Wasser zurückhalten kann, um kurze Trockenperioden zu überstehen (Unterfrauner 2020, S. 5). Werden die einzelnen Schichten der *Oberen Schicht* separat betrachtet, sind in *Schicht 2 (10-20 cm)* signifikante Unterschiede vom Beginn der Datenaufnahme bis zum 23. Juni zu erkennen. Verantwortlich dafür sind die Kapillarkräfte, durch welche das Wasser in höher liegende Schichten gezogen und dort gehalten wird. Außerdem reicht das dichte Wurzelnetz in eine Tiefe von bis zu 15 cm, vgl. Bestimmung des Wurzelbildes in Kapitel 5.10, durch dessen Wasserbedarf ein Gradient erzeugt wird, der den Wassertransport in obere Bodenschichten verursacht. Trotz einer beeinträchtigten Aggregatstabilität, vgl. Ökologische Basischarakterisierung (Unterfrauner 2020, S. 6), ist anzunehmen, dass *Schicht 2* durch die Kapillarkräfte länger feucht gehalten werden kann, da sich der Bewässerungsschlauch in unmittelbarer Nähe, (eigentlich 27 cm tief, aber beim Wurzeln Ausgraben lag der Schlauch näher an der Bodenoberfläche), befand. Die signifikanten Ergebnisse von *Schicht 2* ab dem 02. Juni bis zum 23. Juni finden sich jedoch nicht in der Auswertung der *Oberen* und *Gesamten Schicht* wieder wie auch das signifikante Ergebnis vom 18. August in *Schicht 3 (20-40 cm)*, in welcher der Bewässerungsschlauch lag. Am 18. August wurde am Abend zuvor bewässert, wodurch sich die Signifikanz in *Schicht 3* erklären lässt. Dieser Fall trifft auch auf das signifikante Ergebnis in der *Unteren Schicht* am

21. September zu. Dieses wurde auch in der Auswertung der *Gesamten Schicht* ermittelt. So lässt sich trotz der wenigen Bewässerungsereignisse aussagen, dass die wenigen, welche stattfanden, einen höheren Bodenwassergehalt verursachen und somit die angenommene Hypothese bestätigen. Vereinzelt wurden statistisch signifikante Unterschiede ohne ein vorheriges Bewässerungsereignis ermittelt, welche im Versuchsrahmen nicht zu erklären sind: höhere Werte am 15. August in der *Oberen Schicht* und am 25. August in der *Unteren Schicht*. Beide Ergebnisse erweisen sich auch als signifikant in der *Gesamten Schicht*.

Der **gravimetrische Wassergehalt** wurde nur zu den Ernteterminen erfasst. Jeweils vor den Ernteterminen fanden keine Bewässerungsereignisse statt. Jedoch sind die Wassergehalte zum 1. Erntetermin (08. Juli) in *Schicht 1, 2 und 4* der bewässerten Variante signifikant höher als in der unbewässerten Variante, wie auch die Ergebnisse der *Oberen, Unteren und Gesamten Schicht* zeigen. Beim 2. Erntetermin ist der Wassergehalt von *Schicht 3* der bewässerten Variante signifikant geringer als der der unbewässerten Variante. Diese Erkenntnisse sind nicht kongruent zu den Ergebnissen des volumetrischen Wassergehaltes, da letzterer keine signifikanten Messergebnisse zu den Ernteterminen aufweist und die Wassergehalte der unbewässerten Variante nur selten höher liegen als die der bewässerten. Beide Arten von Bodenwassergehalt wurden jedoch nach dem gleichen statistischen Vorgehen ausgewertet. Somit sind die widersprüchlichen Auswertungen vermutlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen. Die gravimetrischen Wassergehalte des 3. Erntetermins fallen nicht signifikant aus, wie auch die des vol. WGs. Eine Umrechnung des grav. WGs per angenommener Lagerungsdichte in den vol. WG ergeben keine einheitlichen Ergebnisse. Die meisten Umrechnungen trafen beim einem Umrechnungsfaktor von 1,6-1,8 g cm⁻³ zu. Die Ergebnisse des gravimetrischen Wassergehaltes widerlegen zum Teil die angenommene Hypothese, da die Werte des 2. und 3. Schnitts der unbewässerten Variante in den meisten Fällen etwas höher liegen als die der bewässerten Variante. Beim 1. Schnitt liegen die Werte der bewässerten Variante höher.

Unterscheidet sich der P_{cal} Gehalt zwischen der bewässerten und der unbewässerten Variante? Von folgender Hypothese wurde ausgegangen: Der pflanzenverfügbare Phosphor wird in der bewässerten Variante höher sein. Insgesamt liegen sehr geringe Phosphor-Werte am Versuchsstandort vor, vgl. Ökologische Basischarakterisierung (Unterfrauner 2020) sowie die Ergebnisse der entnommenen Bodenproben in Kapitel 5.5. In den meisten Fällen liegen die Phosphorgehalte beim 1. Schnitt in allen Schichten unter 10 mg kg⁻¹ Boden und damit unter dem optimalen Phosphorgehalt, welcher der Klasse B mit 21-44 mg P kg⁻¹ Boden entspricht (alte P Gehaltsklassen nach VDLUFA) (Holsten et al. 2016, S. 12–14). Davon ausgenommen sind Parzelle 6 und 7, welche Werte bis zu knapp 27 mg P kg⁻¹ Boden beim 1. Erntetermin erreichen. Beim 2. Schnitt liegen alle Werte maximal bei 7 mg P kg⁻¹ Boden und zum 3. Schnitt bei maximal 4 mg P kg⁻¹ Boden und dabei nicht selten bei 0 mg P oder unterhalb der Nachweisgrenze. Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten gibt es nur in *Schicht 1* beim 3. Erntetermin, hier liegt der Phosphorgehalt der bewässerten Variante um 1,5 mg P kg⁻¹ Boden signifikant höher als der der unbewässerten Variante. Alle anderen

Schichten des 3. Erntetermins ließen sich gar nicht bzw. nur in einzelnen Parzellen auf Phosphor bestimmen, sodass das signifikante Ergebnis auch zufällig sein könnte. Da Phosphor nur bei einem pH-Wert von 6,5-7,5 gut verfügbar ist (Unterfrauner 2013), ist dieser von Relevanz für die Erfassung des Bodenzustandes. Nach der Ökologischen Basischarakterisierung (Unterfrauner 2020) liegt eine starke Säuredegradation im Boden vor, es wurden pH-Werte von unter 6,5 ($\text{pH-Wert}_{\text{Wasser}}$) bzw. 5 ($\text{pH-Wert}_{\text{KCl}}$) ermittelt. Eigene Messungen im Labor ergaben $\text{pH-Werte}_{\text{CaCl}_2}$ von 6,3-7,2. Es ist ungewöhnlich, dass die $\text{pH-Werte}_{\text{CaCl}_2}$ über den $\text{pH-Werten}_{\text{Wasser}}$ liegen, da die am Probematerial adsorbierten H^+ -Ionen durch die Ca^{2+} -Ionen verdrängt werden und somit die potenzielle Säurekonzentration in der CaCl_2 Suspension höher liegen sollte als in einer Suspension mit Wasser. Somit ist davon auszugehen, dass die eigenen pH-Wert Messungen im Labor durch eine mangelnde Funktionstüchtigkeit der Elektrode verfälscht wurden. Für die Pfefferminze liegen die gemessenen $\text{pH-Werte}_{\text{Wasser}}$ und CaCl_2 im optimalen Bereich von 6-7,4 (Hoppe 2013). Liegt der pH-Wert tiefer als 6,5, können sich Aluminium- und Eisenphosphate bilden. Aluminium wurde zudem in sehr hohen Mengen im Boden ermittelt (Unterfrauner 2020), sodass dieses eine mögliche Erklärung für die geringen Phosphorwerte darstellt. Jedoch sind hohe Phosphorreserven im Boden enthalten, $\sim 900 \text{ kg ha}^{-1}$, welche es zu mobilisieren gilt. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann die Hypothese nicht beantwortet werden, da sich zu wenig pflanzenverfügbare Phosphor im Boden befand und dieser zwischen den Varianten nicht variierte.

Unterscheidet sich der N_{min} Gehalt zwischen der bewässerten und der unbewässerten Variante? Es wurde angenommen, dass der mineralische Stickstoffgehalt, sowohl Ammonium- als auch Nitratstickstoff, in der bewässerten Variante höher ist und mit jedem Schnitt sinkt. Die Mengen an mineralischem Stickstoff sind sehr gering am Versuchsstandort. Die Werte liegen meist unter 10 mg kg^{-1} und nehmen auch hier im Verlauf der Schnitte ab. Auffällig ist jedoch, dass die N_{min} Gehalte der bewässerten Variante beim 1. Schnitt höher liegen als in der unbewässerten Variante. Beim 2. Schnitt wurde N_{min} in *Schicht 3* und *Schicht 4* der bewässerten Variante gemessen, in der unbewässerten Variante konnte dagegen kein N_{min} ermittelt werden. Auch wenn die genannten Unterschiede an N_{min} Gehalten gering zwischen den Varianten sind, zeigen die Ergebnisse doch eine erhöhte Verfügbarkeit in der bewässerten Variante, womit sich die aufgestellte Hypothese bestätigen ließe. Jedoch unter dem Vorbehalt, dass keine statistisch signifikanten Ergebnisse dazu vorliegen.

Die analysierten N-Entzugswerte fallen ähnlich aus wie in der Literatur angegeben. Nach der Pflanzenanalyse von H. Unterfrauner, vgl. Kapitel 5.8, liegen die N-Entzugswerte in der bewässerten Variante bei knapp 40 kg ha^{-1} in der gesamten Pflanze. (Achtung: Pflanzenanalyse wurde vom Erntegut des 3. Schnitts (19. Oktober) durchgeführt). Die Entzugswerte werden in der Literatur mit knapp über 40 kg ha^{-1} Stickstoff angegeben (Biertümpfel et al., S. 7; Hoppe 2013, S. 327). Die analysierten Bodenproben zeigen, dass kein mineralischer Stickstoff zum Zeitpunkt des 3. Schnitts vorlag. Da der pflanzenverfügbare Stickstoff über mehrere Wochen aufgenommen wird, waren niedrige N_{min} Gehalte zum Erntetermin zu erwarten. Zudem muss der pflanzenverfügbare Stickstoff, der dem Boden

entzogen wird, nicht auf einmal vorliegen. So geben die Bodenanalysen Auskunft über die aktuelle N_{\min} Verfügbarkeit zum Zeitpunkt der Probenahme. Grundsätzlich sollte eine N-Zufuhr in Höhe der Entzugswerte der Pfefferminze erfolgen (LfL 2001, S. 3). Auch wenn der vorliegende N_{\min} Gehalt mit überwiegend weniger als 10 kg ha^{-1} sehr gering ist, ist von einer N-Düngung abzusehen, da hohe organische Stickstoffreserven im Boden vorliegen $\sim 5000 \text{ kg ha}^{-1}$, welche es zu mobilisieren gilt (Unterfrauner 2020).

Wie hängen die Bewässerungsereignisse, Niederschlagsmengen und die potenzielle Evapotranspiration als Einflussfaktoren auf den Bodenwassergehalt zusammen?

Die Forschungsfrage bezieht sich auf die Klimatische Wasserbilanz; es wurde davon ausgegangen, dass diese von Anfang Mai bis Ende August negativ ist und ab September vermehrt positiv. Im Zeitraum der Datenaufnahme zwischen dem 1. Mai und 24. Oktober wurde insgesamt eine potenzielle Verdunstung von 567 mm erfasst und eine Niederschlagsmenge von 567,5 mm. Somit ist die Klimatische Wasserbilanz im Zeitraum der Datenaufnahme ausgeglichen. Werden kleinere Zeiträume betrachtet, sind Differenzen zu beobachten. Von Anfang Mai bis Ende August liegt eine negative Klimatische Wasserbilanz von 77,5 mm vor. Von Anfang September bis Ende Oktober ist die Klimatische Wasserbilanz mit 78 mm im positiven Bereich. Damit kann die anfangs aufgestellte Hypothese bestätigt werden. Jedoch wurde die Klimatische Wasserbilanz auch wöchentlich ausgewertet. Die potenzielle Evapotranspiration stieg im Mittel bis Anfang Juli, erreichte Höchstwerte während des Julis und sank im Mittel ab Anfang August. Zu beobachten ist, dass die potenziellen Evapotranspirationsraten an den Tagen mit hohen Niederschlägen geringer sind. In den Wochen, in denen bewässert wurde, lag die Bilanz im negativen Bereich und wurde durch die Bewässerungsereignisse verringert. Somit war es möglich, temporäre Defizite auszugleichen und flexibel auf trockene Perioden zu reagieren. Insgesamt wurde mit 54 mm bewässert, wodurch im Zeitraum der Datenaufnahme insgesamt 621,5 mm Wasser in den Boden gelangten, sprich eine höhere Wassermenge, als potenziell verdunsten konnte.

Außerdem wurde hypothetisiert: Je höher der Niederschlag, desto höher der Bodenwassergehalt. Streudiagramm, Spearman-Korrelation und Korrelationskoeffizient weisen auf einen geringen Zusammenhang hin. Grundsätzlich stimmt die Annahme, dass Niederschläge den Bodenwassergehalt erhöhen, jedoch beeinflussen weitere Faktoren wie die Verdunstung, welche von der Temperatur bedingt wird, Bodenart oder Nutzungsbedingungen ebenfalls den Bodenwassergehalt, sodass die isolierte Betrachtung von Niederschlag und Bodenwassergehalt zu irrtümlichen Ergebnissen führt.

Die **Wasserverteilung im Boden** hängt stark von der Bodenart ab. Der am Versuchsstandort vorliegende tonig-schluffige Lehm, (Einschätzung mittels Fingerprobe am Feld, bezogen auf 0-70 cm) ist aufgrund der Porengrößen günstig für eine gute Wasserleitfähigkeit im Boden. Jedoch sind weitere Faktoren wie z. B. die Aggregatstabilität, welche beeinträchtigt ist, von Bedeutung für die Wasserverteilung im Boden. Der tonige B-Horizont neigt zudem zu einem Schmierhorizont, da dieser leicht verdichtet und somit wasserundurchlässiger ist. Für eine

Durchfeuchtung des Bodens sind Tropfer in Abständen von 30 cm effektiver anstatt von 50 cm (Bajpai und Kaushal 2020), letztere wurden im vorliegenden Versuch verwendet. Diese Tatsache sowie ein hohes Bewässerungsintervall fördern die horizontale Verbreitung, wodurch ein durchfeuchteter Horizont gebildet werden kann. Jedoch sind die lokalen Umstände und das zu verfolgende Ziel (muss nur ergänzend bewässert werden oder ist eine Bewässerung essenziell für den Aufwuchs) für die Situation vor Ort das entscheidende Kriterium für die Wahl eines Bewässerungssystems. Die Parabraunerde aus Löss z. B. kann ausreichend Wasser zurückhalten, um kurzzeitige Trockenperioden zu überstehen und die Bodentextur ermöglicht grundsätzlich eine gute horizontale als auch vertikale Wasserverteilung im Boden. Im Jahr der Versuchsdurchführung war der Trockenstress aufgrund der vielen Regenereignisse nicht groß. Somit sind in Anbetracht dieser Aspekte Tropfer mit Abständen von 50 cm nicht von Nachteil.

Für die Pfefferminze ist jedoch eine ungestörte Wasserführung wichtig, da die Kultur flach wurzelt (ein dichtes Wurzelnetz wurde in den oberen 15 cm beobachtet) und ein geringes Wasseraufnahmevermögen hat. Vor allem für die vegetative Vermehrung ist ein oberflächennahes Wachstum für die Pfefferminze von Vorteil, die Förderung der Wurzeln in die Tiefe über die UTB ermöglicht der Pfefferminze Zugang zu weiteren Nährstoffen und Wasser sowie eine gute Standfestigkeit.

Die Pfefferminze wird nach Röhricht als berechnungswürdige Kultur eingeordnet (Röhricht et al. 2003, S. 80). In Trockenperioden können Erträge gesichert und Ertragssteigerungen von um die 20 % Frischmasse erzielt werden (Hoppe 2013, S. 327). Dieses äußert sich auch monetär: Beim 3. Schnitt macht die Differenz zwischen den Varianten 3.742 EUR ha⁻¹ aus, bei einem Frischmassezuwachs von 75 % in der bewässerten Variante. Die Berechnung bezieht sich auf die Qualität der Klasse 2, welche hauptsächlich beim 3. Erntetermin erreicht wurde. Zu beachten ist, dass die Hektar-Erträge anhand der Parzellen hochgerechnet wurden, welche gepflegt und unkrautfrei waren. Auf anderen Beeten war der Unkrautdruck teilweise so stark, dass das Kraut nicht abgeerntet wurde. Bei den ökonomischen Aspekten sind auch die Kosten für das Unkrautmanagement relevant, welches über eine UTB deutlich leichter erfolgen kann, da der Boden durch den höheren Wasseranteil nicht so hart ist. Die Tatsache wurde beobachtet, Daten wurden dazu jedoch nicht erhoben. Ein kostengünstigeres Unkrautmanagement (sinkende Arbeitsstunden) ist für die Lukrativität der Unterflur-Tropfbewässerung von Bedeutung. Die höheren Ertragsmengen sowie die höhere optische Qualität und das Unkrautmanagement lassen einen ökonomischen Vorteil vermuten, welcher aber über weitere Jahre mit den anfänglich hohen Investitionskosten und geringen laufenden Kosten gegengerechnet werden muss.

Wie wirkt sich die Unterflur-Tropfbewässerung auf das Wurzelbild aus? Es wurde angenommen, dass der Wurzelraum der bewässerten Variante tiefer und stärker ausgebildet ist als der der unbewässerten Variante. Das Wurzelbild wurde spät in der Vegetationsperiode, am 25. November 2020, ausgegraben und analysiert, sodass ein eindeutig ausgeprägtes Wurzelbild erwartet werden konnte. Die Wurzeln waren tiefer als erwartet gewachsen, einzelne Primärwurzeln führten in Tiefen von über 55 cm in beiden Varianten. Ursachen dafür könnten

eine geringe Verfügbarkeit von Nährstoffen sowie trockene Bedingungen im Pflanzjahr 2019 bzw. Anfang 2020 sein, welche die Pflanzen tiefere Schichten ergründen ließen. Das tiefe Wurzelwachstum und das dichte Wurzelwerk in den oberen 15 cm führen zu einer guten Standfestigkeit für die Pfefferminze. Das Wurzelwachstum erfolgte in diesem Fall unabhängig vom Bewässerungssystem, den vielen Regenereignissen geschuldet, welche eine Bewässerung weitestgehend überflüssig machten. Somit kann die Hypothese nicht bestätigt werden. Einzig unterschiedlich war die Wurzelfarbe der beiden Varianten. Die Wurzeln der bewässerten Variante waren hell und wirkten frisch, während die der unbewässerten Variante dunkel und teilweise verholzt waren. Vermutlich hängt dieser Sachverhalt mit dem früheren Pflanzzeitpunkt (6 Wochen) der unbewässerten Variante im Juni 2019 zusammen, sodass sich deren Wurzeln früher entwickelt haben und diese älter erschienen. Außerdem wurde diese Variante während der Vegetationsperiode nicht bewässert, sodass den Pflanzen phasenweise weniger Wasser zur Verfügung stand (hauptsächlich im Mai 2020) und diese Trockenstress erlitten, was zum rascheren Altern der Wurzeln beitragen kann.

Verläuft die Pflanzenentwicklung zwischen den beiden Varianten unterschiedlich? Unterscheiden sich die frischen und trockenen Blätter optisch zwischen den beiden Varianten? Es wurde davon ausgegangen, dass die Pflanzen der bewässerten Variante größer und besser ausgewachsen sowie die Blätter schöner ausgeformt sind als die der unbewässerten. Eine unterschiedliche Pflanzenentwicklung wurde beim 1. Schnitt durch das Stadium, welches die Pflanzen zum Erntezeitpunkt erreicht hatten, deutlich. Die Pflanzen der unbewässerten Variante gingen schon in das generative Stadium über, erkennbar an den silbernen Köpfen. Die Pflanzen der bewässerten Variante hatten noch keine Blütenstände ausgebildet. Das vegetative Wachstum wurde somit durch die Bewässerung verzögert (Hoppe 2013, S. 327–328), was sich grundsätzlich positiv auf den Ölgehalt auswirkt, da dieser zu Blühbeginn seinen Höhepunkt erreicht (Hoppe 2013, S. 332). Die Analysen auf den ätherischen Ölgehalt fallen jedoch nicht bedeutend unterschiedlich aus. Zusätzlich zur Bewässerung kann auch der Wachstumsvorteil der unbewässerten Variante die Ursache für das etwas ältere Stadium dieser sein. Im Jahr 2019 wurde diese Variante 6 Wochen früher gepflanzt und zum besseren Anwachsen bewässert. Im Jahr der Datenaufnahme wurde diese Variante nicht bewässert und stellte die Kontrollvariante dar. Zum 1. Erntetermin sind die Pflanzen der bewässerten Variante genauso hochgewachsen wie die der unbewässerten (~80 cm) und die Blätter (trocken) beider Varianten waren mit einer Länge von bis zu 5 cm gut ausgeformt. Optisch erhielten diese die beste Bewertung im Vergleich zu den anderen beiden Schnitten.

Um die unterschiedlichen Ausgangsbedingungen der beiden Varianten zu verdeutlichen, wurden Aufnahmen der einzelnen Parzellen vom 18. Mai mittels der Soil Cover Software ausgewertet und in prozentualen Anteilen erfasst: durchschnittlich 8,8 % lebende Biomasse bei der bewässerten Variante und 24,8 % lebende Biomasse bei der unbewässerten Variante verdeutlichen die anfängliche Differenz zwischen den Varianten.

Beim 2. Erntetermin war die Pflanzenentwicklung aufgrund des Reinigungsschnitts insgesamt schlechter als beim 1. Erntetermin, die beiden Varianten unterschieden sich etwas deutlicher;

zum einen in der Wuchshöhe, die bewässerte Variante erreichte bis zu 50 cm, die unbewässerte um die 30 cm, zum anderen in den Blättern, welche in der bewässerten Variante in einem etwas kräftigeren Grün als in der unbewässerten standen.

Beim 3. Schnitt sind die optischen Unterschiede am deutlichsten: Die bewässerte Variante war mit um die 40 cm höher gewachsen als die unbewässerte und hatte kräftig grüne und gut ausgeformte Blätter, während die der unbewässerten Variante matt grün, klein und kümmerlich waren. Hiermit wird deutlich, dass die bewässerte Variante trotz anfänglicher Nachteile die unbewässerte Variante qualitativ (Form der Blätter) und quantitativ (Ertragsmenge) überholt hat, obwohl wenige Bewässerungsereignisse stattfanden. Zwar war die bewässerte Variante noch nicht so gut in Beet-Form verwachsen wie die unbewässerte Variante und hatte somit mehr Platz zwischen den Pflanzen, um sich auszubreiten, jedoch ist davon auszugehen, dass die größere „Platzverfügbarkeit“ nicht das entscheidende Kriterium für die optisch bessere Qualität der bewässerten Pflanzen ist. Auch der 6 Wochen spätere Pflanzzeitpunkt sollte nicht die Ursache für solche optischen Differenzen sein, da beide Varianten nach dem Winter gleichzeitig aufgewachsen sind. Somit lässt sich die Hypothese insgesamt bestätigen.

Gibt es Differenzen in den Erträgen der gesamten Frischmasse, der Trockenmasse der Blätter, Stängel und braunen Blätter? Es wurde angenommen, dass die Erträge, Frischmasse als auch Trockenmasse der bewässerten Variante höher ausfallen als die der unbewässerten Variante. Diese Annahme trifft beim 1. Schnitt nicht zu. Hier liegen alle ermittelten Ernteerträge in der unbewässerten Variante höher aufgrund des soeben geschilderten Wachstumsvorsprungs dieser. Beim Ertrag der trockenen Blätter erreichen jedoch beide Varianten $17,5 \text{ dt ha}^{-1}$. Somit sind die höheren Gesamternteerträge in der unbewässerten Variante auf den höheren Stängelanteil zurückzuführen, was als Vorteil der Bewässerung gewertet werden kann, da ein hoher Stängelanteil einen Qualitätsnachteil im Kräuteraanbau darstellt (das ätherische Öl befindet sich hauptsächlich in den Blättern). Beim 2. Schnitt ist der Stängelanteil in beiden Varianten am höchsten im Vergleich zu den anderen Schnitten. Die Ursache liegt in der Schnitthöhe (30 cm) des 1. Schnitts. Die Stängelreste sind bis zum 2. Erntetermin stehen geblieben und wurden in diesem Zusammenhang mit abgeerntet, da ein Reinigungsschnitt direkt nach dem 1. Schnitt aus zeitlichen Gründen ausblieb. Signifikant höher fällt beim 2. Schnitt der Anteil der Frischmasse der bewässerten Variante aus sowie die trockene Blattmasse derselben. Die vorliegenden Ergebnisse deuten bereits die positiven, langanhaltenden Auswirkungen der Bewässerung an, welche beim 3. Schnitt besonders deutlich sind: Hier liegen alle Ernteparameter der bewässerten Variante signifikant im höheren Bereich, bis auf die braunen Blätter, welche zwar einen höheren Anteil haben, der jedoch nicht signifikant ausfällt. In der Frischmasse liegt der Mehrertrag der bewässerten Variante bei 75 %, optisch ist dieser Unterschied gut zu erkennen. Die höhere Qualität sowie der Mehrertrag der bewässerten Variante lassen sich auf die Auswirkungen der Bewässerung zurückführen, auch wenn es nur wenige Ereignisse waren, welche jedoch einen langanhaltenden Effekt zeigen.

Die Auswirkungen einer Bewässerung spiegeln sich grundsätzlich im Trocknungsprozess wider: Ein gesteigerter Wassergehalt in der Pflanze erhöht den Trocknungsaufwand und somit

die Trocknungskosten (Hoppe 2013, S. 327–328). Auf dem Hof, auf dem der Versuch durchgeführt wurde, wird bei warmen Temperaturen die Trocknungsluft über das schwarze Außendach in den Trocknungsraum geleitet, sodass keine zusätzlichen monetären Kosten entstehen. Dieses ist jedoch nur bei sommerlichen Temperaturen möglich, ansonsten würden zusätzliche Heizkosten entstehen. In diesem Rahmen wurde der Trocknungsaufwand jedoch nicht erfasst.

Hochgerechnet auf den Hektar liegen die erhobenen Ernteergebnisse im Durchschnitt aller 3 Schnitte bei 126,37 dt ha⁻¹ Frischmasse in der bewässerten Variante und bei 105,74 dt ha⁻¹ in der unbewässerten Variante. Die Angaben in der Literatur sind sehr weit. Röhricht nennt Erträge von 300-500 dt ha⁻¹ in der Literatur, berichtet aber bei eigenen Erhebungen von Erträgen um die 77 dt ha⁻¹ im 5-jährigen Mittel im ökologischen Anbauverfahren. Die Erträge von ökologischen Produktionsverfahren im Heil- und Gewürzpflanzenanbau fallen um die 35 % geringer aus als im konventionellen Anbauverfahren (Röhricht et al. 2003, S. 32). Die LfL berichtet von 65-120 dt ha⁻¹ beim 1. Aufwuchs im Pflanzjahr (Reihenabstand 62,5-75 cm, Abstand in der Reihe 20-25 cm, mechanische Pflege zwischen den Reihen und Düngung in Höhe der Entzugsmengen) (LfL 2001). Die Ernteerträge des vorliegenden Versuches liegen mit 116,3 dt ha⁻¹ Frischmasse der bewässerten Variante zum 1. Schnitt innerhalb dieser Angabe. Jedoch ist zu beachten, dass die Pfefferminze dieses Versuches vor dem Winter gepflanzt wurde, sodass diese schon gut angewachsen und die Pfefferminze aus den Versuchen der LfL im Frühjahr des gleichen Erntejahres gepflanzt wurde.

Die Erträge der trockenen Blätter liegen in diesem Versuch im Durchschnitt (alle 3 Schnitte) bei 29,4 dt ha⁻¹ in der bewässerten Variante und bei 26,5 dt ha⁻¹ in der unbewässerten Variante. Röhricht schreibt mit 10-30 dt ha⁻¹ von ähnlichen Ertragsmengen im ökologischen Anbauverfahren (Röhricht et al. S. 86), die LfL erhebt in den Feldversuchen 8-13 dt ha⁻¹ im Pflanzjahr beim 1. Aufwuchs, im Folgejahr schon 27-33 dt ha⁻¹ beim 1. Aufwuchs (LfL 2001, S. 5). Im Vergleich zu den Erhebungen der LfL liegen die Erträge der einzelnen Schnitte im vorliegenden Versuch im unteren Bereich. Bezogen auf den Gesamtertrag eines Jahres liegen die Ergebnisse dieses Versuches aufgrund der 3 Erntetermine höher als die Ergebnisse der LfL im Pflanzjahr, in welchem nur 2 Schnitte durchgeführt wurden. Nach Hoppe wird von 3 Schnitten innerhalb einer Vegetationsperiode abgeraten, um stabile Erträge im Folgejahr zu erreichen (Hoppe 2013, S. 332). Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurde der 3. Schnitt vor allem zur Sicherung der Datengrundlage erhoben, in Jahren ohne Experiment wird individuell am Hof entschieden, ob sich ein 3. Schnitt in der Vegetationsperiode rechnet oder nicht.

Die **Blatt-Stängel-Verhältnisse** in diesem Versuch lassen sich über die bisher diskutierten optischen Qualitäten und erhobenen Ertragsmengen gut erklären. Beim 1. Schnitt liegt das Blatt-Stängel-Verhältnis in der bewässerten Variante bei 1,91, in der unbewässerten Variante bei 1,51. Der Unterschied ist signifikant. Obwohl der Ertrag (Frischmasse) in der unbewässerten Variante höher liegt, sind die trockenen Blättererträge der beiden Varianten fast gleich hoch, sodass sich ein günstigeres Blatt-Stängel-Verhältnis in der bewässerten Variante

ergibt. Ein hoher Blattanteil ist für den Kräuteraanbau erwünscht, da sich das meiste ätherische Öl an der unteren Blattseite in den Drüsenhaaren befindet (Hoppe 2013, S. 314). Beim 2. Schnitt liegen die Blatt-Stängel-Verhältnisse in beiden Varianten unter 1, zu begründen durch den Reinigungsschnitt. Auch hier liegt das Blatt-Stängel-Verhältnis in der bewässerten Variante höher, der Unterschied ist signifikant. Beim 3. Schnitt liegt das Verhältnis bei 1,32 bewässert und 1,44 unbewässert. Interessant ist, dass die signifikant höheren Erträge (alle Parameter außer die braunen Blätter) der bewässerten Variante ein ungünstigeres Blatt-Stängel-Verhältnis erzielen als die der unbewässerten Variante, welche optisch sehr schwach aussah und sehr geringe Ertragsmengen einbrachte. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass beim 1. Aufwuchs im Jahr am meisten Energie in die Blattproduktion fließt und dass sich mit weiteren Schnitten die Blattproduktion reduziert.

Die Angaben in der Literatur in Bezug auf das Blatt-Stängel-Verhältnis variieren sehr. Bei einem Reihenabstand von 60 cm, wie es auch in dem vorliegenden Versuch der Fall ist, wird von einem Blatt-Stängel-Verhältnis von 1,09 beim 1. Schnitt und 2,04 beim 2. Schnitt in der Trockenmasse berichtet (Beemnet et al. 2011, S. 51-52). Das bessere Verhältnis liegt somit im 2. Aufwuchs, von einem 3. Aufwuchs wird nicht berichtet.

Es wurde hypothetisiert, dass der **Anteil der braunen Blätter** in der bewässerten Variante geringer ausfallen wird als in der unbewässerten, begründet über den Effekt der Bewässerung. Trockenstress wird dadurch für die bewässerte Variante vermieden und somit die Bildung von braunen Blättern verhindert. Die These lässt sich beim 1. Erntetermin nicht bestätigen, der Anteil der braunen Blätter ist zwischen beiden Varianten ähnlich hoch, wie auch die trockene Blattmasse. Beim 2. Schnitt ist der Anteil der braunen Blätter in der bewässerten Variante signifikant geringer als in der unbewässerten, obwohl der gesamte trockene Blättertrag der bewässerten Variante höher ist. Die gleiche Tatsache wurde beim 3. Schnitt analysiert. Hier ist die Differenz jedoch nicht signifikant unterschiedlich. Somit kann die Hypothese anhand der Ergebnisse des 2. und 3. Schnitts bestätigt werden.

Unterscheiden sich die Ölgehalte (Menthon und Menthol) zwischen den Varianten? Es wurde davon ausgegangen, dass der Ölgehalt in der bewässerten Variante genauso hoch oder niedriger sein wird als in der unbewässerten. Die Ölgehalte liegen jeweils zu den Ernteterminen in beiden Varianten auf einem ähnlichen Niveau, variieren aber zwischen den einzelnen Schnitten. Der Ölgehalt der unbewässerten Variante liegt jeweils minimal höher als der der bewässerten, die Differenz ist beim 2. Schnitt mit 0,6 % am größten. Der ätherische Ölgehalt liegt beim 2. Schnitt im Vergleich zu den anderen beiden Schnitten mit 2,7 % in der bewässerten Variante und 3,3 % in der unbewässerten Variante auf dem höchsten Niveau. Jedoch hatte der 2. Schnitt in beiden Varianten den geringsten Blattanteil, erhielt sensorisch die schlechteste Bewertung mit einer krautigen, grasigen Note. Zwischen dem 1. und 2. Schnitt lag etwa ein Monat, es wurde nicht bewässert, da die Zeit von vielen Regenereignissen geprägt war. Die Zeit für das vegetative Wachstum war kürzer als bei den anderen beiden Schnitten, weshalb das ätherische Öl ggf. konzentrierter in der Pflanze vorliegt. Vor allem in

der unbewässerten Variante, welche ertragsmäßig zurückging, liegt der ätherische Ölgehalt höher. Zwischen dem 2. und 3. Erntetermin sind gute 2 Monate vergangen, sodass die Ölkonzentration in der Pflanze nachgelassen hat. Nach Hoppe nimmt der Anteil des Methons bei späten Ernteterminen ab und die Anteile an Menthol, Menthofuran und weiteren nehmen zu (Hoppe 2013, S. 332). Der 3. Erntetermin ist sowohl in der Vegetationsperiode als auch im Abstand zum 2. Erntetermin als zeitlich spät einzuordnen und Hoppes Angaben finden sich in den vorliegenden Ergebnissen bestätigt: Der Menthongehalt ist mit knapp 35 % deutlich geringer als z. B. beim 2. Schnitt mit knapp über 60 % (100%-Methode). Der Mentholgehalt ist dementsprechend gestiegen und liegt beim 3. Schnitt bei gut 37 %, während beim 2. Schnitt lediglich gute 11 % analysiert wurden (100%-Methode). Generell liegen die ätherischen Ölgehalte aller Schnitte im angestrebten Bereich von 0,5-4 % (Hoppe 2013, S. 310). Sensorisch sind die Differenzen in den Ölgehalten ebenfalls wahrzunehmen. So liegt z. B. der Menthofurangehalt mit über 5 % im 3. Schnitt am höchsten; sensorisch wird dieser Schnitt mit einer starken Pfefferminznote (-> Mentholgehalt) und einer etwas herberen Note (-> Menthofuran) beurteilt. Der starke Geschmack ist jedoch zu intensiv, sodass der 1. Schnitt sensorisch die beste Bewertung erhält. Der 2. Schnitt wird mit dem hohen ätherischen Ölgehalt sensorisch am schlechtesten bewertet, da die krautige Note dominiert. Im Vergleich der Varianten untereinander wird jeweils die unbewässerte Variante etwas besser beurteilt als die bewässerte Variante, woraus zu schlussfolgern ist, dass eine Bewässerung sensorisch gesehen keinen Vorteil bringt, jedoch optisch und quantitativ sehr. Auch Hoppe beschreibt, dass eine Bewässerung kaum Auswirkungen auf den Ölgehalt hat, da sich eine gute Wasserversorgung verstärkt auf die Wuchshöhe der Pfefferminze und die quantitativ höhere Frischmasse aufgrund der höheren Wassergehalte auswirkt, jedoch kaum zur Erhöhung des Drogenertrages führt (Hoppe 2013, S. 327–328). Zudem fallen bei gesteigerter Wuchshöhe die unteren Blätter ab oder werden gelb, wie es auch beim 1. Schnitt zu beobachten war. Anhand des schlechteren Blatt-Stängel-Verhältnis beim 3. Schnitt, bei welchem ausreichend Wasser zur Verfügung stand, lässt sich eine erhöhte Stängelproduktion im Verhältnis zu den Blättern bestätigen. Jedoch führen die deutlich höheren Erntemengen der bewässerten Variante beim 3. Schnitt über den quantitativen Faktor insgesamt zu höheren Mengen an ätherischem Öl. Zu beachten ist jedoch, dass die Verkostung nur anhand der zum Tee zubereiteten Blätter erfolgte, die Analysen im Labor jedoch anhand einer Mischprobe aus Blättern und Stängeln durchgeführt wurde, wodurch die Analyseergebnisse etwas reduziert werden, da sich in den Stängeln weniger ätherisches Öl befindet als in den Blättern. Insgesamt wurden jedoch alle Verkostungsproben dieses Versuches besser als die Standardprobe bewertet. Die Hypothese kann bestätigt werden, da die Ölgehalte beider Varianten auf einem ähnlichen Niveau sind bzw. in der unbewässerten Variante etwas höher liegen. Die Frage, wie sich eine erhöhte Wasserverfügbarkeit und damit eine erhöhte Produktion der Biomasse auf den Ölgehalt der Pflanzen auswirkt, wird anhand der Erläuterungen in diesem Absatz ebenfalls beantwortet.

Unterscheiden sich Feuchtegehalt, aw-Wert und Aschegehalt zwischen den Varianten?

Es wurde davon ausgegangen, dass alle drei Komponenten in der bewässerten Variante höher

sind als in der unbewässerten. Die Hypothese lässt sich nicht pauschal beantworten, da die **Feuchtegehalte** zum einen zwischen den Varianten, zum anderen zwischen den Schnitten variieren. Beim 1. Erntetermin liegt der Feuchtegehalt der unbewässerten Variante mit 9,9 % höher als in der bewässerten Variante mit 6,6 % und damit noch gerade im Toleranzbereich (max. 10 %). Eine Ursache könnte darin liegen, dass die unbewässerte Variante zu Beginn der Datenaufnahme dichter stand als die bewässerte Variante, welche mit dem Wachstumsnachteil in die Saison gestartet ist. Beim 2. Aufwuchs ist der Feuchtegehalt insgesamt am niedrigsten und liegt in der unbewässerten Variante mit 2,9 % geringer als der der bewässerten Variante mit 5,1 %. Beim 2. Erntetermin war es besonders heiß, sodass das Erntegut trocken abgeerntet wurde. Getrocknet wurde das Erntegut als ganze Pflanze auf Rahmen. Das Erntegut wurde nach Möglichkeit gleichmäßig auf den Rahmen verteilt, jedoch können abhängig von der Portionierung und der Platzierung der Rahmen in der Trocknungsanlage Unregelmäßigkeiten im Trocknungsprozess entstanden sein. Da der 3. Schnitt sehr spät (19. Oktober) stattfand, war das Klima schon entsprechend frisch und die Taubildung relativ hoch, sodass die Pflanzen relativ feucht abgeerntet wurden. Der Feuchtegehalt ist hier in beiden Varianten mit über 8 % hoch.

Der **aw-Wert**, welcher nicht höher als 0,7 liegen darf, vgl. Produktspezifikation Sonnentor im Anhang, Kapitel 10.1, verhält sich in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes und ist somit nicht immer in der bewässerten Variante höher. Die Werte liegen jedoch auch hier bei allen Schnitten im Toleranzbereich.

Der **Aschegehalt** ist in allen Varianten und zu jedem Schnitt mit um die 8 % ähnlich hoch. Es wird der Anteil beschrieben, der nach der Verbrennung zurückbleibt. Somit ist davon auszugehen, dass sich der Faseranteil zwischen den Varianten nicht bedeutend verändert hat (beim 3. Schnitt minimal höher) und das Erntegut bei allen Schnitten nicht stark verunreinigt war. So kann die Hypothese in Bezug auf den Aschegehalt ebenfalls nicht bestätigt werden.

Sind Unterschiede in Bezug auf die Mykotoxine, die Mikrobiologie, die Schwermetalle (Blei, Cadmium, Quecksilber) zwischen den beiden Varianten festzuhalten? Mykotoxine und Mikrobiologie liegen jeweils im Toleranzbereich und werden bei der Interpretation vernachlässigt. Die Schwermetalle liegen ebenfalls im Toleranzbereich und zwischen den beiden Varianten ähnlich hoch, steigen jedoch mit jedem Schnitt an, vor allem der Bleigehalt, welcher beim 1. Schnitt noch bei unter $0,1 \text{ mg kg}^{-1}$ liegt und zum 3. Schnitt bei knapp $0,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (GBA 2020). Die Gehalte der Schwermetalle wirken sich nicht negativ auf den ätherischen Ölgehalt oder dessen Zusammensetzung aus (Zheljazkov et al. 2006; Amirmoradi et al. 2012). Ein anthropogener Eintrag von Schwermetallen kann ausgeschlossen werden, da das Feld fernab von der Straße liegt, die Pfefferminze nicht gedüngt wurde und die Versuchsfläche einer strengen Bewirtschaftung nach den Demeter-Richtlinien seit dem Jahre 2006 unterliegt. Grundsätzlich können Bleieinträge auch über Staub, Niederschläge oder Metallwasserleitungen erfolgen und es liegt in Österreichs Ackerböden eine gewisse Grundbelastung mit Blei vor, vgl. Kapitel 10.17 im Anhang. Jedoch lässt sich damit nicht der

Anstieg der Schwermetalle innerhalb eines kurzen Zeitraums von sechs Monaten erklären. Vermutet wird eine zunehmende Mobilisation der Schwermetalle über das wachsende Wurzelsystem. Dieses ist von Schnitt zu Schnitt weiter ausgeprägt und könnte somit höhere Mengen an Schwermetallen mobilisiert haben. Genauere Ursachen können in diesem Rahmen jedoch nicht ergründet werden.

Die **Nährstoffentzüge der Pfefferminze** wurden beim 3. Schnitt von der gesamten Pflanze, den Blättern und den Stängeln erfasst, jeweils von der Trockenmasse. Alle Nährstoffe wurden in bedeutend höheren Mengen in den Blättern analysiert, in den Stängeln in deutlich geringeren Mengen. Die Gehalte unterscheiden sich deutlich zwischen den Varianten, alle Nährstoffgehalte liegen in der bewässerten Variante höher als in der unbewässerten Variante. Im zweistelligen Bereich (TM Blätter) liegen die Werte von Calcium ($\sim 22 \text{ kg ha}^{-1}$), Stickstoff ($\sim 40 \text{ kg ha}^{-1}$) und Kalium ($\sim 26 \text{ kg ha}^{-1}$), diese Werte beziehen sich auf die trockenen Blätter der bewässerten Variante. Damit liegen Calcium und Stickstoff bei ähnlichen Werten wie nach Biertümpfel et al. und Hoppe (Biertümpfel et al., S. 7; Hoppe 2013, S. 327) und Kalium deutlich unter den Angaben in der Literatur mit $\sim 45 \text{ kg ha}^{-1}$ (Hoppe 2013, S. 327). Die Phosphor-Entzüge decken sich ebenfalls mit den Angaben der Literatur, diese liegen unter 5 kg ha^{-1} (TM Blätter) und der Magnesium-Entzug liegt in den Versuchsdaten mit knapp 10 kg ha^{-1} (TM Blätter) etwas höher als in der Literatur ($\sim 5 \text{ kg ha}^{-1}$) (Biertümpfel et al., S. 7; Hoppe 2013, S. 327). Verglichen wurden die Werte der bewässerten Variante mit der Literatur. Obwohl die Bodenanalysen kaum pflanzenverfügbaren Phosphor aufweisen, entziehen die Pflanzen (bewässert) dem Boden nur etwas geringere Mengen als in der Literatur angegeben werden. Die Entzugswerte der unbewässerten Variante liegen bei knapp 3 kg P ha^{-1} (TM Blätter) und sind damit geringer. Weitere Spurenelemente betreffend, welche ebenfalls alle in der bewässerten Variante höher liegen, sind besonders auffällig Aluminium ($\sim 1110 \text{ g ha}^{-1}$), Eisen ($\sim 1100 \text{ g ha}^{-1}$) und Mangan ($\sim 90 \text{ g ha}^{-1}$), jeweils in der Trockenmasse der Blätter der bewässerten Variante. Aluminium und Eisen liegen mit diesen Angaben im doppelt so hoch wie die Entzugswerte der unbewässerten Variante. Aluminium wurde über die Ökologische Basischarakterisierung als sehr hoch und potenziell toxischer Stoff in der Bodenlösung eingestuft (Unterfrauner 2020).

Die insgesamt höheren Nährstoffentzüge der bewässerten Variante könnten auf die UTB zurückzuführen sein, da die Bewässerung eine ständige Verfügbarkeit der Nährstoffe über die Bodenlösung begünstigt.

Bedeutet hohe Nährstoffgehalte im Boden auch hohe Entzugswerte dieser über die Pflanze? Am Beispiel des Aluminiums ließe sich diese Frage bestätigen, am Beispiel des Phosphors würde die Frage widerlegt werden. Zudem sind die Zeitpunkte der Datenaufnahme zu beachten: Die Proben für die Ökologische Basischarakterisierung wurden Anfang Mai entnommen, die Proben für die Pflanzenanalysen im Oktober. In dieser Zwischenzeit können viele dynamische Prozesse im Boden stattgefunden haben.

Die in Kapitel 5.8 dargestellte **Wassernutzungseffizienz** von $18,57 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ wurde anhand des Mehrertrags der trockenen Blätter beim 3. Schnitt in Bezug auf die Bewässerungsmenge berechnet. Damit kann festgehalten werden, dass durch die Bewässerung über 500 kg ha^{-1} mehr trockene Blattmasse produziert wurde. Dieser Mehrertrag wirkt sich monetär auf zusätzliche $3.742 \text{ EUR ha}^{-1}$ aus, bei einem Kilopreis von $7,47 \text{ EUR kg}^{-1}$ für Ware der Klasse 2. Referenzwerte für die Wassernutzungseffizienz von Pfefferminze oder anderen Blattkräutern konnten in der Literatur nicht gefunden. Badr et al. berichten jedoch von der höchsten Wassernutzungseffizienz beim Einsatz einer UTB im Vergleich zu den herkömmlichen Bewässerungssystemen (Badr et al. 2010, S. 63).

Vorsichtig wurde folgende Hypothese aufgestellt: Ein hoher Niederschlag bzw. viele Bewässerungsereignisse bedingen einen hohen Bodenwassergehalt, daraus folgt eine hohe Verdunstungsrate, was zu einer hohen Biomasse-Produktion führt. Eine hohe Verdunstungsrate wird nicht nur über die Wasserverfügbarkeit, sondern besonders durch die Temperatur bedingt. Den Juli über war die potenzielle Verdunstung auf ihrem Höchststand und der 1. Erntetermin, bei dem die Pflanzen am höchsten gewachsen waren, lag Mitte Juli. Wasserknappheit war aufgrund der vielen Niederschläge nicht zu verzeichnen, sodass diese Tatsachen für die Hypothese sprechen, auch wenn fundierte Daten dazu fehlen.

Anhand der Diskussion wird deutlich, dass einige Hypothesen bestätigt werden können, auch wenn nicht alle erhobenen Daten mit einer Signifikanz dafürsprechen. Die vielen Regenereignisse haben die Unterschiede zwischen den beiden Varianten deutlich geschwächt, weshalb andere Hypothesen nicht bestätigt werden können. Der vorliegende Versuch bietet dennoch eine gute Grundlage an Erfahrungswert für Landwirte mit ähnlichen Vorhaben sowie für Langzeitstudien. Die Datengrundlage von 10 Parzellen, welche dreimal abgeerntet wurden, stellt für den Rahmen dieser Masterarbeit einen guten und realistischen Umfang dar. Langzeitstudien jedoch sichern die erhobenen Erkenntnisse, indem sich der Umfang über zusätzliche Wiederholungen vergrößert, die langfristigen Auswirkungen der UTB getestet und regenreiche Vegetationsperioden durch die anderen Jahre ausgeglichen werden können. Da sich der Kräuteranbau im Vergleich zu den gängigen Ackerbaukulturen in einer Nische befindet aber viel Potential mit sich bringt, werden in Feldversuchen wie dem Vorliegenden, wichtige Erkenntnisse für die Branche gesammelt. Zu beachten bleibt in solchen Fällen immer die Standortabhängigkeit sowie die vielen externen Einflussfaktoren wie Geologie, Klima oder Feldbearbeitungsmaßnahmen, welche jeder angebauten Kultur eine individuelle Note verleihen. Nichtsdestotrotz bieten die vorliegenden Ergebnisse im Allgemeinen eine gute Orientierung für den Anbau von Pfefferminze oder auch andere Kulturen.

7 Fazit

Aus der vorliegenden Arbeit geht hervor, dass eine Unterflur-Tropfbewässerung trotz eingeschränkter Verwendung vorteilhafte Auswirkungen auf diverse Boden- und Pflanzenparameter hat. Die UTB bedingt einen höheren Bodenwassergehalt sowie eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit, wodurch Trockenstress wie auch Nährstoffmangel für die Pflanze vermieden werden. Erträge werden gesichert und gesteigert, die vegetative Phase der Pfefferminze wird verlängert und die optische Qualität wird zum Ende der Vegetationsperiode im Vergleich zur unbewässerten Variante verbessert. Der Anteil der braunen Blätter reduziert sich durch eine Bewässerung, die Nährstoffentzüge über die Kultur werden gesteigert. Der Ölgehalt in der Pflanze selbst wird über die UTB nicht erhöht, jedoch wird über den Mehrertrag der bewässerten Pfefferminze ein erhöhter ätherischer Öl-Ertrag produziert. Auswirkungen der UTB auf das Blatt-Stängel-Verhältnis können anhand der vorliegenden Datengrundlage nicht abschließend bewertet werden, da das Blatt-Stängel-Verhältnis beim 1. und 2. Erntetermin in der bewässerten Variante günstiger ausfällt, beim 3. Erntetermin jedoch in der unbewässerten. Es können nicht alle anfänglich aufgestellten Hypothesen bestätigt und nicht alle Forschungsfragen beantwortet werden, vgl. diese im Einzelnen in der Diskussion. Auch differieren die Ergebnisse zum Teil von den Angaben aus der Literatur, denn eine Datenerhebung wie die Vorliegende führt zu standortbezogenen Ergebnissen. Standortbedingungen wie die Bodenart, das Klima oder die geografische Lage und Bewirtschaftungsmaßnahmen wie die Bodenbearbeitung, der Einsatz von Düngemitteln und Pflanzenschutzmitteln, das Unkrautmanagement und die Pflanzdichte der Pfefferminze beeinflussen jeden individuellen Bestand erheblich. So bietet diese Masterarbeit Anhaltspunkte und Erfahrungswerte für den Einsatz einer Unterflur-Tropfbewässerung, wie es auch die Ergebnisse der Literatur tun, jedoch sind die genannten Einflussquellen bei einer Umsetzung auf dem eigenen Betrieb stets zu berücksichtigen.

8 Ausblick

Während der Versuchsdurchführung wurden positive Effekte der Bewässerung auf das Unkrautmanagement festgestellt, dieses ist im feuchten Boden erheblich leichter durchzuführen. Auswirkungen auf sinkende variable Kosten könnten in weiteren Forschungsarbeiten erhoben werden, ebenfalls geringere Bewässerungskosten während der nächsten Vegetationsperioden. Neben den ökonomischen, vermutlich vorteilhaften Auswirkungen ist auch die vorhergesagte Langlebigkeit des eingesetzten Systems der Unterflur-Tropfbewässerung zu beobachten. Die eingesetzte Technik gilt als qualitativ hochwertig, 20-30 Jahre soll diese im Boden verbleiben. Anhand von Beobachtungen in der Praxis könnten wichtige Erkenntnisse über die Funktionstüchtigkeit dieser Bewässerungstechnik gewonnen werden. Treten Verstopfungen, Lecks usw. auf müssten diese arbeitsaufwändig behoben werden und würden die positiven Auswirkungen als auch die ökonomischen Vorteile der UTB mindern. Ebenso für zukünftige Entscheidungen relevant ist der Zeitpunkt, an dem der Break-even erreicht wäre. Damit wird der Zeitpunkt beschrieben, an dem sich die anfänglich hohen Investitionskosten durch qualitative Mehrerträge und geringere variable Kosten rentieren. Weitere Arbeitsjahre über diesen Zeitpunkt hinaus würden zu Profiten der UTB führen. Der Break-even errechnet sich im Detail betriebsindividuell, da die variablen Kosten von Betrieb zu Betrieb variieren.

Außerdem stellen die gesamte Fruchtfolgeplanung und Bodenbearbeitung zusätzliche Aspekte dar, welche im Einklang mit der UTB geplant und umgesetzt werden müssen. Veränderungen im Humus- und Gesamtstickstoffgehalt, bedingt durch eine UTB, sind ebenfalls eine spannende Beobachtung. Allerdings sind solche Entwicklungen nicht innerhalb einer Vegetationsperiode zu erwarten und festzustellen. Daher wurden im Frühjahr 2020 Bodenproben entnommen, welche auf die organische Substanz (C_{org}) sowie den Gesamtstickstoffgehalt (N_t) analysiert wurden. Es besteht die Möglichkeit nach ca. 10 Jahren erneut Bodenproben von den gleichen Stellen zu entnehmen und analysieren zu lassen, um Auswirkungen der Unterflur-Tropfbewässerung auf den organischen Nährstoffgehalt zu erfassen.

9 Literaturverzeichnis

- AGES (2020): Analyse auf Corg und Nt in 0-30 cm. Hg. v. Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion. Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit. Wien.
- Amirmoradi, Shahram; Moghaddam, Parviz Rezvani; Koocheki, Alireza, Danesh, Shahnaz, Fotovat, Amir (2012): View of Effect of Cadmium and Lead on Quantitative and Essential Oil Traits of Peppermint (*Mentha piperita* L.). In: *Notulae Scientia Biologicae* 4 (4), S. 101–109.
- AQUASTAT FAO (2014): Water from the clouds. Hg. v. Food and agriculture organization of the united nations. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/3/I9253EN/i9253en.pdf>, zuletzt geprüft am 03.03.2021.
- Arbat, Gerard; Cufí, Sílvia; Duran-Ros, Miquel; Pinsach, Jaume; Puig-Bargués, Jaume; Pujol, Joan; Ramírez de Cartagena, Francisco (2020): Modeling Approaches for Determining Dripline Depth and Irrigation Frequency of Subsurface Drip Irrigated Rice on Different Soil Textures. In: *Water* 12 (6), S. 1724.
- Badr, M. A.; Abou Hussein, S. D.; El-Tohamy, W. A.; Gruda, N. (2010): Efficiency of Subsurface Drip Irrigation for Potato Production Under Different Dry Stress Conditions. In: *Gesunde Pflanzen* 62 (2), S. 63–70.
- Bajpai, Arpna; Kaushal, Arun (2020): Soil moisture distribution under trickle irrigation: a review. In: *Water Supply* 20 (3), S. 761–772.
- Baumgarten, Andreas (2017): Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland. Anleitung zur Interpretation von Bodenuntersuchungsergebnisse in der Landwirtschaft. 7. Aufl. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt- und Wasserwirtschaft. Wien.
- Beemnet, Mengesha Kassahun; Jaime, A. Teixeira da Silva; Solomon, Abate Mekonnen (2011): Agronomic Characters, Leaf and Essential Oil Yield of Peppermint (*Mentha piperita* L.) as Influenced by Harvesting Age and Row Spacing. In: *Medicinal and Aromatiz Plant Science and Biotechnology* 5 (1), S. 49–53.
- Biertümpfel, Andrea; Warsitzka, Christina; Vetter, Armin: Nährstoffgehalte in der Frisch- und Trockenmasse von Pflanzen –(teilen) für Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalzium. Datensammlung. Themen-Nr.: 42.16.430. Hg. v. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Blume, Hans-Peter; Brümmer, Gerhard W.; Horn, Rainer; Kandeler, Ellen; Kögel-Knabner, Ingrid; Kretzschmar, Ruben et al. (2010): Scheffer/Schachtschabel. Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum.
- Bodenzustandsinventur des BFW aus BORIS (2006): Blei (Pb) im Oberboden (0 - 10 cm bzw. 0 - 20 cm) unter Berücksichtigung der Karbonatbeeinflussung. Unter Mitarbeit von Ingrid Roder. Hg. v. Umweltbundesamt.
- Böhm, Gunnar (2001): 2. Grundlagen - Refubium. 2.1 Meteorologischer Teil. 2.1.1 Aktuelle (reale) und potentielle Verdunstung. Hg. v. Freie Universität Berlin.
- Camp, Carl R. (1998): Subsurface Drip Irrigation: A Review. In: *Transactions of the ASAE* 41 (5), S. 1353–1367.
- Camp, Carl R.; Lamm, Freddie R. (2003): Irrigation Systems, Subsurface Drip. In: *Encyclopedia of Water Science*, S. 560–564.

- Camp, Carl R.; Lamm, Freddie R.; Evans, R. G.; Phene, C. J. (2000): Subsurface drip irrigation: Past, present, and future. In: *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium*, S. 363–372.
- Colaizzi, P. D.; Schneider, A. D.; Evett, S. R.; Howell, T. A. (2004): Comparison of SDI, LEPA, and SPRAY Irrigation Performance for Grain Sorghum. In: *Transactions of the ASAE* 47 (5), S. 1477–1492.
- Diringer, Stefan (2010): Gibt es in der Bodenphysik Möglichkeiten Einzelparameter durch einen einzelnen Summenparameter zu charakterisieren? Diplomarbeit. Universität Wien, Wien. Fakultät für Geowissenschaften, Geographie und Astronomie.
- Dunger, V. (2017): Grundlagen der Hydrologie und Hydrogeologie. Vorlesungsskript zur Lehrveranstaltung. Hg. v. Institut f. Geologie, Lehrstuhl für Hydrologie. Technische Universität, Bergakademie. Freiberg.
- eBOD: Digitale Bodenkarte. Hg. v. Website des Bundesforschungszentrums für Wald. Online verfügbar unter <https://bodenkarte.at/>, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- Eitzinger, Josef (2007): Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. Hg. v. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Wien.
- Enciso-Medina, J.; Multer, W. L.; Lamm, Freddie R. (2011): Management, Maintenance, and Water Quality Effects on the Long-term Performance of Subsurface Drip Irrigation Systems. In: *Applied Engineering in Agriculture* 27 (6), S. 969–978.
- Frede, Wolfgang (Hg.) (2010): Handbuch für Lebensmittelchemiker. Lebensmittel, Bedarfsgegenstände, Kosmetik, Futtermittel. 3., vollst. überarb. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer.
- GBA (2020): Certificate of analysis 20308698 - 001. Analyse Pfefferminze. Hg. v. Gesellschaft für Bioanalytik mbH. Hameln.
- Gerten, Dieter (2018): Wasser. Knappheit, Klimawandel, Welternährung. 1. Aufl. Bonn: C.H.Beck.
- Gil, Maria; Rodríguez-Sinobas, Leonor; Juana, Luis; Sánchez, Raül; Losada, A. (2008): Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. In: *Irrigation Science* 26 (6), S. 451–458.
- Gil, Maria; Rodríguez-Sinobas, Leonor; Sánchez, Raül; Juana, Luis (2011): Procedures for Determining Maximum Emitter Discharge in Subsurface Drip Irrigation. In: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 137 (5), S. 287–294.
- Haslinger, Klaus Josef (2015): WINFORE — ZAMG. Hg. v. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Klimasystem und Klimafolgen. Online verfügbar unter <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimaforschung/klimatografien/winfore>, zuletzt geprüft am 10.11.2020.
- Holsten, Bettina; Pfanerstill, Matthias; Trepel, Michael (2016): Phosphor in der Landschaft. Management eines begrenzt verfügbaren Nährstoffes. 1000. Aufl. Hg. v. Institut für Ökosystemforschung, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Kiel.
- Hoppe, Bernd (Hg.) (2010): Grundlagen des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus II. Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen Saluplanta e.V. Bernburg. 5 Bände (2).

- Hoppe, Bernd (Hg.) (2013): Handbuch des Arznei- und Gewürzpflanzenbaus. Arznei- und Gewürzpflanzen L-Z. Verein für Arznei- und Gewürzpflanzen Saluplanta e.V. Bernburg. 5 Bände (5).
- Hydrip GmbH (2020): HYDRIP® - save your water. Online verfügbar unter <http://www.hydrip.at/>, zuletzt geprüft am 23.04.2020.
- Josephinum Research Wieselburg: Soil Cover. Unter Mitarbeit von BLT Wieselburg Francisco Josephinum. Hg. v. Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt. Wieselburg. Online verfügbar unter <https://soilcover.josephinum.at/>, zuletzt geprüft am 01.02.2021.
- Lamm, F. R.; Rogers, D. H. (2017): Longevity and Performance of a Subsurface Drip Irrigation System. In: *Transactions of the ASABE* 60 (3), S. 931–939.
- Lamm, Freddie L.; Rogers, Danny H. (2015): Frequently and not-so-frequently asked questions about subsurface drip irrigation. In: *Kansas State Research and Extension*, S. 96–107.
- Lebensministerium (Hg.) (2010): Studie, Wasserverbrauch und Wasserbedarf. Teil 1: Literaturstudie zum Wasserverbrauch - Einflussfaktoren, Entwicklung und Prognosen. Wien.
- LfL (2001): Kulturanleitung für Pfefferminze. 4. Aufl. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Freising.
- Martínez, J.; Reça, J. (2014): Water Use Efficiency of Surface Drip Irrigation versus an Alternative Subsurface Drip Irrigation Method. In: *J. Irrig. Drain Eng.* 140 (10), 04014030-1 - 04014030-9.
- Matzer, Robert: Anleitung zum Lesen der chem. Bodenanalysen. Wien. Online verfügbar unter https://obstwein-technik.eu/App_Upload/User/ARGE_obstwein/Anleitung_chem_Analysen.pdf, zuletzt geprüft am 03.03.2021.
- Netafim (Hg.): Drip Irrigation Handbook. Understanding The Basics. Online verfügbar unter <https://www.netafim.com.mx/bynder/28DEA0B8-8EF1-4037-9EA133D578881E27-drip-irrigation-system-handbook.pdf>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.
- Nolz, Reinhard (2007): Unterflurtröpfchenbewässerung bei Wein im Seewinkel. Optimierung der Wasser- und Nährstoffversorgung durch neue Bewässerungs- und Monitoringsysteme. Hg. v. Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU). Universität für Bodenkultur (BOKU). Wien.
- ÖNORM L 1087 (2006): Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von "pflanzenverfügbarem" Phosphor und Kalium nach der Calcium-Acetat-Lactat (CAL) - Methode. Hg. v. Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM L 1091 (2020): Chemische Bodenuntersuchungen - Bestimmung von mineralischem Stickstoff durch Extraktion mit Calciumchloridlösung - Nmin-Methode. Hg. v. Österreichisches Normungsinstitut.
- Pichler, Gerd (2012): Ökologische Bodenbewertung und moderne Düngeberatung. Ableitung eines Prognosemodells für die Abschätzung der Wirkung von Meliorationsmaßnahmen auf den Bodenzustand. Paris Lodron-Universität Salzburg.
- Planner, Anna-Theresa (2015): Unterflurtropfbewässerung. Vor- und Nachteile sowie Anwendungsmöglichkeiten im Biolandbau. Universität für Bodenkultur (BOKU), Wien.

- Reinders, FB.; Grove, B., Stoep, I. v. d.; Nierkerk, v. AS. (2012): Technical Aspects and Cost Estimating Procedures of Surface and Subsurface Drip Irrigation Systems. A Manual for Irrigation Designers. Hg. v. ARC-Institute for Agricultural Engineering. Gezina, South Africa (WRC Report No. TT 525/12, 2).
- Röhricht, Christian; Karte, Tobias; Schubert, Mario (2003): Analyse der ökologischen Produktionsverfahren von Heil- und Gewürzpflanzen in Deutschland. Hg. v. Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Bonn.
- Rosnagl, Christian (2020): Sämtliche Infos / Absprachen rund um die Versuchsdurchführung. Groß Burgstall.
- Schiff, H. (1975): Berechnung der potentiellen Verdunstung und deren Vergleich mit aktuellen Verdunstungswerten von Lysimetern. In: *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B* 23 (4), S. 331–342.
- Schittenhelm, Siegfried (2009): Wassernutzungseffizienz von Energiepflanzen. Symposium "Energiepflanzen 2009". Hg. v. Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen. Julius Kühn-Institut. Berlin.
- Sonnentor (2020): Sonnentor & Johannes Gutmann. Hg. v. Sonnentor Kräuterhandels GmbH. Online verfügbar unter <https://www.sonnentor.com/de-at/ueber-uns/geschichte>, zuletzt geprüft am 23.04.2020.
- Sonnentor (2021): Die fabelhafte Welt der ätherischen Öle. Hg. v. Sonnentor Kräuterhandels GmbH. Online verfügbar unter <https://www.sonnentor.com/de-at/rezeptetipps/tipps/die-fabelhafte-welt-der-aetherischen-oele>, zuletzt geprüft am 03.02.2021.
- Top Agrar (2019): Beregnung. Höchste Effizienz: smarte Helfer. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH (Top agrar Ratgeber).
- Unterfrauner, Hans (2013): Phosphor im Boden, Versteckt? Ungenutzt? Hg. v. TB Unterfrauner GmbH. Wien.
- Unterfrauner, Hans (2020): BODEN - Ökologie - Analytik - Landschaft. Ökologische Basischarakterisierung Ökologische Pflanzencharakterisierung. TB Unterfrauner GmbH. Wien.
- VDLUFA Methodenbuch (2012): Kongressband 2012 Passau. Vorträge zum Generalthema: Nachhaltigkeitsindikatoren für die Landwirtschaft: Bestimmung und Eignung. Unter Mitarbeit von Berthold Deller. 4. Auflage. Darmstadt: VDLUFA-Verl. (VDLUFA-Schriftenreihe, 68).
- Waldviertel.at: Das Waldviertler Klima. Online verfügbar unter http://www.wetter-waldviertel.at/klima_waldviertel.htm, zuletzt geprüft am 03.12.2020.
- Weltagrarbericht.de: Wasser. Hg. v. Zukunftsstiftung Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.weltagrarbericht.de/themen-des-weltagrarberichts/wasser.html>, zuletzt geprüft am 30.06.2020.
- WIFO (2014): Ökonomische Analyse 2013 auf der Grundlage der Wasserrahmenrichtlinie. Unter Mitarbeit von Daniela Kletzan-Slamanig, Franz Sinabell, Dieter Pennerstorfer, Georg Böhs, Martin Schönhart und Erwin Schmid. Hg. v. Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung.
- Wurm, A. (2012): Unterstützung von Investitionen in nachhaltige Bewässerungstechnologie am ägyptischen Markt. Erhöhung der Kostenwahrheit durch die Kommunikation von

kostenrelevanten Multi-Kriterien des Technologieeinsatzes. Hg. v. Institut für Regional- und Umweltwirtschaft. Wirtschaftsuniversität Wien. Wien.

Zheljazkov, Valtcho D.; Craker, Lyle E.; Xing, Baoshan (2006): Effects of Cd, Pb, and Cu on growth and essential oil contents in dill, peppermint, and basil. In: *Environmental and Experimental Botany* 58 (1-3), S. 9–16.

10 Anhang

10.1 Produktspezifikation Sonnentor

Produkt- spezifikation



R0209

Pfefferminze bio

Lateinische Bezeichnung	Mentha x piperita
Sachbezeichnung	Bio-Pfefferminze
Nettofüllmenge	in Abstimmung mit dem Kunden
Zutaten	
MHD	36 Monate
Lagerhinweis	Vor Wärme geschützt und trocken lagern
Nährwerte pro 100 g/ml	Energiewert 1.172 kJ / 280 kcal Fett 3,00 g davon ges. Fettsäuren 2,10 g Kohlenhydrate 29,30 g davon Zucker 5,40 g Ballaststoffe 31,30 g Eiweiß 18,30 g Salz 0,01 g Die Nährwertangaben unterliegen den bei Naturprodukten üblichen Schwankungen. Sie basieren auf Daten aus Analysen oder aus Fachliteratur wie dem Bundeslebensmittelschlüssel.
Vegan	ja
Rohkost	ja
Gegenstand / Ware	getrocknete Blätter mit kurzen Blattstielen
Sensorik	
Optik	Trockenware: mattes dunkelgrün, getrocknete Blätter mit Stielansatz, glatte Ober- und Unterseite, vereinzelt braune Verfärbungen, 1-3 cm
Geruch	Sauer , Säuerlich , Minze
Geschmack	Minze , Ätherisch , Süßlich
Qualitätskriterien	
max. Restfeuchtigkeit in %	10
max. AW Wert	0.7
Feinanteil	Kräuterstaub bzw. Blätter bis 3mm, darf nicht mehr als 10% des Gesamtgewichtes betragen

erstellt am 15.05.20

Seite 1 von 4

Produkt- spezifikation



Qualität	<p>arttypisch in Farbe, Form, Geruch und Geschmack</p> <p>Klasse 1: Blattgröße mindestens 1-3 cm; Reinheit von 98%, max. 2% verfärbte Bätter und Fremdbesatz durch Beikräuter, Gräser und Fremdkräuter; Kräuterstaub bzw. Blätter bis 3mm, darf nicht mehr als 10% des Gesamtgewichtes betragen;</p> <p>Klasse 2: Blattgröße zwischen 0,2-2cm; Stängelanteil max. 5%, Reinheit von 95%, max. 5% verfärbte Blätter und Fremdbesatz durch Beikräuter, Gräser und Fremdkräuter</p> <p>Klasse 2h: Blattgröße zwischen 2-10mm; Stängelanteil max. 5%, Reinheit von 95%, max. 5% verfärbte Blätter und Fremdbesatz durch Beikräuter, Gräser und Fremdkräuter</p> <p>Klasse 4 (Rohware vor Reinigung/Aufbereitung): Kräuterstängel bis max. 8 cm; möglichst großer Anteil an ganzen Blättern, geringstmöglicher Anteil an Stängeln, verfärbten Blättern, geringstmöglicher Fremdbesatz durch Beikräuter, Gräser und Fremdkräuter</p> <p>Klasse 5: Feinabsiebung: 0,5-2mm; und oder Stängel- und Blattmischung mit einem Stängelanteil von max. 50%; keine Hauptstiele, Reinheit von 95%, max. 5% Fremdbesatz durch Beikräuter, Gräser und Fremdkräuter</p>		
Verunreinigungen	keine Fremdkörper wie Steine, Erdklumpen, Tier- und Kotverunreinigungen, Glas, Metall; toxische und gesundheitsschädliche Pflanzenteile zu 100 % ausschließen		
Krankheiten und Schädlingsbefall	Vermeidung von Schimmel, Rost, Mehltau, Klumpenbildung, Pilzbefall, Motten, Maden und Ungeziefer		
Laborparameter			
Mikrobiologie		Richtwert	Grenzwert
	E.coli	< 1x10 ³ KBE/g	< 1x10 ⁴ KBE/g
	präsumtive Bacillus cereus	< 1x10 ³ KBE/g	< 1x10 ⁴ KBE/g
	sulfitreduzierende Clostridien	< 1x10 ³ KBE/g	< 1x10 ⁴ KBE/g
	Schimmel	< 1x10 ⁵ KBE/g	< 1x10 ⁶ KBE/g
	Salmonella spp.	n.n. in 25g	n.n. in 25g
Pestizide	<p>Der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist generell verboten. In der Zwischenzeit sind die Laboratorien durch die fortschreitende Messtechnik jedoch in der Lage immer geringere Spuren von Pflanzenschutzmitteln aufzudecken. Dabei orientieren wir uns generell nach den Vorgaben des BNN (Bundesverband Naturkost Naturwaren Herstellung & Handel). Der Orientierungswert liegt bei 0,01 mg/kg für jede Substanz. Insgesamt dürfen nicht mehr als 2 Substanzen nachgewiesen werden. Substanzen mit einem Rückstandsgehalt von 0,01 mg/kg werden hierbei nicht berücksichtigt. Ein analytischer Streubereich von 50% darf berücksichtigt werden. Der genannte Grenzwert bezieht sich auf das getrocknete Produkt.</p>		
Gesetzliche und allgemeine Anforderungen			
Zertifizierung	Diese Ware muss der Erzeugung, der Verarbeitung, dem Transport und der Kennzeichnung laut EU-VO 834/07 und der Zertifizierung der Sonnentor Kräuterhandels Gesellschaft mbH entsprechen.		
Kontrollstelle	AT-BIO-301		
GVO	Gemäß der EU-VO 834/07 Artikel 9 dürfen genetisch veränderte Organismen und deren Derivate nicht verwendet werden.		

erstellt am 15.05.20

Seite 2 von 4

Produkt- spezifikation



Strahlenbelastung	Gemäß der EU-VO 834/07 Artikel 10 über den ökologischen Landbau ist eine Behandlung mit ionisierenden Strahlen verboten.
Vorratsschutz	Der Einsatz jeglicher chemischer Vorratsschutzmittel ist nicht erlaubt.
Zolltarifsnummer	12119086

Produkt- spezifikation



Allergenspezifikation

Basierend auf Anhang II der VO Nr. 1169/2011 betreffend der Information der Verbraucher über Lebensmittel und der ALBA Liste.

Allergene lt. LMIV Anhang II	in Rezeptur enthalten	in Rezeptur nicht enthalten
01 Gluten		x
01.1 Weizen		x
01.2 Roggen		x
01.3 Gerste		x
01.4 Hafer		x
01.5 Dinkel		x
01.6 Khorasan-Weizen		x
01.7 Einkorn		x
02 Krebstiere		x
03 Eier		x
04 Fische		x
05 Erdnüsse		x
06 Sojabohnen		x
07 Milch		x
07.1 Laktose		x
08 Schalenfrüchte		x
08.1 Mandeln		x
08.2 Haselnüsse		x
08.3 Walnüsse		x
08.4 Kaschunüsse		x
08.5 Pecannüsse		x
08.6 Paranüsse		x
08.7 Pistazien		x
08.8 Makadamianüsse/Queenslandnüsse		x
09 Sellerie		x
10 Senf		x
11 Sesamsamen		x
12 Schwefeldioxid und Sulfite		x
13 Lupinen		x
14 Weichtiere		x

Allergene lt. LMIV Anhang II

keine

SONNENTOR Kräuterhandels GmbH
Sprögnitz 10, 3910 Zwettl
office@sonnentor.at / +43(0)2875/7256

10.2 Nährstoffentzüge Pfefferminze

Nach (Biertümpfel et al., S. 7)

Art	Ertrag (dt/ha)	TS- Gehalt (%)	N- Gehalt (%)	N- Entzug (kg/ha)	P- Gehalt (%)	P ₂ O ₅ - Gehalt (%)	P- Entzug (kg/ha)	K- Gehalt (%)	K ₂ O- Gehalt (%)	K- Entzug (kg/ha)	Mg- Gehalt (%)	MgO- Gehalt (%)	Mg- Entzug (kg/ha)	Ca- Gehalt (%)	CaO- Gehalt (%)	Ca- Entzug (kg/ha)
Pfefferminze																
1. Standjahr																
(n = 5)																
Frischmasse																
\bar{x}	67,2	20,1	0,61	40,8	0,09	0,20	5,8	0,68	0,82	45,0	0,09	0,16	6,5	0,33	0,46	21,8
Max.	109,3	22,4	0,64	67,8	0,09	0,21	10,0	0,73	0,87	65,6	0,11	0,18	11,9	0,36	0,50	33,3
Min.	45,1	18,8	0,58	29,3	0,08	0,18	4,0	0,60	0,72	30,7	0,08	0,14	4,1	0,30	0,43	16,2
Trockenmasse																
\bar{x}	13,5	-	3,04	40,8	0,42	0,98	5,8	3,40	4,09	45,0	0,47	0,79	6,5	1,64	2,29	21,8
Max.	21,2	-	3,20	67,8	0,47	1,08	10,0	3,79	4,55	65,6	0,56	0,95	11,9	1,76	2,47	33,3
Min.	9,2	-	2,70	29,3	0,40	0,92	4,0	3,08	3,70	30,7	0,43	0,74	4,1	1,50	2,10	16,2
2. Standjahr																
(n = 9)																
Frischmasse																
\bar{x}	131,9	27,5	0,46	54,2	0,06	0,14	7,6	0,56	0,67	70,2	0,09	0,15	10,5	0,38	0,53	45,7
Max.	210,8	32,5	0,67	84,3	0,07	0,16	13,1	0,70	0,84	113,8	0,13	0,22	16,2	0,53	0,74	70,8
Min.	25,5	25,0	0,32	13,5	0,04	0,10	1,5	0,49	0,59	17,8	0,06	0,10	2,4	0,26	0,36	11,0
Trockenmasse																
\bar{x}	35,2	-	1,66	54,2	0,22	0,50	7,6	2,05	2,46	70,2	0,32	0,54	10,5	1,37	1,92	45,7
Max.	53,3	-	2,34	84,3	0,25	0,57	13,1	2,56	3,07	113,8	0,40	0,69	16,2	1,63	2,28	70,8
Min.	7,0	-	1,21	13,5	0,17	0,39	1,5	1,87	2,24	17,8	0,23	0,39	2,4	0,98	1,37	11,0
3. Standjahr																
(n = 9)																
Frischmasse																
\bar{x}	337,2	22,5	0,28	91,2	0,06	0,13	19,0	0,54	0,65	180,6	0,04	0,08	14,5	0,21	0,29	69,0
Max.	405,2	27,3	0,35	128,3	0,06	0,15	23,1	0,62	0,74	214,8	0,07	0,11	18,2	0,29	0,40	90,9
Min.	212,1	20,4	0,22	73,7	0,05	0,10	11,7	0,47	0,57	131,5	0,04	0,06	12,2	0,18	0,25	51,3
Trockenmasse																
\bar{x}	74,9	-	1,24	91,2	0,25	0,58	19,0	2,41	2,89	180,6	0,20	0,33	14,5	0,93	1,30	69,0
Max.	88,8	-	1,46	128,3	0,28	0,66	23,1	2,64	3,17	214,8	0,24	0,42	18,2	1,06	1,48	90,9
Min.	57,3	-	0,99	73,7	0,20	0,46	11,7	2,26	2,71	131,5	0,16	0,27	12,2	0,81	1,13	51,3

10.3 Ökologische Basischarakterisierung, Parzelle 3, bewässert



Kunde:
TBU Unterfrauner
1030 Wien
Österreich

Betrieb:
Helen Haupt
Österreich

Geschäftsführer DI Hans Unterfrauner
Rochuspark, Erdbergstraße 10/33, A-1030 Wien
office: +43 676 3641030
mobil: +43 664 3890397
office@bodenökologie.com
www.bodenökologie.com

FN 430626z / Gerichtsstand Wien
UID: AT U69409936
Bankverbindung: Erste Bank Oesterreich
IBAN: AT41 2011 1826 6448 0200
BIC: GIBAATWWXXX

Ökologische Basischarakterisierung BD 8070 (Probenahme am: 04.05.2020)

Probe:	Parzelle 3, bewässert
Probennehmer:	nicht bekannt
Lage:	nicht bekannt
Klima:	nicht bekannt
Kultur/Ertrag:	Apfelminze TS 3,0 t/ha
Labor:	Water & Waste, LabNr. agr20-0257.1 / 2020

Ergebnis:

Leicht/mittelschwerer Boden, kalkfrei, pH-Wert_{wasser} mäßig sauer, pH-Wert_{KCl} stark sauer, **starke Säuredegradation**. Aggregatstabilität beeinträchtigt, elektrische Leitfähigkeit niedrig, Gehalt organischer Substanz niedrig, Qualität organischer Substanz günstig.

Standort aktuell mittel sorptionsstark, Calcium- und Magnesium-Anteil am potentiellen Sorptionskomplex niedrig, Kalium sehr niedrig. Neigung zur Kalium-Fixierung. Potentielle Säure sehr hoch.

Mangel an pflanzenverfügbaren Stoffen (Phosphor, Kalium, Stickstoff, Eisen, Kupfer, Molybdän, Kobalt), Überschuss an Mangan, Zink, Bor, Silizium.

Kontaminationsgefahr durch wasserlösliche Aluminium-Gehalte.

Maßnahmen:

Aufbau von Dauerhumus (Mulchsaat, Untersaat, Kompost, Stallmist).

Zufuhr von Dolomit und Kalk zur Verbesserung und Stabilisierung des Puffersystems. Zufuhr von Calcium (Dolomit, Gips, Kalk), Kalium und Magnesium (Dolomit) zur Optimierung des Sorptionskomplexes. Zufuhr von Calcium (Dolomit, Gips, Kalk) und Magnesium (Dolomit) zur Verbesserung der Aggregatstabilität und zur Sicherung des Pflanzenbedarfes.

Mobilisierung der Reserven von Phosphor und Eisen, Ergänzung von Kalium, Stickstoff, Kupfer, Molybdän, Kobalt (bei Bedarf über Blattapplikationen).

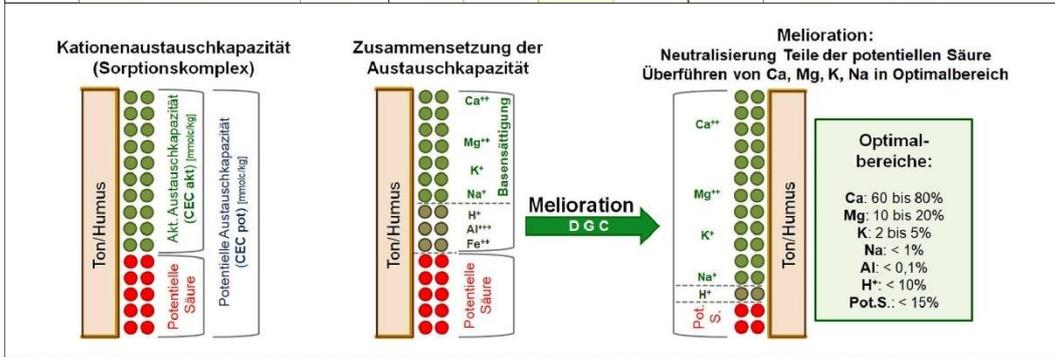
Wien, 30.06.2020



Schlagname: Parzelle 3

BASISEIGENSCHAFTEN		Tiefe: 0 - 27 cm	Skelettgehalt in Vol.-%: 0					Probendatum: 04.05.2020
Parameter	Wert	sehr niedrig	niedrig	günstig	hoch	sehr hoch	Einschätzung	
Bodenschwere (KH)	52	[Bar chart: 52% in 'sehr niedrig' range]						leicht/mittelschwerer Boden
pH Wert H2O [-log H ⁺]	6,0	[Bar chart: 6.0 in 'niedrig' range]						mäßig sauer
pH Wert KCl [-log H ⁺]	4,8	[Bar chart: 4.8 in 'sehr niedrig' range]						stark sauer
Kalkgehalt CaCO ₃ [%]	0,0	[Bar chart: 0% in 'sehr niedrig' range]						nicht nachweisbar
gelöste Stoffe [eL, mS/cm]	0,4	[Bar chart: 0.4 in 'niedrig' range]						niedrig
Org.Substanz [%] = Corg * 1,724	1,8	[Bar chart: 1.8 in 'niedrig' range]						Mulch
C/N Verhältnis der org. Substanz	7,8	[Bar chart: 7.8 in 'niedrig' range]						N Nachlieferung aus org. Substanz
C/P Verhältnis der org. Substanz	45,8	[Bar chart: 45.8 in 'niedrig' range]						P Nachlieferung aus org. Substanz
C/S Verhältnis der org. Substanz	99	[Bar chart: 99 in 'niedrig' range]						S Nachlieferung aus org. Substanz
Stabilität organische Substanz	1	[Bar chart: 1 in 'niedrig' range]						Umbauprozesse im Gleichgewicht
Stabilität Aggregate	3	[Bar chart: 3 in 'niedrig' range]						Erosionsgefahr hoch

KATIONENAUSTAUSCHKAPAZITÄT (CEC); Gesamtpotential = CEC potentiell; aktuell genutztes Potential = CEC aktuell								
CEC potentiell [mmolc/kg]		179	[Bar chart: 179 in 'sehr niedrig' range]					pot sehr sorptionsstark
CEC aktuell [mmolc/kg]		101	[Bar chart: 101 in 'niedrig' range]					akt mittel sorptionsstark
CEC akt in % CEC pot		56	[Bar chart: 56% in 'sehr niedrig' range]					sehr niedrig
Basensättigung in % CEC pot		56	[Bar chart: 56% in 'niedrig' range]					Gefahr Versauerung
Elemente bez. auf CEC pot	Ca in % CECpot	43,3	[Bar chart: 43.3% in 'niedrig' range]					niedrig
	Mg in % CECpot	12,0	[Bar chart: 12.0% in 'niedrig' range]					niedrig
	K in % CECpot	0,6	[Bar chart: 0.6% in 'sehr niedrig' range]					sehr niedrig
	Na in % CECpot	0,2	[Bar chart: 0.2% in 'günstig' range]					günstig
	Al in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]					günstig
	NH ₄ N in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]					günstig
	Fe in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]					günstig
	Mn in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]					günstig
	H in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'aktuelle Säure gering' range]					aktuelle Säure gering
Pot. Säure in % CECpot		43,8	[Bar chart: 43.8% in 'sehr hoch' range]					sehr hoch
Elemente bez. auf CEC akt	Ca in % CECakt	77,0	[Bar chart: 77.0% in 'hoch' range]					hoch
	Mg in % CECakt	21,4	[Bar chart: 21.4% in 'hoch' range]					hoch
	K in % CECakt	1,1	[Bar chart: 1.1% in 'sehr niedrig' range]					sehr niedrig
	Na in % CECakt	0,4	[Bar chart: 0.4% in 'günstig' range]					günstig
	Al in % CECakt	0,1	[Bar chart: 0.1% in 'günstig' range]					günstig
	H in % CECakt	0,0	[Bar chart: 0% in 'aktuelle Säure gering' range]					aktuelle Säure gering



MELIORATION in kg/ha – Maßnahmen zur Verbesserung / Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit					
min.	Dolomit* (mit 40% MgCO ₃)	Gips* (CaSO ₄ * 2 H ₂ O)	Calc* (CaCO ₃)	Magnesium (Mg)	Kalium (K)
	2010 kg/ha	660 kg/ha	6120 kg/ha		850 kg/ha
org.	Aufbau Dauerhumus	Mulchsaat, Untersaat, Kompost, Stallmist			
	32950 kg/ha				

*Berechnung bezieht sich auf qualitativ hochwertige, feinvermahlene Produkte!



PFLANZENERNÄHRUNG Probe BD 8070



Schlagname: Parzelle 3

Kultur: Apfelmünze TS

Ertrag: 3,0 t/ha

PLANZENVERFÜGBARE STOFFE zum Zeitpunkt der Probenahme: 04.05.2020							Tiefe: 0 - 27 cm	
Nährstoff [kg/ha]	Wert	sehr niedrig	niedrig	günstig	hoch	sehr hoch	Diff. 1	Einschätzung
Calcium (Ca)	3750							Überschuss
Magnesium (Mg)	635							ausreichend
Kalium (K)	110						30	Mangel
Phosphor (P)	0						20	starker Mangel
Stickstoff (N)	63,3						30	Mangel
Sulfat (SO ₄)	29,9							ausreichend
Eisen (Fe)	1,2						1,10	Mangel
Mangan (Mn)	0,35							extremer Überschuss
Kupfer (Cu)	0,01						0,09	starker Mangel
Zink (Zn)	0,38							extremer Überschuss
Molybdän (Mo)	0,00						0,05	starker Mangel
Bor (B)	0,26							extremer Überschuss
Silizium (Si)	62,1							extremer Überschuss
Kobalt (Co)	0,000							starker Mangel

ORGANISCH GEBUNDENE NÄHRSTOFFE [kg/ha] und Mineralisierungspotential [kg/ha und Jahr]					
Nährstoff	Org. gebunden gesamt	Einschätzung	Mineralisierungspotential		
org. Kohlenstoff (C org)	41550	Humusaufbau	332	bis	623
org. Stickstoff (N org)	5491	hohe Reserven	44	bis	82
org. Phosphor (P org)	908	hohe Reserven	7	bis	14
org. Schwefel (S org)	421	hohe Reserven	3	bis	6

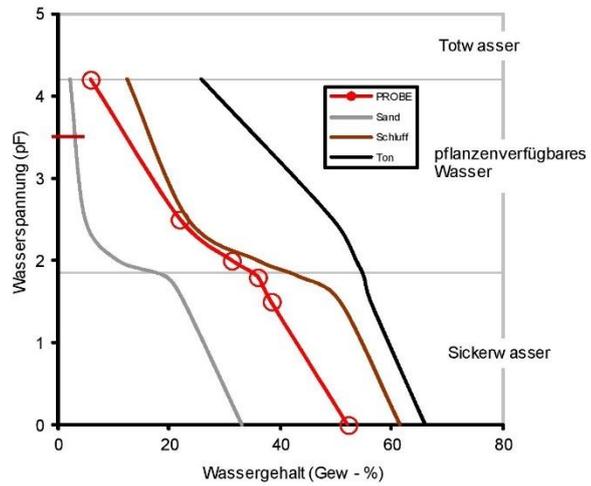
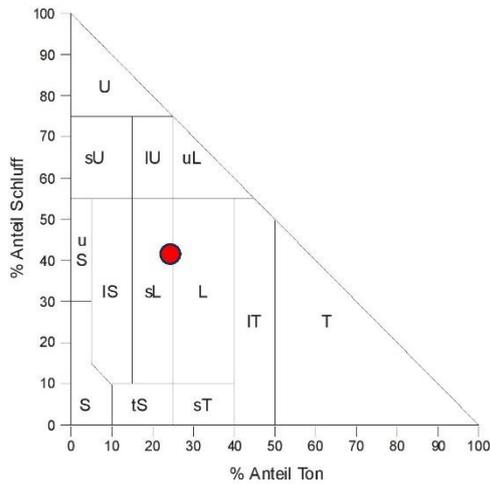
POTENTIELL TOXISCHE STOFFE in der Bodenlösung		
Aluminium (Al)		Kontaminationsgefahr
As, Ni, Cr, Pb, Cd		keine Auffälligkeiten

FRAKTIONEN: wasserlöslich, austauschbar, Reserve					
Bodenlösung [mg/l]		Austauschbar [kg/ha]		Reservegehalte [kg/ha]	
Calcium (Ca)	44,34	Calcium (Ca)	3694	Calcium (Ca)	4800
Magnesium (Mg)	9,67	Magnesium (Mg)	622	Magnesium (Mg)	2800
Kalium (K)	2,87	Kalium (K)	106	Kalium (K)	2400
Natrium (Na)	5,88	Natrium (Na)	20	Natrium (Na)	100
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	0,13	Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	0	Stickstoff total (N tot)	5554
Nitratstickstoff (NO ₃ -N)	38,52				
Phosphor (P)	0,08	Phosphor (P)	0	Phosphor min. (P min)	350
				Phosphor total (P tot)	1740
Sulfat (SO ₄)	14,70			Schwefel total (S tot)	431
Chlorid (Cl)	3,99				
Aluminium (Al)	0,08	Aluminium (Al)	1,09	Aluminium (Al)	14000
Eisen (Fe)	0,46	Eisen (Fe)	0,62	Eisen (Fe)	12400
Mangan (Mn)	0,01	Mangan (Mn)	0,33	Mangan (Mn)	1785
Bor (B)	0,10	Bor (B)	0,14	Bor (B)	5
Zink (Zn)	0,00	Zink (Zn)	0,38	Zink (Zn)	55
Kupfer (Cu)	0,01	Kupfer (Cu)	0,00	Kupfer (Cu)	30
Molybdän (Mo)	0,00	Molybdän (Mo)	0,00	Molybdän (Mo)	0

MOBILISIERUNG:	Phosphor, Eisen,
ZUFUHR:	Kalium, Stickstoff, Kupfer, Molybdän, Kobalt

¹ Differenz des Pflanzenbedarfs während der gesamten Vegetationsperiode zum Zeitpunkt der Probenahme

Bodenphysikalische Ableitungen PNR.: BD 8070



Österreichisches Texturdreieck OENorm L 1050

Wasserspannung und Wassergehalt

Quelle: Stefan Diring (2010): Gibt es in der Bodenphysik Möglichkeiten Einzelparameter durch einen einzelnen Summenparameter zu charakterisieren? Wissenschaftliche Diplomarbeit. Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien



Detailbild der Bodenprobe

Erläuterungen zu den Übersichtsblättern „Bodeneigenschaften“, „Pflanzenernährung“ und „Bodenphysikalische Ableitungen“

Basiseigenschaften (siehe Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“)

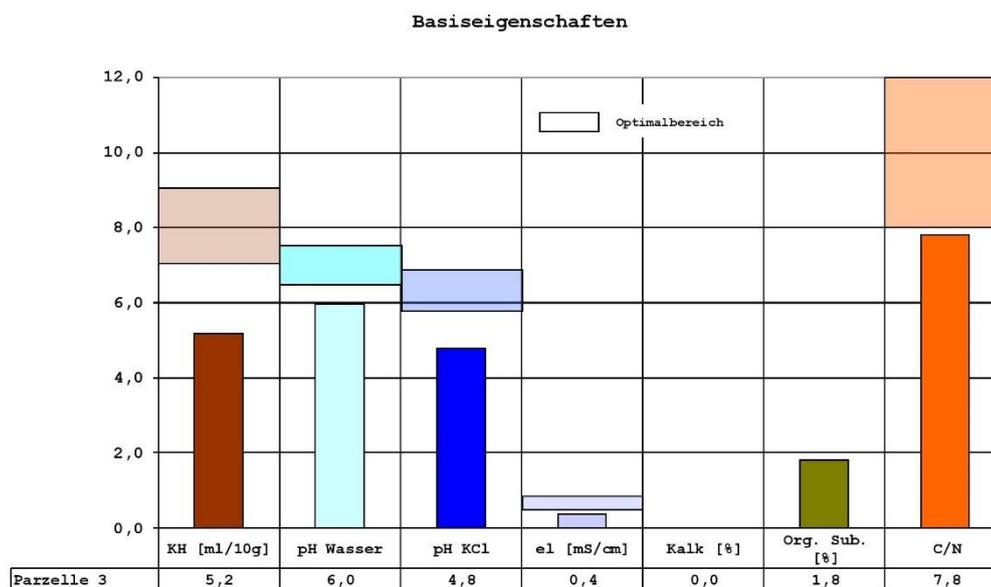


Abbildung: Basiseigenschaften des Bodens

Bodenschwere/Wasserhaushalt

Die sandige/lehmgige **Bodenart** bedingt einen **leicht/mittelschweren** Boden. Bei voller Wassersättigung kann der Boden ~ 5,2 ml Wasser pro 10 g zurückhalten, diese Menge entspricht etwa einer Wassermenge von 950 m³/ha bei 27 cm Tiefe. Bei voller Wassersättigung im Winter/Frühjahr reicht dies aus, um kurze Trockenperioden (Frühsummertrockenheit) unbeschadet zu überbrücken.

Die **pF-Kurve** auf dem Blatt für „Bodenphysikalische Ableitungen“ zeigt, bei welchen Wassergehalten in Gewichtsprozent (Gew.%) welche Saugspannungen (pF) herrschen. Unterhalb von pF 1,8 ist das Wasser schwach gebunden (Sickerwasser) und nicht pflanzenverfügbar. Von pF 1,8 bis 4,2 liegt der Bereich des pflanzenverfügbaren Wassers (= nutzbare Feldkapazität). Oberhalb von pF 4,2 ist das Wasser im Boden bereits so stark gebunden, dass die „Kräfte“ der meisten Kulturpflanzen nicht mehr ausreichen, das Wasser dem Boden zu entziehen, die Pflanzen welken („Welkepunkt“). Der energetische „Knackpunkt“ liegt bei pF 3,5. Ab dieser Saugspannung benötigt die Pflanze mehr Energie, dem Boden Wasser zu entziehen, als über die Photosynthese gebunden werden kann. Besteht die Möglichkeit einer Bewässerung sollte spätestens bei der Saugspannung von pF 3,5 (im Diagramm rot markiert) damit begonnen werden.

Um den aktuellen Zustand der Wasserspannung festzustellen genügt es, eine repräsentative Bodenprobe zu entnehmen. Diese wird im feuchten und trockenen Zustand gewogen, der Gewichtsunterschied entspricht dem Wassergehalt. Mit dem Relativbezug (Wassergehalt in %) kann direkt über die pF-Kurve der Abbildung die Saugspannung abgelesen werden.

Aggregatstabilität

Die **Aggregatstabilität** ist **beeinträchtigt**, beim Ausschütteln der Probe mit destilliertem Wasser war die überstehende Flüssigkeit **getrübt**. Die Trübung beruht darauf, dass Brücken zwischen Bodenteilchen zerstört werden und die Feinteilchen in Suspension gehen.

Am Acker kann das bedeuten, dass **Aggregate** beispielsweise durch Regenschlag sowie bei Bearbeitung oder Befahren des Bodens **teilweise zerstört** werden. Dies führt zu Problemen im Wasser- und Lufthaushalt. Die **Erosionsgefahr** ist **hoch**. Die Stabilität der Aggregate kann durch die Zufuhr von Calcium als Brücke zwischen den Tonteilchen verbessert werden.

pH-Wert

Der pH_{Wasser} liegt im mäßig sauren Bereich (**6,0**), im Neutralsalz liegt der **pH**-Wert (KCl) bei **stark sauren 4,8**. Das **Puffersystem** liegt im Übergangsbereich des **Silikatpuffers zum Aluminiumpuffer**. Ab pH-Werten (KCl) von < 5,5 lösen sich die Tonminerale auf, deren Bestandteile (z.B. Al, Fe, Si) gehen massiv in Lösung und können ausgewaschen werden. Dies führt einerseits dazu, dass wichtige Austauscherflächen verloren gehen und andererseits der Boden weiter versauert (z.B. durch Al-Hydroxide). Aluminium ist toxisch für Pflanzen und kann die Qualität der Ernteprodukte stark beeinträchtigen. Zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit muss unbedingt das Säurepufferungsvermögen verbessert werden (Ziel pH_{KCl} : 5,9-6,9).

Für die **Mikroorganismen** liegt das pH_{Wasser} -Optimum zwischen 6,5 und 7,5. Bei stark sauren Verhältnissen nimmt die Anzahl der Arten ab und es erfolgt eine Verschiebung in Richtung der acidophylen (säureliebenden) Arten. Das Spektrum verschiebt sich von den Bakterien hin zu den Pilzen. Als Folge davon ist mit einem eingeschränkten Um- und Abbauverhalten der organischen Substanz und damit mit einer Störung im Humushaushalt zu rechnen.

Bodenlösung

Die **elektrische Leitfähigkeit** kennzeichnet die Menge an gelösten Salzen, beträgt **0,4 mS/cm** und liegt unterhalb des günstigen Bereiches für die Vegetationsperiode (0,5 bis 0,8 mS/cm). ACHTUNG: zu Vegetationsende oder in der Vegetationsruhe sind niedrigere Werte günstiger! Die gelösten Salze (siehe auch wasserlösliche Fraktion am Analyseblatt) sind wichtig für die Pflanzenernährung (über Transpirationssog) und für die Aggregatstabilität. Der Standort ist **aktuell mittel sorptionsstark**, bei heftigen Niederschlagsereignissen muss dennoch mit der **Auswaschung** von Elementen aus der Bodenlösung gerechnet werden.

Folgende Elemente sind in der Bodenlösung für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich (siehe wasserlösliche Fraktion am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“):

Tabelle 1: Zusammensetzung der Bodenlösung, Konzentrationen in mg/l

Nährstoff	Parzelle 3
Ca	44,34
Mg	9,67
K	2,87
Na	5,88
NH ₄ -N	0,13
NO ₃ -N	38,52
P	0,08
SO ₄	14,70
Cl	3,99
Al	0,08
Fe	0,46
Mn	0,01
B	0,10
Zn	0,00
Cu	0,01
Si	15,10

Die Bodenlösung ist das wichtigste Medium für die Pflanzenernährung. Die Wurzeln können ausschließlich gelöste Stoffe aufnehmen. Die Bodenlösung sollte eine „Idealzusammensetzung“ der einzelnen Nährstoffe besitzen, da die Selektivität der Pflanzenaufnahme für bestimmte Nährstoffe nur aus der „Ideallösung“ optimal funktioniert.

Kalium (**K**) ist im Verhältnis zu Magnesium (**Mg**) und Calcium (**Ca**) in zu geringer Konzentration gelöst. Die Phosphor (**P**) Konzentration liegt im **Mangel**. Die **Spurenelementversorgung** ist bis auf Zink (Zn) gut.

Das Verhältnis von **NO₃-N** zu **NH₄-N** ist in Richtung des NO₃-N verschoben. Dies ist günstig und deutet auf eine ausreichende Durchlüftung für die stickstoffoxidierenden Bakterien hin.

Es wurde wasserlösliches Aluminium (**Al**) nachgewiesen, eine Kontamination von Nachbarsystemen (z.B. Grundwasserkörper) kann nicht ausgeschlossen werden. Al in der Bodenlösung kann die Aufnahme von Phosphor (**P**), Calcium (**Ca**) und Magnesium (**Mg**) stark beeinträchtigen und kann daher die Ursache für sichtbare P-, Ca- und Mg-Mangelsymptome sein.

Organische Substanz

Der Gehalt an *organischer Substanz* ist für einen Ackerstandort dieser Schwereklasse niedrig und sollte erhöht werden. Dazu eignen sich Mulchsaaten bzw. Untersaaten sowie die Zufuhr von Mist und Kompost.

Das **C/N** Verhältnis von **7,8** ist günstig. Bei optimalem Witterungsverlauf (Temperatur, Feuchte) können durch mikrobiologische Prozesse während der Vegetationsperiode die am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“ unter „**Mineralisierungspotential**“ angeführten Mengen an Stickstoff (**N**), Phosphor (**P**) und Schwefel (**S**) mineralisiert werden. Die mineralisierten Nährstoffe können von den Pflanzen aufgenommen werden und einen wichtigen Beitrag zu deren Ernährung leisten.

Aufgrund der Rahmenbedingungen (Säurehaushalt) ist das **Mineralisierungspotential** aktuell **eingeschränkt**.

Kationenaustauschkapazität (siehe Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“)

Die organische Substanz und die Tonteilchen können im Boden Nährstoffe anlagern und gegenüber Auswaschung schützen. Da sie eine Ladung besitzen, wirken sie wie „*Magneten*“ und werden als Austauscher bzw. Sorptionskomplex bezeichnet. Die Stärke der Magneten, das heißt die Anzahl der Ladungen, die anlagern werden können, wird Austauschkapazität (international: Cation Exchange Capacity (CEC)) genannt.

Potentielle Austauschkapazität (CEC potentiell): Potential des Standortes

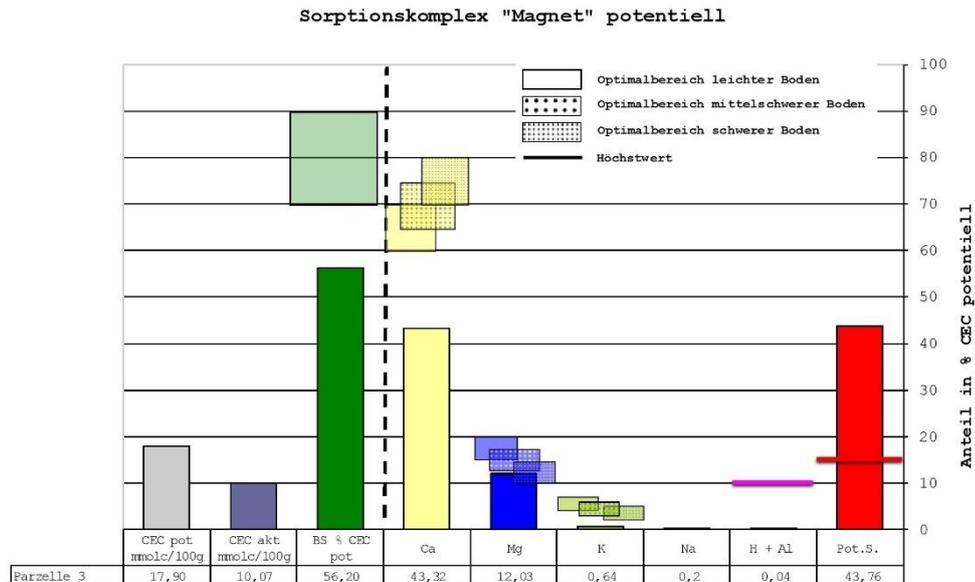


Abbildung: Zusammensetzung der potentiellen Austauscherkapazität (CEC pot)

Beim untersuchten Boden (s. Abbildung oben) beträgt die Gesamtkapazität (**CEC pot**) des Austauschers **17,9 mmolc/100g** und ist auf die organische Substanz und auf die Tonminerale, Oxide und Hydroxide zurückzuführen. Die aktuelle Austauschkapazität beträgt **10,1 mmolc/100g (=CEC akt)**. Der Boden ist aktuell als **mittel sorptionsstark** zu bezeichnen.

Die **Basensättigung (BS)**, der prozentuelle Anteil der Summe von Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na) am CEC pot, liegt mit 56% deutlich unterhalb des gewünschten Bereiches (70-90%). Das Vermögen weitere Säureeinträge abzupuffern ist schlecht ausgeprägt. Es besteht die unmittelbare Gefahr, dass der Standort **weiter versauert** und die **Bodenfruchtbarkeit gefährdet** wird.

Die **Bodenfruchtbarkeit** wird durch das komplexe Zusammenwirken mineralogischer, physikalischer, chemischer und biologischer Wachstumsfaktoren bestimmt. Dazu zählen z.B. der Gehalt und die Verhältnisse an pflanzenverfügbaren Nährstoffen, die Bodenreaktion, die Durchlässigkeit und Speicherkapazität für Wasser und Luft, der Humusgehalt sowie die biologische Aktivität. Diese Faktoren bilden die Grundlage, um in Verbindung mit Witterung und Bewirtschaftung den Ertrag **dauerhaft** und **umweltverträglich** zu optimieren.

Beim untersuchten Boden wird derzeit das Potential der Bodenfruchtbarkeit nicht ausgeschöpft. Die potentielle Säure (**pot.S.**) am Austauscher ist mit 44% sehr hoch, die Stoffverhältnisse liegen nicht im Optimalbereich, die Anteile von Ca, Mg und K sind niedrig bzw. sehr niedrig (siehe Abb. oben bzw. Übersichtstabelle „Bodeneigenschaften“).

Im Zuge von Austauschprozessen werden Nährstoffe (z.B. Ca, Mg, K) durch Säuren vom Austauscher verdrängt, die Säuren lagern sich im Gegenzug an. Dieser Prozess der Nährstoffmobilisierung ist für die Ernährung der Kulturpflanzen über die Vegetationsperiode von essentieller Bedeutung.

Zur Aufrechterhaltung dieser Prozesse ist es notwendig, dass Teile der angelagerten Säuren in regelmäßigen Abständen neutralisiert werden. Das Überschreiten einer bestimmten Säuremenge am Austauscher führt dazu, dass die Säuren immer stärker angelagert werden und nicht mehr an den Austauscherreaktionen teilnehmen (= „**Potentielle Säure**“). Durch diese Blockade von Sorptionsplätzen wird die aktuelle Austauschkapazität reduziert (roter Balken in Abbildung oben). Gleichzeitig reduzieren sich die Anteile an Ca, Mg und K, die Differenz zu den optimalen Wertebereichen wird immer größer (gelber/blauer/grüner Balken in Abbildung).

Durch die Zufuhr der Stoffe, die im Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“ unter „**Melioration**“ angeführt sind, werden die potentielle Säure mobilisiert und neutralisiert (roter Balken sinkt) und die Anteile an Ca, Mg und K wieder in die optimalen Wertebereiche überführt.

Die Mengen an **Dolomit/Gips/Kalk** sollten **pro Anwendung im Normalfall 1.500 kg pro Hektar und Jahr** nicht überschreiten.

Nach vollständiger Umsetzung der Melioration sollte das Ertragspotential deutlich verbessert worden sein. Zur Aufrechterhaltung bzw. weiteren Verbesserung des Ertragspotentials müssen danach kontinuierlich Bodenpflegemaßnahmen durchgeführt werden.

Aktuelle Austauschkapazität (CEC aktuell): IST-Zustand

Auf Grund der Blockade von Bereichen der Austauscherflächen durch die potentielle Säure (pot.S.) können sich Ca, Mg und K nur am noch aktiven Anteil anlagern. Zur Bewertung des aktuellen Zustandes muss deshalb der aktive Anteil als Bezugsgröße herangezogen werden (CEC akt). Dies entspricht der Situation, welche die Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen derzeit vorfinden.

Die Verhältnisse der Stoffe zueinander bilden dabei einen wesentlichen Schlüsselfaktor zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit (Pflanzenernährung, Biologie, Aggregatstabilität, Luft/Wasserverhältnisse).

Nachfolgende Tabelle stellt die Verteilung der Stoffe am Austauscher dar, bei welcher optimale Verhältnisse herrschen (SOLL). Dem SOLL-Zustand ist die Zusammensetzung des aktuellen Austauschers der analysierten Bodenprobe gegenübergestellt. Die optimalen Wertebereiche sind abhängig von verschiedenen Basisparametern.

Tabelle 4: Optimalbereiche zu gemessenen Werten am aktuellen Austauscher in %

	Ca	Mg	K	Na	(H+Al)
SOLL	60-75	13-18	2-5,5	< 1	< 10
Parzelle 3	77,0	21,4	1,1	0,4	0,1

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

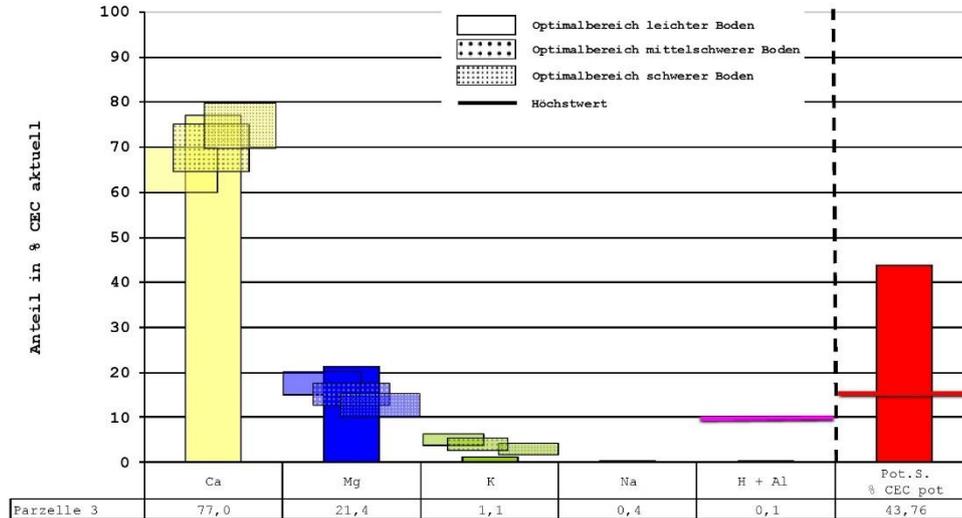


Abbildung: Zusammensetzung der aktuellen Austauschkapazität (CEC akt) sowie Anteil der potentiellen Säure (Pot. S.) am CEC pot

Die Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen finden eine **ungünstige** Verteilung von Stoffen am aktuell genutzten Anteil des Austauschers (CEC akt) vor. Der Anteil von **Ca** und jener von **Mg** liegt im Überschuss, **K** ist deutlich im Mangel.

Bei Böden dieser Schwereklasse sollten der Ca-Anteil am Austauscher zwischen 60 und 75%, jener von Mg zwischen 13 und 18% liegen, um eine optimale Aggregatstabilität zu erreichen.

Der Anteil an **potentieller Säure (pot. S.)** ist sehr hoch (s. oben).

Wie bereits oben angeführt wird zur Abpufferung eines Teiles der potentiellen Säure und zur Harmonisierung der Stoffverhältnisse am Austauscher sowie zur Verbesserung der Aggregatstabilität die Zufuhr der am Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“ unter „Melioration“ angegebenen Stoffe empfohlen. Wichtig ist die Zufuhr aller Stoffe, da man ansonsten die Verteilung der Kationen negativ beeinflusst.

Beurteilung der Nährstoffe (siehe Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“)

Im Folgenden werden die Nährstoffe Calcium (Ca), Stickstoff (N), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Phosphor (P) sowie deren Pools beschrieben.

Calcium

Calcium (Ca) ist einer der wichtigsten Nährstoffe. Ca stabilisiert als „Zellmörtel“ das pflanzliche Gewebe und ermöglicht dadurch erst die Ausnutzung vieler anderer Nährstoffe. Diese Funktion bedingt, dass Ca in der Pflanze nicht mobil ist und somit über die gesamte Vegetationsperiode von den Wurzeln aufgenommen werden muss! Bestimmte Kulturen wie Raps und Leguminosen haben einen höheren Calcium- als Kaliumbedarf!

Ca liegt im Boden in verschiedenen Bindungsformen vor (karbonatisch z.B. Kalk, silikatisch z.B. Feldspäte). Die Nachlieferung erfolgt über Prozesse der Verwitterung (Versauerung). Austauschbares Ca am Sorptionskomplex steht im Fließgleichgewicht mit dem Ca in der Bodenlösung.

Bei *kalkfreien* Böden im Austauschpufferbereich ist Ca häufig das „Hauptkation“ in der Bodenlösung. Bei erhöhter potentieller Säure im Austauschpuffer, sowie im Silikat-, Aluminium- und Eisenpufferbereich, kann das Verhältnis der (molaren) Ca-Konzentration zum Aluminium verschoben werden. Dies kann zu Wachstumsdepressionen bis hin zur Wurzeltoxizität führen.

Eine ausreichende Ca-Versorgung kann durch die Zufuhr von verschiedenen Ca-Quellen erfolgen: Dolomit, Gips und Kalk (siehe Melioration). Die Zufuhr an DGC ist mehr als die gezielte Neutralisation bestimmter Säureanteile, es ist auch eine Ca-Düngung!

Stickstoff

Die Stickstoffversorgung ist zum Zeitpunkt der Probenahme mangelhaft. Die Stickstoffernährung der Pflanzen kann durch verschiedene Maßnahmen unterstützt werden:

- biologische N-Fixierung (Knöllchenbakterien, frei lebende N-bindende Bakterien)
- Zufuhr von organischen Stoffen (N organisch gebunden, N mineralisch)
- Zufuhr von mineralischen N-Düngern (Ammonium, Harnstoff, Nitrat, ...).

Welche N-Formen und welche Mengen den besten Ertrag bringen, hängt von den spezifischen Bedingungen des Standortes (z.B. Feuchte, Temperatur, Luftkapazität) und den Ansprüchen der Kultur ab. Generell sollten nitrathaltige Dünger vermieden werden, da Nitrat die Energiebilanz der Pflanze extrem strapaziert (Nitrat kann erst nach Umwandlung in Ammonium von der Pflanze verwertet werden) und die Gefahr der Nitratbelastung in Wasserkörpern stark erhöht wird.

Die Mineralisierungsrate ist abhängig von den Feuchte- und Temperaturbedingungen sowie von den Milieubedingungen für die Mikroorganismen (Säuremilieu, Nährstoffversorgung). Bei diesem Standort ist das **Mineralisierungspotential** auf Grund der Rahmenbedingungen **aktuell eingeschränkt**.

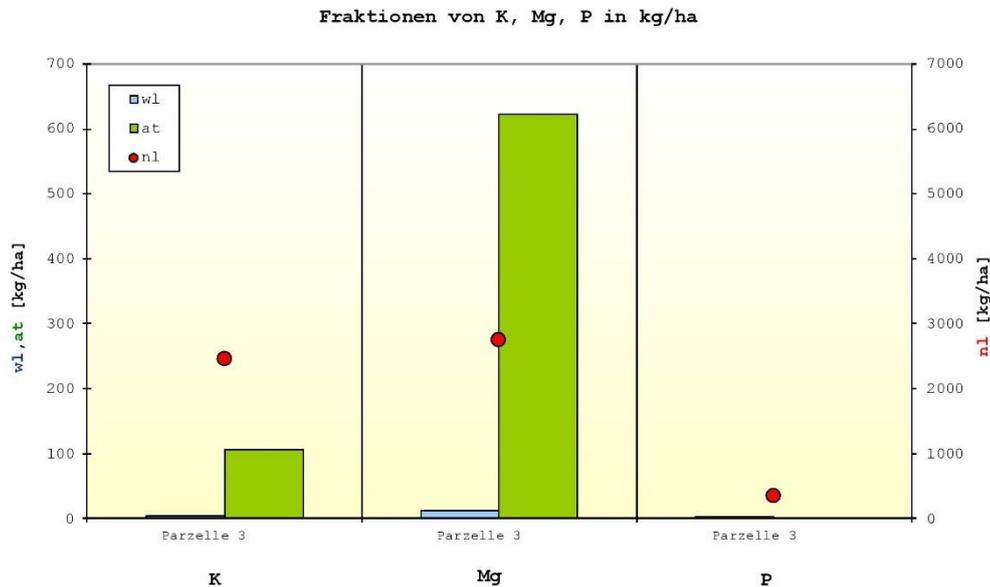


Abbildung: Fractionen der Nährstoffe K, Mg, P (wl=wasserlöslich, at=austauschbar, nl=nachlieferbar).
Alle Gehalte sind Nettowerte (at ohne wl, nl ohne at und ohne wl)

Die Abbildung oben und die folgenden Tabellen stellen die **pflanzenverfügbaren** (= wasserlöslichen + austauschbaren) Anteile von Kalium, Magnesium und Phosphor zum **Zeitpunkt der Probenahme** dar. Die **nachlieferbaren** Anteile können durch verschiedene Prozesse im Laufe der Vegetationsperiode zum Teil mobilisiert (= pflanzenverfügbar) werden.

Bei dieser **Momentaufnahme** ist es ökologisch nicht sinnvoll, dass die gesamte Menge an Nährstoffen, welche die angeführte Kultur beim angegebenen Ertragsniveau über die gesamte Vegetationsperiode benötigt, in einer leicht verfügbaren Form zur Verfügung steht.

Am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“ sind **Nährstoffe** und **potenziell toxische Stoffe** in verschiedenen Fractionen (wasserlöslich, austauschbar, Reserve) tabellarisch gegenübergestellt.

Kalium

Tabelle 5: verschiedene K-Pools des Bodens, Parzelle 3

Element	Verfügbarkeit	Menge kg/ha	Bemerkung
K	wasserlöslich	3,5	Mangel
K	austauschbar	106	Mangel
K	nachlieferbar	2450	Reserven sehr hoch

Der Standort neigt zur K Fixierung.

Magnesium

Tabelle 6: verschiedene Mg-Pools des Bodens, Parzelle 3

Element	Verfügbarkeit	Menge kg/ha	Bemerkung
Mg	wasserlöslich	11,9	ausreichend
Mg	austauschbar	622	Zufuhr für Melioration
Mg	nachlieferbar	2750	Reserven sehr hoch

Phosphor

Tabelle 7: verschiedene P-Pools des Bodens, Parzelle 3

Element	Verfügbarkeit	Konzentration mg/l	Menge kg/ha	Menge in % P total	Bemerkung
P	wasserlöslich	0,08	0,2	0,01	Mangel
P	austauschbar		0	0	starker Mangel
P	nachlieferbar		350	20	min. Reserven mittel
P	organisch		908	52	org. Reserven hoch
P	total		1740		Gesamtgehalte mittel

Die P-Konzentration in der **Bodenlösung** beträgt **0,08 mg/l** und liegt unterhalb des Bereiches für eine gute Pflanzenentwicklung. Insgesamt sind **P < 5 kg/ha** in **pflanzenverfügbarer** Form vorhanden. Diese Menge ist für die gesamte Vegetationsperiode nicht ausreichend. Es kann aber damit gerechnet werden, dass je nach Temperatur und Feuchteverhältnisse durch mikrobiologische und chemische Prozesse laufend P aus den Reservefraktionen mobilisiert wird.

Der **säurelösliche Reservepool** ist mit P ca. **350 kg/ha** mittel aufgefüllt, die **organischen Reserven** sind mit etwa **910 kg/ha** hoch. Zur nachhaltigen Sicherung der P-Versorgung sollten Maßnahmen gesetzt werden die nachhaltig P aus den **Reservepools mobilisieren**. Dazu eignen sich mehrere Strategien wie:

- Verbesserung und Stabilisierung des Puffersystems (z.B. Zufuhr von Dolomit, Kalk)
- Förderung der mikrobiellen Aktivität (z.B. Verbesserung der Durchlüftung, Versorgung mit Spurenelementen, Mulchsaat, Untersaat)
- Ionenkonkurrenz (z.B. Silikate)
- Zufuhr P-aufschließender Bakterien (megaterium phosphaticum)

Spurenelemente und nützliche Elemente

Die Spurenelemente sind essentiell zur Pflanzenernährung und in Pflanzen in geringen Mengen vorhanden. Nützliche Elemente können bei bestimmten Kulturen Vorteile bei der Vitalität, der Abwehr von Schadorganismen oder der Bindung/Mobilisierung von Nährstoffen bedingen.

Eisen (**Fe**) ist meist als mineralische Reserve in großen Mengen im Boden vorhanden (org. Reserve meist unbedeutend => absoluter Mangel auf stark organischen Böden wie Hochmoor, **häufige Gehalte im Boden 5.000 bis 40.000 mg/kg**). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **50 und 1.000 mg/kg TS**. Fe ist an Redoxreaktionen, Photosynthese und Atmung beteiligt.

Mangan (**Mn**) ist im Boden in vielen Mineralen enthalten und kann zum Teil durch Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 200 bis 400 mg/kg**). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **20 und 200 mg/kg TS**. Mangan aktiviert Enzyme und ist an Redoxreaktionen beteiligt.

Zink (**Zn**) ist in verschiedenen Mineralen enthalten und kann zum Teil ausgefällt oder im Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 10 bis 300 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **10 und 100 mg/kg TS**. Zink aktiviert Enzyme, ist an der Photosynthese beteiligt und fördert die Produktion von Wuchsstoffen.

Kupfer (**Cu**) ist in verschiedenen Mineralen und Erzen enthalten, kann als sekundäres Mineral ausgefällt oder im Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 5 bis 100 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **2 und 15 mg/kg TS**. Kupfer ist Bestandteil von Redoxsystemen (Photosynthese).

Bor (**B**) ist im Mineral Turmalin, sowie in Glimmern enthalten, oft als sekundäres Mineral ausgefällt (**häufige Gehalte im Boden 5 bis 100 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **2 und 100 mg/kg TS**. Bor ist Baustein der Zellwand und beeinflusst die Wuchsstoffbildung.

Molybdän (**Mo**) ist in Silikaten wie Olivinen und Eisenoxiden vorhanden, nach der Verwitterung oft wieder ausgefällt (**häufige Gehalte im Boden 0,5 bis 5 mg/kg**). Die **Gehalte in der Pflanze** liegen zwischen **0,2 bis 3 mg/kg TS**. Molybdän ist Bestandteil von Enzymen (Nitratreduktase, Nitrogenase, Phosphatase).

Silizium (**Si**) ist der Hauptbestandteil vieler Böden (~ 30%), aber sehr immobil. Der **Gehalt in Pflanzen** ist hoch (**1.000 bis 10.000 mg/kg TS**) und entspricht in etwa dem Phosphor Gehalt! Silizium festigt Zellwände und Stützgewebe, fördert die Vitalität und stärkt die Abwehr von Schadorganismen.

Kobalt (**Co**) weist eine gute Beziehung zu den Eisengehalten auf. **Häufige Gehalte im Boden 1 bis 10 mg/kg**. Kobalt ist für die Pflanzenernährung nicht essentiell, jedoch für alle Bakterien und Tiere (Menschen) unbedingt notwendig (Vitamin B12). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **0,03 und 0,3 mg/kg TS**.

Tabelle 8: Spurenelemente in verschiedenen Pools, Parzelle 3

Element	Pflanzenverfügbar kg/ha	Reservepool kg/ha	empfohlene Zugabe über den Boden kg/ha
Fe**	1,2	12400	1,10
Mn	0,35	1785	keine
Cu	0,01	30,0	0,09
Zn	0,38	55,0	keine
Mo	0,00	0,00	0,05
B	0,26	5,00	keine
Si	62,0	6950	keine
Co	0,000	28,5	keine

*) Differenz des Pflanzenbedarfs während der gesamten Vegetationsperiode zum Zeitpunkt der Probenahme.

Achtung: Überschüsse an Mn, Zn, B, Si!

** Die Reservegehalte an Eisen (**Fe**) sind hoch. Fe wird im Boden vor allem durch reduktive Bedingungen (=Luftmangel) und Säure mobilisiert. Nach Niederschlagsereignissen und bei feuchten Bedingungen sind viele Bodenporen mit Wasser gefüllt, Fe wird ausreichend mobilisiert. In Trockenphasen wird Fe stark gebunden. Einige Pflanzen, z.B. Sonnenblumen, entwickeln bei Fe-Mangel spezielle Wurzeln (Proteoidwurzeln), um vermehrt Fe aus dem Boden zu mobilisieren. Tritt tatsächlich ein Fe-Mangel auf, ist die Zufuhr über das Blatt zu empfehlen.

Toxische Elemente

Die wasserlöslichen Gehalte an Aluminium (**Al**) können Nachbarsysteme (z.B. Gewässer) gefährden. Al in der Bodenlösung kann die Aufnahme von Phosphor (**P**), Calcium (**Ca**) und Magnesium (**Mg**) stark beeinträchtigen und kann daher die Ursache für sichtbare P-, Ca- und Mg-Mangelsymptome sein.

Durch eine Verbesserung des Puffersystems (z.B. Zufuhr von DGC – Dolomit/Gips/Calk, siehe Melioration) wird Al in festere Bindungsformen überführt, das Gefährdungspotential wird reduziert.

Mit freundlichen Grüßen

Univ.Lek. DI. Hans Unterfrauner

Bemerkung: Die Interpretation und die empfohlenen Maßnahmen beziehen sich auf die eingeschickte Bodenprobe. Für die Qualität der Probenziehung und der Bodenprobe wird keine Haftung übernommen.

A-2544 Leobersdorf
Aredstraße 13 Top 3-4

Tel: +43 2256 64 186
Fax: +43 2256 64 186 -21
Email: agrar@waterandwaste.at



Wasser- und Abfallwirtschaft
Abt. Agrar- und Bodenkunde

BODENUNTERSUCHUNG

Auftraggeber:	TB Unterfrauner GmbH	Labor Nr.:	agr20-0257.1
Adresse:	Erdbergstraße 10/33 1030 Wien	Bezeichnung:	8070 Boden
Standortbezeichnung:	NT8077	Kulturart:	Minze
Probenahmedatum:		Tiefe:	0-27cm Ertrag: t

PARAMETER	SYMBOL	EINHEIT	WERT	PARAMETER	I H ₂ O	II Ausb	III Nachl	IV Gesamt
					mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bindig.Schwere	KH	-	51,9					
Leitfähigkeit	eL	mS/cm	0,373	Ca	23,01	1554	1224	
Kalkgehalt	CaCO ₃	%		Mg	5,02	261,84	705,94	
Wassergehalt	WGF	%	9,81	K	1,49	44,66	621,16	
Reaktion (w)	pH-H ₂ O	-	5,97	Na	3,05	8,26	32,39	
Reaktion (n)	pH-CaCl ₂	-		NH ₄ -N	0,07	0,17		
Reaktion (a)	pH-KCl	-	4,79	H	0,18	0,01		
Austauschkap. (T)	CEC _p	mmolc/100g	17,91	Al	0,04	0,46	3579	
Basensättigung	BS	% CECp	56,22	Ba	0,03	5,69	69,33	
aktiver T-Ant.	Ta/Tp		0,56	PO ₄	0,13	<1,0013	346,48	
Ca- Anteil an T	Ca%	% CECp	43,30	P	0,04	0,23	113,00	
Mg- Anteil an T	Mg%	% CECp	12,02	NO ₃ -N	19,99			
K- Anteil an T	K%	% CECp	0,64	SO ₄	7,63			
Na- Anteil an T	Na%	% CECp	0,20	Cl	2,07			
NH ₄ -N- Anteil an T	NH ₄ -N%	% CECp	<0,01	HCO ₃	<0,01			
H ⁺ - Anteil an T	H ⁺	% CECp	<0,01	SiO ₃	21,23	49,49	4796	
Al- Anteil an T	Al%	% CECp	0,03	BO ₃	0,26	0,35	4,93	
Ba- Anteil an T	Ba%	% CECp	0,05					
Pot.Säureanteil	Sp%	% CECp	43,75	Ag	<0,0036	<0,0401	<2,00	
Abb.org.Substanz	AOS	%	1,82	Fe	0,24	0,26	3172	
Org. Kohlenstoff	C _{org}	%	1,06	Mn	0,0052	0,14	454,65	
Ges. Stickstoff	N _t	mg/kg	1350	Cu	0,0043	<0,0411	7,59	
Org. Stickstoff	N _{org}	mg/kg	1330	Zn	<0,0104	0,16	13,58	
Min. Stickstoff	N _{min}	mg/kg	20,3	Co	<0,0007	<0,0170	7,26	
H ₂ O-lösl.Stickstoff	N _l	mg/kg	20,1	Mo	<0,0021	<0,0401	<0,0700	
Ges. Schwefel	S _t	mg/kg	110,0	B	0,05	0,06	0,91	
Ges. Phosphor	P _t	mg/kg	443,7	Sn	<0,0036	<0,0701	<0,70	
Org. Phosphor	P _{org}	mg/kg	231,6	Se	<0,0311	<1,2016	<3,60	
Min. Phosphor	P _{min}	mg/kg	212,1	As	<0,0187	<0,8011	0,48	
C/P-Verhältnis	C/P	m/m	45,7	Ni	0,0034	<0,0360	5,84	
C/S-Verhältnis	C/S	m/m	96,3	Cr	0,0017	0,09	5,23	
C/N-Verhältnis	C/N	m/m	7,8	Pb	<0,0052	<0,1001	13,25	
Rel.H ₂ O-Kapaz.	RWK	%Gew.		Cd	<0,0003	<0,0110	0,14	
Feuchtdichte	FDICHTE	g/l		Hg				
Trockendichte	TDICHTE	g/l		Tl	<0,0311	<1,0013	<4,00	
Extrverh. I	EXI	l/kg	0,52	V	0,0014	<0,0090	15,31	
Extrverh. II	EXII	l/kg	10,01					
Färbung/Trübung	FT		13					

Probeneingang: 27.05.20
Anmerkung:

Ausfertigung: 29.06.20

Labornr.: agr20-0257.1

Seite 1 von 1

10.4 Ökologische Basischarakterisierung, Parzelle 8, unbewässert



Kunde:
TBU Unterfrauner
1030 Wien
Österreich

Betrieb:
Helen Haupt
Österreich

Geschäftsführer DI Hans Unterfrauner
Rochuspark, Erdbergstraße 10/33, A-1030 Wien
office: +43 676 3641030
mobil: +43 664 3890397
office@bodenökologie.com
www.bodenökologie.com

FN 430626z / Gerichtsstand Wien
UID: AT U69409936
Bankverbindung: Erste Bank Österreich
IBAN: AT41 2011 1826 6448 0200
BIC: GIBAAT33XXX

Ökologische Basischarakterisierung BD 8071 (Probenahme am: 04.05.2020)

Probe:	Parzelle 8, unbewässert
Probennehmer:	nicht bekannt
Lage:	nicht bekannt
Klima:	nicht bekannt
Kultur/Ertrag:	Apfelminze TS 3,0 t/ha
Labor:	Water & Waste, LabNr. agr20-0258.1 / 2020

Ergebnis:

Leicht/mittelschwerer Boden, kalkfrei, pH-Wert_{wasser} mäßig sauer, pH-Wert_{KCl} stark sauer, **starke Säuredegradation**. Aggregatstabilität beeinträchtigt, elektrische Leitfähigkeit niedrig, Gehalt organischer Substanz niedrig, Qualität organischer Substanz günstig.

Standort aktuell mittel sorptionsstark, Calcium- und Magnesium-Anteil am potentiellen Sorptionskomplex niedrig, Kalium sehr niedrig. Neigung zur Kalium-Fixierung. Potentielle Säure sehr hoch.

Mangel an pflanzenverfügbaren Stoffen (Phosphor, Kalium, Stickstoff, Kupfer, Molybdän, Kobalt), Überschuss an Eisen, Zink, Bor.

Kontaminationsgefahr durch wasserlösliche Aluminium-Gehalte.

Maßnahmen:

Aufbau von Dauerhumus (Mulchsaat, Untersaat, Kompost, Stallmist).

Zufuhr von Dolomit und Kalk zur Verbesserung und Stabilisierung des Puffersystems.

Zufuhr von Calcium (Dolomit, Gips, Kalk), Kalium und Magnesium (Dolomit) zur Optimierung des Sorptionskomplexes. Zufuhr von Calcium (Dolomit, Gips, Kalk) und Magnesium (Dolomit) zur Verbesserung der Aggregatstabilität und zur Sicherung des Pflanzenbedarfes.

Mobilisierung der Reserven von Phosphor, Ergänzung von Kalium, Stickstoff, Kupfer, Molybdän, Kobalt (bei Bedarf über Blattapplikationen).

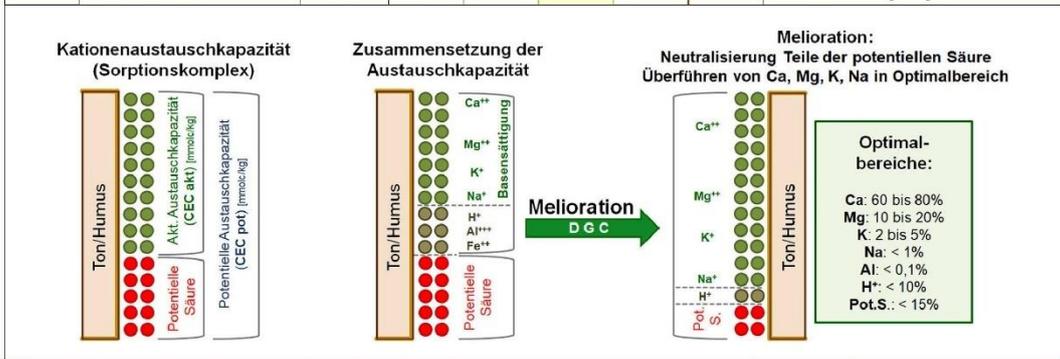
Wien, 30.06.2020



Schlagname: Parzelle 8

BASISEIGENSCHAFTEN		Tiefe: 0 - 27 cm	Skelettgehalt in Vol.-%: 0					Probendatum: 04.05.2020
Parameter	Wert	sehr niedrig	niedrig	günstig	hoch	sehr hoch	Einschätzung	
Bodenschwere (KH)	49	[Bar chart: 49% in 'sehr niedrig' range]						leicht/mittelschwerer Boden
pH Wert H2O [-log H ⁺]	6,4	[Bar chart: 6.4 in 'niedrig' range]						mäßig sauer
pH Wert KCl [-log H ⁺]	4,9	[Bar chart: 4.9 in 'sehr niedrig' range]						stark sauer
Kalkgehalt CaCO ₃ [%]	0,0	[Bar chart: 0% in 'sehr niedrig' range]						nicht nachweisbar
gelöste Stoffe [eL, mS/cm]	0,3	[Bar chart: 0.3 in 'niedrig' range]						niedrig
Org.Substanz [%] = Corg * 1,724	1,5	[Bar chart: 1.5 in 'niedrig' range]						Mulch
C/N Verhältnis der org. Substanz	8,3	[Bar chart: 8.3 in 'niedrig' range]						N Nachlieferung aus org. Substanz
C/P Verhältnis der org. Substanz	40,7	[Bar chart: 40.7 in 'niedrig' range]						P Nachlieferung aus org. Substanz
C/S Verhältnis der org. Substanz	128	[Bar chart: 128 in 'niedrig' range]						S Nachlieferung aus org. Substanz
Stabilität organische Substanz	1	[Bar chart: 1 in 'niedrig' range]						Umbauprozesse im Gleichgewicht
Stabilität Aggregate	3	[Bar chart: 3 in 'niedrig' range]						Erosionsgefahr hoch

KATIONENAUSTAUSCHKAPAZITÄT (CEC): Gesamtpotential = CEC potentiell; aktuell genutztes Potential = CEC aktuell				
CEC potentiell [mmolc/kg]	167	[Bar chart: 167 in 'sehr niedrig' range]	pot sorptionsstark	
CEC aktuell [mmolc/kg]	92	[Bar chart: 92 in 'niedrig' range]	akt mittel sorptionsstark	
CEC akt in % CEC pot	55	[Bar chart: 55 in 'niedrig' range]	sehr niedrig	
Basensättigung in % CEC pot	55	[Bar chart: 55 in 'niedrig' range]	Gefahr Versauerung	
Elemente bez. auf CEC pot	Ca in % CECpot	43,0	[Bar chart: 43% in 'niedrig' range]	niedrig
	Mg in % CECpot	11,0	[Bar chart: 11% in 'niedrig' range]	niedrig
	K in % CECpot	0,4	[Bar chart: 0.4 in 'sehr niedrig' range]	sehr niedrig
	Na in % CECpot	0,3	[Bar chart: 0.3 in 'günstig' range]	günstig
	Al in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]	günstig
	NH ₄ N in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]	günstig
	Fe in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]	günstig
	Mn in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'günstig' range]	günstig
	H in % CECpot	0,0	[Bar chart: 0% in 'aktuelle Säure gering' range]	aktuelle Säure gering
Pot. Säure in % CECpot	45,2	[Bar chart: 45.2 in 'sehr hoch' range]	sehr hoch	
Elemente bez. auf CEC akt	Ca in % CECakt	78,5	[Bar chart: 78.5 in 'hoch' range]	hoch
	Mg in % CECakt	20,1	[Bar chart: 20.1 in 'hoch' range]	hoch
	K in % CECakt	0,8	[Bar chart: 0.8 in 'sehr niedrig' range]	sehr niedrig
	Na in % CECakt	0,6	[Bar chart: 0.6 in 'günstig' range]	günstig
	Al in % CECakt	0,1	[Bar chart: 0.1 in 'günstig' range]	günstig
	H in % CECakt	0,0	[Bar chart: 0% in 'aktuelle Säure gering' range]	aktuelle Säure gering



MELIORATION in kg/ha – Maßnahmen zur Verbesserung / Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit					
min.	Dolomit* (mit 40% MgCO ₃)	Gips* (CaSO ₄ * 2 H ₂ O)	Calc* (CaCO ₃)	Magnesium (Mg)	Kalium (K)
	2560 kg/ha	630 kg/ha	5520 kg/ha		860 kg/ha
org.	Aufbau Dauerhumus	Mulchsaat, Untersaat, Kompost, Stallmist			
	48550 kg/ha				

*Berechnung bezieht sich auf qualitativ hochwertige, feinvermahlene Produkte!



PFLANZENERNÄHRUNG Probe BD 8071



Schlagname: Parzelle 8

Kultur: Apfelmünze TS

Ertrag: 3,0 t/ha

PLANZENVERFÜGBARE STOFFE zum Zeitpunkt der Probenahme: 04.05.2020							Tiefe: 0 - 27 cm	
Nährstoff [kg/ha]	Wert	sehr niedrig	niedrig	günstig	hoch	sehr hoch	Diff. 1	Einschätzung
Calcium (Ca)	3810							Überschuss
Magnesium (Mg)	590							ausreichend
Kalium (K)	75						60	Mangel
Phosphor (P)	0						20	starker Mangel
Stickstoff (N)	43,8						50	Mangel
Sulfat (SO ₄)	27,3							ausreichend
Eisen (Fe)	2,5							Überschuss
Mangan (Mn)	0,20							ausreichend
Kupfer (Cu)	0,01						0,09	starker Mangel
Zink (Zn)	0,44							extremer Überschuss
Molybdän (Mo)	0,00						0,05	starker Mangel
Bor (B)	0,29							extremer Überschuss
Silizium (Si)	65,5							ausreichend
Kobalt (Co)	0,000							starker Mangel

ORGANISCH GEBUNDENE NÄHRSTOFFE [kg/ha] und Mineralisierungspotential [kg/ha und Jahr]					
Nährstoff	Org. gebunden gesamt	Einschätzung	Mineralisierungspotential		
org. Kohlenstoff (C org)	34600	Humusaufbau	277	bis	519
org. Stickstoff (N org)	4376	hohe Reserven	35	bis	66
org. Phosphor (P org)	851	hohe Reserven	7	bis	13
org. Schwefel (S org)	269	niedrige Reserven	2	bis	4

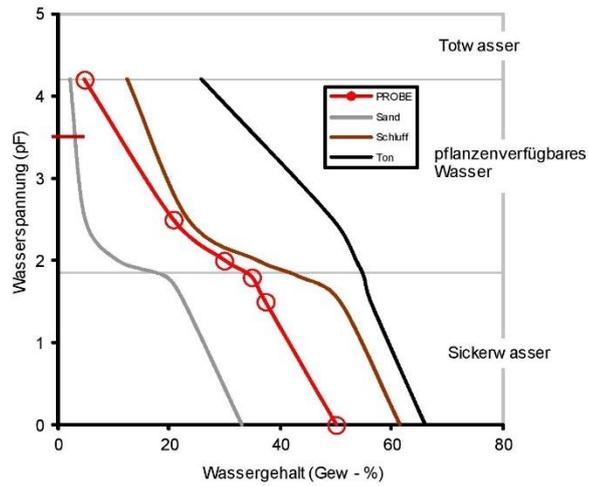
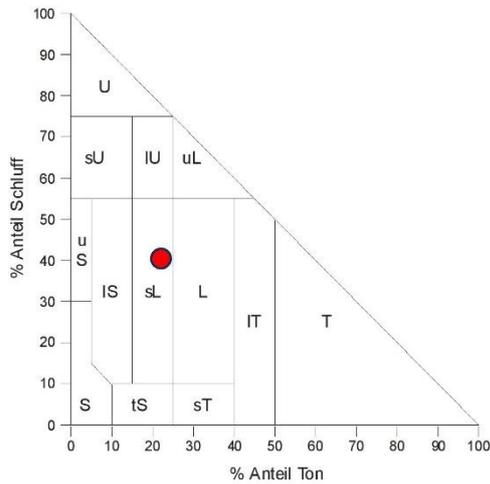
POTENTIELL TOXISCHE STOFFE in der Bodenlösung		
Aluminium (Al)		Kontaminationsgefahr
As, Ni, Cr, Pb, Cd		keine Auffälligkeiten

FRAKTIONEN: wasserlöslich, austauschbar, Reserve					
Bodenlösung [mg/l]		Austauschbar [kg/ha]		Reservegehalte [kg/ha]	
Calcium (Ca)	34,8	Calcium (Ca)	3763	Calcium (Ca)	5500
Magnesium (Mg)	6,63	Magnesium (Mg)	583	Magnesium (Mg)	3100
Kalium (K)	1,44	Kalium (K)	73	Kalium (K)	1900
Natrium (Na)	6,37	Natrium (Na)	32	Natrium (Na)	100
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	0,04	Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	0	Stickstoff total (N tot)	4420
Nitratstickstoff (NO ₃ -N)	27,97				
Phosphor (P)	0,09	Phosphor (P)	0	Phosphor min. (P min)	350
				Phosphor total (P tot)	1623
				Schwefel total (S tot)	278
Sulfat (SO ₄)	14,11				
Chlorid (Cl)	3,04				
Aluminium (Al)	0,57	Aluminium (Al)	1,57	Aluminium (Al)	12000
Eisen (Fe)	1,93	Eisen (Fe)	0,00	Eisen (Fe)	11300
Mangan (Mn)	0,02	Mangan (Mn)	0,18	Mangan (Mn)	1990
Bor (B)	0,10	Bor (B)	0,16	Bor (B)	0
Zink (Zn)	0,00	Zink (Zn)	0,44	Zink (Zn)	50
Kupfer (Cu)	0,01	Kupfer (Cu)	0,00	Kupfer (Cu)	25
Molybdän (Mo)	0,00	Molybdän (Mo)	0,00	Molybdän (Mo)	0

MOBILISIERUNG:	Phosphor
ZUFUHR:	Kalium, Stickstoff, Kupfer, Molybdän, Kobalt

¹ Differenz des Pflanzenbedarfs während der gesamten Vegetationsperiode zum Zeitpunkt der Probenahme

Bodenphysikalische Ableitungen PNR.: BD 8071



Österreichisches Texturdreieck OENorm L 1050

Wasserspannung und Wassergehalt

Quelle: Stefan Diring (2010): Gibt es in der Bodenphysik Möglichkeiten Einzelparameter durch einen einzelnen Summenparameter zu charakterisieren? Wissenschaftliche Diplomarbeit. Institut für Geographie und Regionalforschung, Universität Wien



Detailbild der Bodenprobe

Erläuterungen zu den Übersichtsblättern „Bodeneigenschaften“, „Pflanzenernährung“ und „Bodenphysikalische Ableitungen“

Basiseigenschaften (siehe Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“)

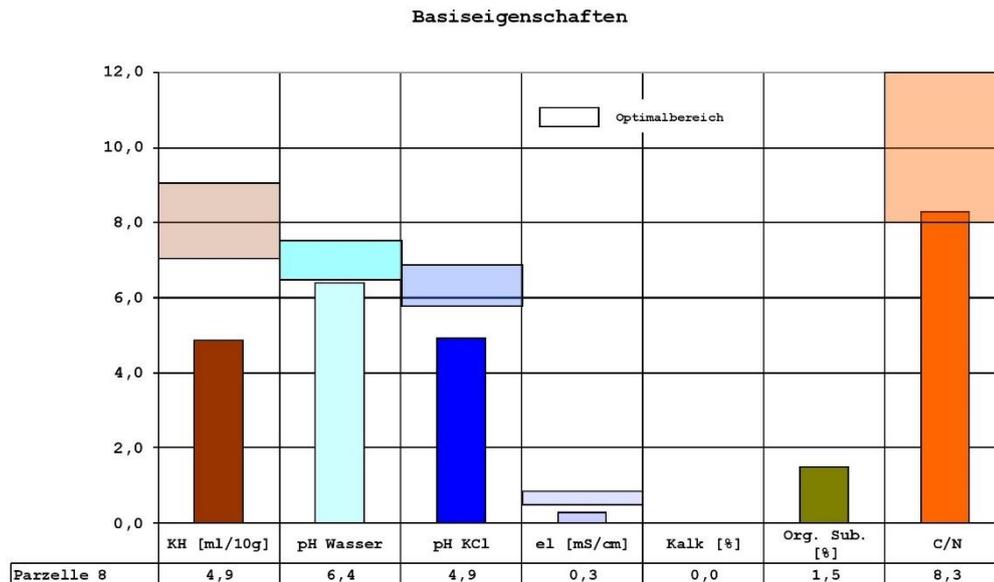


Abbildung: Basiseigenschaften des Bodens

Bodenschwere/Wasserhaushalt

Die sandige/lehmgige **Bodenart** bedingt einen **leicht/mittelschweren** Boden. Bei voller Wassersättigung kann der Boden ~ 4,9 ml Wasser pro 10 g zurückhalten, diese Menge entspricht etwa einer Wassermenge von 900 m³/ha bei 27 cm Tiefe. Bei voller Wassersättigung im Winter/Frühjahr reicht dies aus, um kurze Trockenperioden (Frühsonnertrockenheit) unbeschadet zu überbrücken.

Die **pF-Kurve** auf dem Blatt für „Bodenphysikalische Ableitungen“ zeigt, bei welchen Wassergehalten in Gewichtsprozent (Gew.%) welche Saugspannungen (pF) herrschen. Unterhalb von pF 1,8 ist das Wasser schwach gebunden (Sickerwasser) und nicht pflanzenverfügbar. Von pF 1,8 bis 4,2 liegt der Bereich des pflanzenverfügbaren Wassers (= nutzbare Feldkapazität). Oberhalb von pF 4,2 ist das Wasser im Boden bereits so stark gebunden, dass die „Kräfte“ der meisten Kulturpflanzen nicht mehr ausreichen, das Wasser dem Boden zu entziehen, die Pflanzen welken („Welkepunkt“). Der energetische „Knackpunkt“ liegt bei pF 3,5. Ab dieser Saugspannung benötigt die Pflanze mehr Energie, dem Boden Wasser zu entziehen, als über die Photosynthese gebunden werden kann. Besteht die Möglichkeit einer Bewässerung sollte spätestens bei der Saugspannung von pF 3,5 (im Diagramm rot markiert) damit begonnen werden.

Um den aktuellen Zustand der Wasserspannung festzustellen genügt es, eine repräsentative Bodenprobe zu entnehmen. Diese wird im feuchten und trockenen Zustand gewogen, der Gewichtsunterschied entspricht dem Wassergehalt. Mit dem Relativbezug (Wassergehalt in %) kann direkt über die pF-Kurve der Abbildung die Saugspannung abgelesen werden.

Aggregatstabilität

Die **Aggregatstabilität** ist **beeinträchtigt**, beim Ausschütteln der Probe mit destilliertem Wasser war die überstehende Flüssigkeit **getrübt**. Die Trübung beruht darauf, dass Brücken zwischen Bodenteilchen zerstört werden und die Feinteilchen in Suspension gehen.

Am Acker kann das bedeuten, dass **Aggregate** beispielsweise durch Regenschlag sowie bei Bearbeitung oder Befahren des Bodens **teilweise zerstört** werden. Dies führt zu Problemen im Wasser- und Lufthaushalt. Die **Erosionsgefahr** ist **hoch**. Die Stabilität der Aggregate kann durch die Zufuhr von Calcium als Brücke zwischen den Tonteilchen verbessert werden.

pH-Wert

Der pH_{Wasser} liegt im schwach sauren Bereich (**6,4**), im Neutralsalz liegt der **pH**-Wert (KCl) bei **stark sauren 4,9**. Das **Puffersystem** liegt im Übergangsbereich des **Silikatpuffers zum Aluminiumpuffer**. Ab pH-Werten (KCl) von $< 5,5$ lösen sich die Tonminerale auf, deren Bestandteile (z.B. Al, Fe, Si) gehen massiv in Lösung und können ausgewaschen werden. Dies führt einerseits dazu, dass wichtige Austauscherflächen verloren gehen und andererseits der Boden weiter versauert (z.B. durch Al-Hydroxide). Aluminium ist toxisch für Pflanzen und kann die Qualität der Ernteprodukte stark beeinträchtigen. Zur Steigerung der Bodenfruchtbarkeit muss unbedingt das Säurepufferungsvermögen verbessert werden (Ziel pH_{KCl} : 5,9-6,9).

Für die **Mikroorganismen** liegt das pH_{Wasser} -Optimum zwischen 6,5 und 7,5. Bei stark sauren Verhältnissen nimmt die Anzahl der Arten ab und es erfolgt eine Verschiebung in Richtung der acidophylen (säureliebenden) Arten. Das Spektrum verschiebt sich von den Bakterien hin zu den Pilzen. Als Folge davon ist mit einem eingeschränkten Um- und Abbauverhalten der organischen Substanz und damit mit einer Störung im Humushaushalt zu rechnen.

Bodenlösung

Die **elektrische Leitfähigkeit** kennzeichnet die Menge an gelösten Salzen, beträgt **0,3 mS/cm** und liegt unterhalb des günstigen Bereiches für die Vegetationsperiode (0,5 bis 0,8 mS/cm). ACHTUNG: zu Vegetationsende oder in der Vegetationsruhe sind niedrigere Werte günstiger! Die gelösten Salze (siehe auch wasserlösliche Fraktion am Analyseblatt) sind wichtig für die Pflanzenernährung (über Transpirationssog) und für die Aggregatstabilität. Der Standort ist **aktuell mittel sorptionsstark**, bei heftigen Niederschlagsereignissen muss dennoch mit der **Auswaschung** von Elementen aus der Bodenlösung gerechnet werden.

Folgende Elemente sind in der Bodenlösung für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich (siehe wasserlösliche Fraktion am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“):

Tabelle 1: Zusammensetzung der Bodenlösung, Konzentrationen in mg/l

Nährstoff	Parzelle 8
Ca	34,80
Mg	6,63
K	1,44
Na	6,37
NH ₄ -N	0,04
NO ₃ -N	27,97
P	0,09
SO ₄	14,11
Cl	3,04
Al	0,57
Fe	1,93
Mn	0,02
B	0,10
Zn	0,00
Cu	0,01
Si	16,18

Die Bodenlösung ist das wichtigste Medium für die Pflanzenernährung. Die Wurzeln können ausschließlich gelöste Stoffe aufnehmen. Die Bodenlösung sollte eine „Idealzusammensetzung“ der einzelnen Nährstoffe besitzen, da die Selektivität der Pflanzenaufnahme für bestimmte Nährstoffe nur aus der „Ideallösung“ optimal funktioniert.

Kalium (**K**) ist im Verhältnis zu Magnesium (**Mg**) und Calcium (**Ca**) in zu geringer Konzentration gelöst. Die Phosphor (**P**) Konzentration liegt im **Mangel**. Die **Spurenelementversorgung** ist bis auf Zink (Zn) gut.

Das Verhältnis von **NO₃-N** zu **NH₄-N** ist in Richtung des NO₃-N verschoben. Dies ist günstig und deutet auf eine ausreichende Durchlüftung für die stickstoffoxidierenden Bakterien hin.

Die wasserlöslichen Anteile an Eisen (**Fe**) sind erhöht, Fe kann die Verfügbarkeit anderer Nährstoffe beeinträchtigen.

Die wasserlöslichen Anteile an Aluminium (**Al**) sind erhöht, eine Kontamination von Nachbarsystemen (z.B. Grundwasserkörper) kann nicht ausgeschlossen werden. Al in der Bodenlösung kann die Aufnahme von Phosphor (**P**), Calcium (**Ca**) und Magnesium (**Mg**) stark beeinträchtigen und kann daher die Ursache für sichtbare P-, Ca- und Mg-Mangelsymptome sein.

Organische Substanz

Der Gehalt an *organischer Substanz* ist für einen Ackerstandort dieser Schwereklasse niedrig und sollte erhöht werden. Dazu eignen sich Mulchsaaten bzw. Untersaaten sowie die Zufuhr von Mist und Kompost.

Das C/N Verhältnis von **8,3** ist günstig. Bei optimalem Witterungsverlauf (Temperatur, Feuchte) können durch mikrobiologische Prozesse während der Vegetationsperiode die am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“ unter „**Mineralisierungspotential**“ angeführten Mengen an Stickstoff (**N**), Phosphor (**P**) und Schwefel (**S**) mineralisiert werden. Die mineralisierten Nährstoffe können von den Pflanzen aufgenommen werden und einen wichtigen Beitrag zu deren Ernährung leisten.

Aufgrund der Rahmenbedingungen (Säurehaushalt) ist das **Mineralisierungspotential** aktuell **eingeschränkt**.

Kationenaustauschkapazität (siehe Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“)

Die organische Substanz und die Tonteilchen können im Boden Nährstoffe anlagern und gegenüber Auswaschung schützen. Da sie eine Ladung besitzen, wirken sie wie „*Magneten*“ und werden als Austauscher bzw. Sorptionskomplex bezeichnet. Die Stärke der Magneten, das heißt die Anzahl der Ladungen, die anlagert werden können, wird Austauschkapazität (international: Cation Exchange Capacity (CEC)) genannt.

Potentielle Austauschkapazität (CEC potentiell): Potential des Standortes

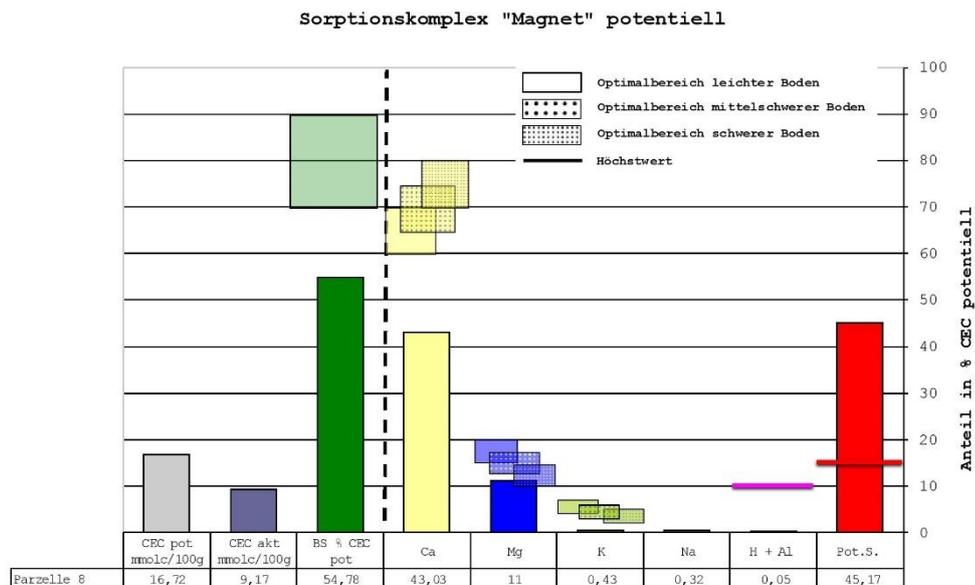


Abbildung: Zusammensetzung der potentiellen Austauscherkapazität (CEC pot)

Beim untersuchten Boden (s. Abbildung oben) beträgt die Gesamtkapazität (**CEC pot**) des Austauschers **16,7 mmolc/100g** und ist auf die organische Substanz und auf die Tonminerale, Oxide und Hydroxide zurückzuführen. Die aktuelle Austauschkapazität beträgt **9,2 mmolc/100g (=CEC akt)**. Der Boden ist aktuell als **mittel sorptionsstark** zu bezeichnen.

Die **Basensättigung (BS)**, der prozentuelle Anteil der Summe von Calcium (Ca), Magnesium (Mg), Kalium (K) und Natrium (Na) am CEC pot, liegt mit 55% deutlich unterhalb des gewünschten Bereiches (70-90%). Das Vermögen weitere Säureeinträge abzuf puffern ist schlecht ausgeprägt. Es besteht die unmittelbare Gefahr, dass der Standort **weiter versauert** und die **Bodenfruchtbarkeit gefährdet** wird.

Die **Bodenfruchtbarkeit** wird durch das komplexe Zusammenwirken mineralogischer, physikalischer, chemischer und biologischer Wachstumsfaktoren bestimmt. Dazu zählen z.B. der Gehalt und die Verhältnisse an pflanzenverfügbaren Nährstoffen, die Bodenreaktion, die Durchlässigkeit und Speicherkapazität für Wasser und Luft, der Humusgehalt sowie die biologische Aktivität. Diese Faktoren bilden die Grundlage, um in Verbindung mit Witterung und Bewirtschaftung den Ertrag **dauerhaft** und **umweltverträglich** zu optimieren.

Beim untersuchten Boden wird derzeit das Potential der Bodenfruchtbarkeit nicht ausgeschöpft. Die potentielle Säure (**pot.S.**) am Austauscher ist mit 45% sehr hoch, die Stoffverhältnisse liegen nicht im Optimalbereich, die Anteile von Ca, Mg und K sind niedrig bzw. sehr niedrig (siehe Abb. oben bzw. Übersichtstabelle „Bodeneigenschaften“).

Im Zuge von Austauschprozessen werden Nährstoffe (z.B. Ca, Mg, K) durch Säuren vom Austauscher verdrängt, die Säuren lagern sich im Gegenzug an. Dieser Prozess der Nährstoffmobilisierung ist für die Ernährung der Kulturpflanzen über die Vegetationsperiode von essentieller Bedeutung.

Zur Aufrechterhaltung dieser Prozesse ist es notwendig, dass Teile der angelagerten Säuren in regelmäßigen Abständen neutralisiert werden. Das Überschreiten einer bestimmten Säuremenge am Austauscher führt dazu, dass die Säuren immer stärker angelagert werden und nicht mehr an den Austauscherreaktionen teilnehmen (= „**Potentielle Säure**“). Durch diese Blockade von Sorptionsplätzen wird die aktuelle Austauschkapazität reduziert (roter Balken in Abbildung oben). Gleichzeitig reduzieren sich die Anteile an Ca, Mg und K, die Differenz zu den optimalen Wertebereichen wird immer größer (gelber/blauer/grüner Balken in Abbildung).

Durch die Zufuhr der Stoffe, die im Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“ unter „**Melioration**“ angeführt sind, werden die potentielle Säure mobilisiert und neutralisiert (roter Balken sinkt) und die Anteile an Ca, Mg und K wieder in die optimalen Wertebereiche überführt.

Die Mengen an **Dolomit/Gips/Kalk** sollten **pro Anwendung im Normalfall 1.500 kg pro Hektar und Jahr** nicht überschreiten.

Nach vollständiger Umsetzung der Melioration sollte das Ertragspotential deutlich verbessert worden sein. Zur Aufrechterhaltung bzw. weiteren Verbesserung des Ertragspotentials müssen danach kontinuierlich Bodenpflegemaßnahmen durchgeführt werden.

Aktuelle Austauschkapazität (CEC aktuell): IST-Zustand

Auf Grund der Blockade von Bereichen der Austauscherflächen durch die potentielle Säure (pot.S.) können sich Ca, Mg und K nur am noch aktiven Anteil anlagern. Zur Bewertung des aktuellen Zustandes muss deshalb der aktive Anteil als Bezugsgröße herangezogen werden (CEC akt). Dies entspricht der Situation, welche die Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen derzeit vorfinden.

Die Verhältnisse der Stoffe zueinander bilden dabei einen wesentlichen Schlüsselfaktor zur Beurteilung der Bodenfruchtbarkeit (Pflanzenernährung, Biologie, Aggregatstabilität, Luft/Wasserverhältnisse).

Nachfolgende Tabelle stellt die Verteilung der Stoffe am Austauscher dar, bei welcher optimale Verhältnisse herrschen (SOLL). Dem SOLL-Zustand ist die Zusammensetzung des aktuellen Austauschers der analysierten Bodenprobe gegenübergestellt. Die optimalen Wertebereiche sind abhängig von verschiedenen Basisparametern.

Tabelle 4: Optimalbereiche zu gemessenen Werten am aktuellen Austauscher in %

	Ca	Mg	K	Na	(H+Al)
SOLL	60-75	13-18	2-5,5	< 1	< 10
Parzelle 8	78,5	20,1	0,8	0,6	0,1

Sorptionskomplex "Magnet" aktuell

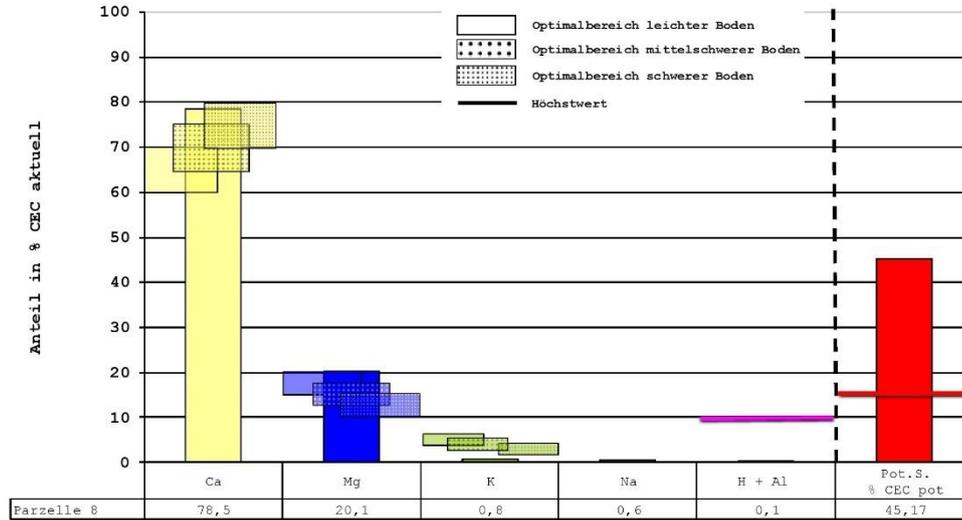


Abbildung: Zusammensetzung der aktuellen Austauschkapazität (CEC akt) sowie Anteil der potentiellen Säure (Pot. S.) am CEC pot

Die Pflanzenwurzeln und Mikroorganismen finden eine **ungünstige** Verteilung von Stoffen am aktuell genutzten Anteil des Austauschers (CEC akt) vor. Der Anteil von **Ca** und jener von **Mg** liegt im Überschuss, **K** ist deutlich im Mangel.

Bei Böden dieser Schwereklasse sollten der Ca-Anteil am Austauscher zwischen 60 und 75%, jener von Mg zwischen 13 und 18% liegen, um eine optimale Aggregatstabilität zu erreichen.

Der Anteil an **potentieller Säure (pot. S.)** ist sehr hoch (s. oben).

Wie bereits oben angeführt wird zur Abpufferung eines Teiles der potentiellen Säure und zur Harmonisierung der Stoffverhältnisse am Austauscher sowie zur Verbesserung der Aggregatstabilität die Zufuhr der am Übersichtsblatt „Bodeneigenschaften“ unter „Melioration“ angegebenen Stoffe empfohlen. Wichtig ist die Zufuhr aller Stoffe, da man ansonsten die Verteilung der Kationen negativ beeinflusst.

Beurteilung der Nährstoffe (siehe Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“)

Im Folgenden werden die Nährstoffe Calcium (Ca), Stickstoff (N), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Phosphor (P) sowie deren Pools beschrieben.

Calcium

Calcium (Ca) ist einer der wichtigsten Nährstoffe. Ca stabilisiert als „Zellmörtel“ das pflanzliche Gewebe und ermöglicht dadurch erst die Ausnutzung vieler anderer Nährstoffe. Diese Funktion bedingt, dass Ca in der Pflanze nicht mobil ist und somit über die gesamte Vegetationsperiode von den Wurzeln aufgenommen werden muss! Bestimmte Kulturen wie Raps und Leguminosen haben einen höheren Calcium- als Kaliumbedarf!

Ca liegt im Boden in verschiedenen Bindungsformen vor (karbonatisch z.B. Kalk, silikatisch z.B. Feldspäte). Die Nachlieferung erfolgt über Prozesse der Verwitterung (Versauerung). Austauschbares Ca am Sorptionskomplex steht im Fließgleichgewicht mit dem Ca in der Bodenlösung.

Bei *kalkfreien* Böden im Austauscherpufferbereich ist Ca häufig das „Hauptkation“ in der Bodenlösung. Bei erhöhter potentieller Säure im Austauscherpuffer, sowie im Silikat-, Aluminium- und Eisenpufferbereich, kann das Verhältnis der (molaren) Ca-Konzentration zum Aluminium verschoben werden. Dies kann zu Wachstumsdepressionen bis hin zur Wurzeltoxizität führen.

Eine ausreichende Ca-Versorgung kann durch die Zufuhr von verschiedenen Ca-Quellen erfolgen: Dolomit, Gips und Kalk (siehe Melioration). Die Zufuhr an DGC ist mehr als die gezielte Neutralisation bestimmter Säureanteile, es ist auch eine Ca-Düngung!

Stickstoff

Die Stickstoffversorgung ist zum Zeitpunkt der Probenahme mangelhaft. Die Stickstoffernährung der Pflanzen kann durch verschiedene Maßnahmen unterstützt werden:

- biologische N-Fixierung (Knöllchenbakterien, frei lebende N-bindende Bakterien)
- Zufuhr von organischen Stoffen (N organisch gebunden, N mineralisch)
- Zufuhr von mineralischen N-Düngern (Ammonium, Harnstoff, Nitrat, ...).

Welche N-Formen und welche Mengen den besten Ertrag bringen, hängt von den spezifischen Bedingungen des Standortes (z.B. Feuchte, Temperatur, Luftkapazität) und den Ansprüchen der Kultur ab. Generell sollten nitrathaltige Dünger vermieden werden, da Nitrat die Energiebilanz der Pflanze extrem strapaziert (Nitrat kann erst nach Umwandlung in Ammonium von der Pflanze verwertet werden) und die Gefahr der Nitratbelastung in Wasserkörpern stark erhöht wird.

Die Mineralisierungsrate ist abhängig von den Feuchte- und Temperaturbedingungen sowie von den Milieubedingungen für die Mikroorganismen (Säuremilieu, Nährstoffversorgung). Bei diesem Standort ist das **Mineralisierungspotential** auf Grund der Rahmenbedingungen **aktuell eingeschränkt**.

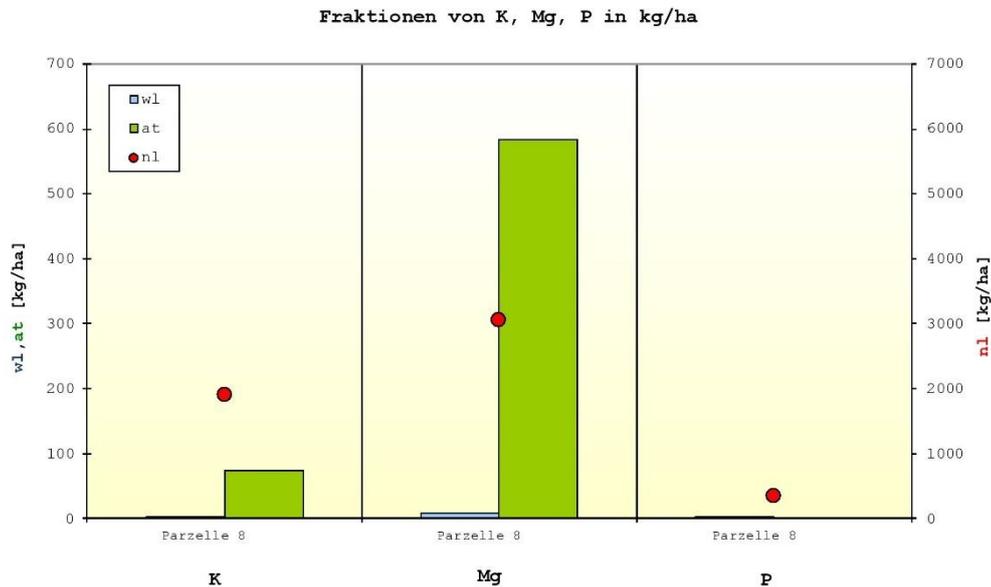


Abbildung: Fractionen der Nährstoffe K, Mg, P (wl=wasserlöslich, at=austauschbar, nl=nachlieferbar).
Alle Gehalte sind Nettowerte (at ohne wl, nl ohne at und ohne wl)

Die Abbildung oben und die folgenden Tabellen stellen die **pflanzenverfügbaren** (= wasserlöslichen + austauschbaren) Anteile von Kalium, Magnesium und Phosphor zum **Zeitpunkt der Probenahme** dar. Die **nachlieferbaren** Anteile können durch verschiedene Prozesse im Laufe der Vegetationsperiode zum Teil mobilisiert (= pflanzenverfügbar) werden.

Bei dieser **Momentaufnahme** ist es ökologisch nicht sinnvoll, dass die gesamte Menge an Nährstoffen, welche die angeführte Kultur beim angegebenen Ertragsniveau über die gesamte Vegetationsperiode benötigt, in einer leicht verfügbaren Form zur Verfügung steht.

Am Übersichtsblatt „Pflanzenernährung“ sind **Nährstoffe** und **potenziell toxische Stoffe** in verschiedenen Fractionen (wasserlöslich, austauschbar, Reserve) tabellarisch gegenübergestellt.

Kalium

Tabelle 5: verschiedene K-Pools des Bodens, Parzelle 8

Element	Verfügbarkeit	Menge kg/ha	Bemerkung
K	wasserlöslich	1,8	Mangel
K	austauschbar	73	Mangel
K	nachlieferbar	1900	Reserven sehr hoch

Der Standort neigt zur K Fixierung.

Magnesium

Tabelle 6: verschiedene Mg-Pools des Bodens, Parzelle 8

Element	Verfügbarkeit	Menge kg/ha	Bemerkung
Mg	wasserlöslich	8,4	ausreichend
Mg	austauschbar	583	Zufuhr für Melioration
Mg	nachlieferbar	3050	Reserven sehr hoch

Phosphor

Tabelle 7: verschiedene P-Pools des Bodens, Parzelle 8

Element	Verfügbarkeit	Konzentration mg/l	Menge kg/ha	Menge in % P total	Bemerkung
P	wasserlöslich	0,09	0,2	0,01	Mangel
P	austauschbar		0	0	starker Mangel
P	nachlieferbar		350	22	min. Reserven mittel
P	organisch		851	52	org. Reserven hoch
P	total		1623		Gesamtgehalte mittel

Die P-Konzentration in der **Bodenlösung** beträgt **0,09 mg/l** und liegt unterhalb des Bereiches für eine gute Pflanzenentwicklung. Insgesamt sind P < **5 kg/ha** in **pflanzenverfügbarer** Form vorhanden. Diese Menge ist für die gesamte Vegetationsperiode nicht ausreichend. Es kann aber damit gerechnet werden, dass je nach Temperatur und Feuchteverhältnisse durch mikrobiologische und chemische Prozesse laufend P aus den Reservefraktionen mobilisiert wird.

Der **säurelösliche Reservepool** ist mit P ca. **350 kg/ha** mittel aufgefüllt, die **organischen Reserven** sind mit etwa **850 kg/ha** hoch. Zur nachhaltigen Sicherung der P-Versorgung sollten Maßnahmen gesetzt werden die nachhaltig P aus den **Reservepools mobilisieren**. Dazu eignen sich mehrere Strategien wie:

- Verbesserung und Stabilisierung des Puffersystems (z.B. Zufuhr von Dolomit, Kalk)
- Förderung der mikrobiellen Aktivität (z.B. Verbesserung der Durchlüftung, Versorgung mit Spurenelementen, Mulchsaat, Untersaat)
- Ionenkonkurrenz (z.B. Silikate)
- Zufuhr P-aufschließender Bakterien (megaterium phosphaticum)

Spurenelemente und nützliche Elemente

Die Spurenelemente sind essentiell zur Pflanzenernährung und in Pflanzen in geringen Mengen vorhanden. Nützliche Elemente können bei bestimmten Kulturen Vorteile bei der Vitalität, der Abwehr von Schadorganismen oder der Bindung/Mobilisierung von Nährstoffen bedingen.

Eisen (**Fe**) ist meist als mineralische Reserve in großen Mengen im Boden vorhanden (org. Reserve meist unbedeutend => absoluter Mangel auf stark organischen Böden wie Hochmoor, **häufige Gehalte im Boden 5.000 bis 40.000 mg/kg**). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **50 und 1.000 mg/kg TS**. Fe ist an Redoxreaktionen, Photosynthese und Atmung beteiligt.

Mangan (**Mn**) ist im Boden in vielen Mineralen enthalten und kann zum Teil durch Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 200 bis 400 mg/kg**). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **20 und 200 mg/kg TS**. Mangan aktiviert Enzyme und ist an Redoxreaktionen beteiligt.

Zink (**Zn**) ist in verschiedenen Mineralen enthalten und kann zum Teil ausgefällt oder im Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 10 bis 300 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **10 und 100 mg/kg TS**. Zink aktiviert Enzyme, ist an der Photosynthese beteiligt und fördert die Produktion von Wuchsstoffen.

Kupfer (**Cu**) ist in verschiedenen Mineralen und Erzen enthalten, kann als sekundäres Mineral ausgefällt oder im Humus fixiert werden (**häufige Gehalte im Boden 5 bis 100 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **2 und 15 mg/kg TS**. Kupfer ist Bestandteil von Redoxsystemen (Photosynthese).

Bor (**B**) ist im Mineral Turmalin, sowie in Glimmern enthalten, oft als sekundäres Mineral ausgefällt (**häufige Gehalte im Boden 5 bis 100 mg/kg**). Die **Gehalte in Pflanzen** liegen zwischen **2 und 100 mg/kg TS**. Bor ist Baustein der Zellwand und beeinflusst die Wuchsstoffbildung.

Molybdän (**Mo**) ist in Silikaten wie Olivinen und Eisenoxiden vorhanden, nach der Verwitterung oft wieder ausgefällt (**häufige Gehalte im Boden 0,5 bis 5 mg/kg**). Die **Gehalte in der Pflanze** liegen zwischen **0,2 bis 3 mg/kg TS**. Molybdän ist Bestandteil von Enzymen (Nitratreduktase, Nitrogenase, Phosphatase).

Silizium (**Si**) ist der Hauptbestandteil vieler Böden (~ 30%), aber sehr immobil. Der **Gehalt in Pflanzen** ist hoch (**1.000 bis 10.000 mg/kg TS**) und entspricht in etwa dem Phosphor Gehalt! Silizium festigt Zellwände und Stützgewebe, fördert die Vitalität und stärkt die Abwehr von Schadorganismen.

Kobalt (**Co**) weist eine gute Beziehung zu den Eisengehalten auf. **Häufige Gehalte im Boden 1 bis 10 mg/kg**. Kobalt ist für die Pflanzenernährung nicht essentiell, jedoch für alle Bakterien und Tiere (Menschen) unbedingt notwendig (Vitamin B12). Der **Gehalt in Pflanzen** liegt zwischen **0,03 und 0,3 mg/kg TS**.

Tabelle 8: Spurenelemente in verschiedenen Pools, Parzelle 8

Element	Pflanzenverfügbar kg/ha	Reservepool kg/ha	empfohlene Zugabe über den Boden kg/ha
Fe	2,5	11300	keine
Mn	0,20	1990	keine
Cu	0,01	25,0	0,09
Zn	0,44	50,0	keine
Mo	0,00	0,00	0,05
B	0,29	0,00	keine
Si	65,0	6410	keine
Co	0,000	28,8	keine

*) Differenz des Pflanzenbedarfs während der gesamten Vegetationsperiode zum Zeitpunkt der Probenahme.

Achtung: Überschüsse an Fe, Zn, B!

Toxische Elemente

Die wasserlöslichen Gehalte an Aluminium (**Al**) können Nachbarsysteme (z.B. Gewässer) gefährden. Al in der Bodenlösung kann die Aufnahme von Phosphor (**P**), Calcium (**Ca**) und Magnesium (**Mg**) stark beeinträchtigen und kann daher die Ursache für sichtbare P-, Ca- und Mg-Mangelsymptome sein.

Durch eine Verbesserung des Puffersystems (z.B. Zufuhr von DGC – Dolomit/Gips/Calk, siehe Melioration) wird Al in festere Bindungsformen überführt, das Gefährdungspotential wird reduziert.

Mit freundlichen Grüßen

Univ.Lek. DI. Hans Unterfrauner

Bemerkung: Die Interpretation und die empfohlenen Maßnahmen beziehen sich auf die eingeschickte Bodenprobe. Für die Qualität der Probenziehung und der Bodenprobe wird keine Haftung übernommen.

A-2544 Leobersdorf
Aredstraße 13 Top 3-4

Tel: +43 2256 64 186
Fax: +43 2256 64 186 -21
Email: agrar@waterandwaste.at



Wasser- und Abfallwirtschaft
Abt. Agrar- und Bodenkunde

BODENUNTERSUCHUNG

Auftraggeber:	TB Unterfrauner GmbH	Labor Nr.:	agr20-0258.1
Adresse:	Erdbergstraße 10/33 1030 Wien	Bezeichnung:	8071 Boden
Standortbezeichnung:	NT8078	Kulturart:	Minze
Probenahmedatum:		Tiefe:	0-27cm Ertrag: t

PARAMETER	SYMBOL	EINHEIT	WERT	PARAMETER	I H ₂ O	II Ausb	III Nachl	IV Gesamt
					mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Bindig.Schwere	KH	-	48,7	Ca	16,95	1442	1395	
Leitfähigkeit	eL	mS/cm	0,295	Mg	3,23	223,53	766,84	
Kalkgehalt	CaCO ₃	%		K	0,70	27,98	479,72	
Wassergehalt	WGF	%	9,23	Na	3,10	12,26	30,99	
Reaktion (w)	pH-H ₂ O	-	6,39	NH ₄ -N	0,02	0,16		
Reaktion (n)	pH-CaCl ₂	-		H	0,10	0,01		
Reaktion (a)	pH-KCl	-	4,92	Al	0,28	0,60	3024	
Austauschkap. (T)	CEC _p	mmolc/100g	16,73	Ba	0,02	4,70	65,68	
Basensättigung	BS	% CECp	54,80	PO ₄	0,14	<0,9783	366,03	
aktiver T-Ant.	Ta/Tp		0,55	P	0,05	0,27	119,38	
Ca- Anteil an T	Ca%	% CECp	43,01	NO ₃ -N	13,62			
Mg- Anteil an T	Mg%	% CECp	10,99	SO ₄	6,87			
K- Anteil an T	K%	% CECp	0,43	Cl	1,48			
Na- Anteil an T	Na%	% CECp	0,32	HCO ₃	<0,01			
NH ₄ -N- Anteil an T	NH ₄ -N%	% CECp	<0,01	SiO ₃	21,34	46,61	4365	
H ⁺ - Anteil an T	H ⁺	% CECp	<0,01	BO ₃	0,27	0,31	<5,44	
Al- Anteil an T	Al%	% CECp	0,04	Ag	<0,0034	<0,0391	<2,00	
Ba- Anteil an T	Ba%	% CECp	0,04	Fe	0,94	<0,0001	2846	
Pot.Säureanteil	Sp%	% CECp	45,16	Mn	0,0081	0,07	499,92	
Abb.org.Substanz	AOS	%	1,50	Cu	0,0037	<0,0401	6,57	
Org. Kohlenstoff	C _{org}	%	0,87	Zn	<0,0097	0,17	12,74	
Ges. Stickstoff	N _t	mg/kg	1050	Co	<0,0007	<0,0166	7,23	
Org. Stickstoff	N _{org}	mg/kg	1036	Mo	<0,0019	<0,0391	<0,0700	
Min. Stickstoff	N _{min}	mg/kg	13,8	B	0,05	0,06	<1,00	
H ₂ O-lösl.Stickstoff	N _l	mg/kg	13,6	Sn	<0,0034	<0,0685	<0,70	
Ges. Schwefel	S _t	mg/kg	70,0	Se	<0,0292	<1,1739	<3,60	
Ges. Phosphor	P _t	mg/kg	407,9	As	<0,0175	<0,7826	<0,2200	
Org. Phosphor	P _{org}	mg/kg	213,9	Ni	0,0028	<0,0352	5,63	
Min. Phosphor	P _{min}	mg/kg	194,0	Cr	0,0019	0,08	4,74	
C/P-Verhältnis	C/P	m/m	40,9	Pb	<0,0049	<0,0978	13,05	
C/S-Verhältnis	C/S	m/m	124,9	Cd	<0,0003	<0,0108	0,14	
C/N-Verhältnis	C/N	m/m	8,3	Hg				
Rel.H ₂ O-Kapaz.	RWK	%Gew.		Tl	<0,0292	<0,9783	<4,00	
Feuchtdichte	FDICHTE	g/l		V	0,0034	<0,0088	13,74	
Trockendichte	TDICHTE	g/l						
Extrverh. I	EXI	l/kg	0,49					
Extrverh. II	EXII	l/kg	9,78					
Färbung/Trübung	FT		13					

Probeneingang: 27.05.20
Anmerkung:

Ausfertigung: 29.06.20

Labornr.: agr20-0258.1

Seite 1 von 1

10.5 Messergebnisse pH-Wert des 1. Schnitts (08. Juli 2020)

Schicht	0-10 cm	10-20 cm	20-40 cm	40-70 cm
Parzelle 1	6,9	6,9	6,7	6,9
Parzelle 2	6,3	6,4	6,6	7,1
Parzelle 3	6,5	6,5	6,6	7,1
Parzelle 4	6,8	6,4	6,7	6,8
Parzelle 5	7,0	6,4	6,6	7,1
Parzelle 6	6,9	6,6	6,9	6,9
Parzelle 7	6,5	6,7	6,6	7,0
Parzelle 8	6,6	6,9	6,6	7,2
Parzelle 9	6,6	6,4	6,8	7,1
Parzelle 10	6,6	6,8	7,0	7,1

10.6 Messwerte TDR Sonden

Bewässerte Variante: Messwerte TDR Sonden, Mittelwerte und Standardabweichung

*gelb = Ausreißer -> bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt!

1	Datum:	18. Mai.	19. Mai.	19. Mai.	19. Mai.	27. Mai.	28. Mai.	02. Jun.	08. Jun.
2		16 Uhr	9 Uhr	12 Uhr	15 Uhr	Vol. %			
3	Parzelle 1:								
4	5cm tief	23,5	26,9	23,5	24,3	25,1	28,8	25,6	27,2
5	15cm tief	26	25,1	20,3	18,2	28,3	26,3	30	29,7
6	30cm tief	28,3	38,5	38,5	38,4	34,6	34,4	32,8	31,3
7	55cm tief	31	32	32	32,1	33,2	33,2	32,9	33
8	Parzelle 2:								
9	5cm tief	25,7	27,9	26,2	26,1	30,1	25,6	27,7	33,1
10	15cm tief	31,6	31,7	23,2	27,5	33,2	35,2	30,5	34,7
11	30cm tief	24,4	38,2	37,7	37,3	31,2	30,9	29	27,7
12	55cm tief	26,1	27,6	27,7	27,8	28,1	28,1	28	28
13	Parzelle 3:								
14	5cm tief	30,9	32,2	33,6	32,8	33	30,8	31,2	37,4
15	15cm tief	31,2	25,9	22,9	27,5	38,1	34,3	32,9	34,9
16	30cm tief	33	34,2	34,3	34,5	39,7	38,7	36,3	39,9
17	55cm tief	32	32,5	32,5	32,6	34,2	34,1	33,7	33,7
18	Parzelle 4:								
19	5cm tief	32,4	27,8	28,6	34,4	31,6	30	31,2	34,6
20	15cm tief	24,1	28,5	23,5	28,1	32,7	27,7	32,4	34,5
21	30cm tief	28,1	29,7	26,8	30	36,3	35,9	34,8	34,8
22	55cm tief	23,5	24,5	24,9	24,9	26,9	26,9	26,4	26,4
23	Parzelle 5:								
24	5cm tief	33,9	34,4	33	28,1	36,4	33,6	34,4	37,6
25	15cm tief	28,9	28,2	27,4	28,3	37,1	32,2	34,7	36,1
26	30cm tief	34,4	36,7	36,7	36,7	39	38,6	36,9	40,2
27	55cm tief	29,1	31,4	31,3	31,2	31,3	31,1	30,4	29,9
28									
29	Mittelwert Parzellen 1-5:								
30	5cm:	29,28	29,84	28,98	29,14	31,24	29,76	30,02	33,98
31	15cm:	28,36	27,88	31,16	25,92	33,88	31,14	32,1	33,98
32	30cm:	29,64	35,46	34,8	35,38	36,16	35,7	33,96	34,78
33	55cm:	28,34	29,6	29,68	29,72	30,74	30,68	30,28	30,2
34									
35	Mittel 0-30cm		31,1	31,6	30,1	33,8	32,2	32,0	34,2
36	Mittel 0-55cm		30,7	31,2	30,0	33,0	31,8	31,6	33,2
37									
38	Standardabweichung Parzellen 1-5:								
39	5cm:	4,47	3,28	4,34	4,32	4,15	2,92	3,42	4,24
40	15cm:	3,26	2,58	2,54	4,33	3,91	3,96	1,90	2,47
41	30cm:	4,05	3,64	4,74	3,33	3,45	3,25	3,19	5,43
42	55cm:	3,52	3,44	3,27	3,28	3,16	3,13	3,12	3,14

1	Datum:	23. Jun.	02. Jul.	08. Jul.	14. Jul.	20. Jul.	28. Jul.	03. Aug.	06. Aug.	10. Aug.
2	Wassergehalt in Vol. %, bewässertes Feld									
3	Parzelle 1:									
4	5cm tief	31,2	25,9	16,2	25,9	34,6	23,1	39,8	31,3	22,3
5	15cm tief	34,7	26,1	22,1	33,2	34,9	24,9	37,5	34,6	26,8
6	30cm tief	34,6	27,8	25,6	25,7	32,5	26,9	25	33,4	28
7	55cm tief	32,7	32,9	32,1	32,3	32,5	31,5	30,2	30,1	30
8	Parzelle 2:									
9	5cm tief	35	23,8	22,1	30,2	35,8	23	36,7	34,6	23,6
10	15cm tief	34,4	29,6	21,2	33,8	38,6	26,8	26,5	24,4	29,3
11	30cm tief	28,4	26,4	22,2	31,1	35	29,1	39,4	35,9	29,4
12	55cm tief	28,4	27,7	27,5	28,1	31,2	18,5	28,6	34,5	30,1
13	Parzelle 3:									
14	5cm tief	35,2	18	27,7	31,1	38,4	24,5	37,6	34,7	24,8
15	15cm tief	36,9	33,5	21,1	33,5	38,6	29,7	40,7	37,2	30,9
16	30cm tief	40,5	34,2	32,7	40,8	40,7	33,5	39,5	39,8	34,9
17	55cm tief	35	34,1	33,2	34,7	35,2	34,2	39,3	36	34,1
18	Parzelle 4:									
19	5cm tief	37,6	30,1	19,7	33,3	36,1	23,2	33,3	36,9	31,3
20	15cm tief	36,1	27,1	19,8	33	39	26,5	41,2	39,2	30,3
21	30cm tief	41,9	28,9	28,2	39,4	42,4	37,6	40,7	41,4	37
22	55cm tief	28,3	26,5	24,4	29,8	31,7	29,4	38,9	30,8	29,7
23	Parzelle 5:									
24	5cm tief	38,9	34,2	32,1	33,6	37,8	23,6	32,2	32,8	30,7
25	15cm tief	34,9	26,1	23,2	32,4	37,8	28,1	39,6	30,9	33,7
26	30cm tief	40,5	31,6	27,8	40	42,4	37,7	43,2	42,1	36,2
27	55cm tief	33,5	28	23,9	33,1	34,8	31,9	43,4	34,2	31,2
28										
29	Mittelwert Parzellen 1-5:									
30	5cm:	35,58	26,4	23,56	30,82	36,54	23,48	35,92	34,06	26,54
31	15cm:	35,4	28,48	21,48	33,18	37,78	27,2	37,1	33,26	30,2
32	30cm:	37,18	29,78	27,3	35,4	38,6	32,96	37,56	38,52	33,1
33	55cm:	31,58	29,84	28,22	31,6	33,08	29,1	36,08	33,12	31,02
34										
35	Mittel 0-30cm	36,1	28,2	24,1	33,1	37,6	27,9	36,9	35,3	29,9
36	Mittel 0-55cm	34,9	28,6	25,1	32,8	36,5	28,2	36,7	34,7	30,2
37										
38	Standardabweichung Parzellen 1-5:									
39	5cm:	2,95	6,17	6,35	3,10	1,55	0,61	3,13	2,12	4,17
40	15cm:	1,06	3,15	1,26	0,53	1,67	1,80	6,09	5,85	2,51
41	30cm:	5,66	3,12	3,84	6,69	4,57	4,90	7,19	3,74	4,12
42	55cm:	3,06	3,41	4,29	2,64	1,82	6,17	6,37	2,54	1,81
43										

1	Datum:	12. Aug.	12. Aug.	12. Aug.	13. Aug.	13. Aug.	13. Aug.	14. Aug.	14. Aug.	14. Aug.	15. Aug.	15. Aug.
2		9 Uhr	12 Uhr	15 Uhr	9 Uhr	12 Uhr	15 Uhr	9 Uhr	12 Uhr	15 Uhr	9 Uhr	15 Uhr
3	Parzelle 1:											
4	5cm tief	19,2	22,3	22	21,2	24,1	23,8	24,6	25,8	24,1	24,7	20,8
5	15cm tief	28,1	28,2	29,2	29,6	27,3	27,3	25,2	23,9	24,8	26,1	29,3
6	30cm tief	35,5	34,9	34,4	33,5	33,2	32,9	32	31,8	31,7	31,5	31,4
7	55cm tief	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,3	30,4	30,3	30,3	30,4	30,4
8	Parzelle 2:											
9	5cm tief	20,2	22,7	19,4	24,7	24,9	25	22,4	24,5	20,2	27	26,2
10	15cm tief	26	23,5	25,4	24,5	23,2	25,5	25,1	20,2	21,8	28,3	32,5
11	30cm tief	30,5	32,3	32,3	31,9	31,6	31,2	30,7	30,4	30	29,8	29,7
12	55cm tief	30	29,9	29,8	29,8	29,8	29,7	29,7	29,6	29,5	29,6	29,5
13	Parzelle 3:											
14	5cm tief	24,3	24,4	24,9	26,7	27,4	27,4	27,3	24,6	28,5	29,1	29,2
15	15cm tief	31,2	30	30,1	32,4	30,5	31,9	31,6	31,1	29,7	33,2	38,1
16	30cm tief	39,1	39,3	39,2	38,3	37,9	37,3	36,8	36,5	36,2	36,2	36,1
17	55cm tief	34,2	34,1	34,1	34,2	34,1	34	34,1	34	33,9	34,1	34,1
18	Parzelle 4:											
19	5cm tief	26,2	25,8	25,4	27,1	26,2	27,6	26,2	25,6	26	26,9	27,9
20	15cm tief	25,2	23,9	24,2	28,7	27,8	30,8	24,7	23,1	24,6	28,7	30,1
21	30cm tief	36,4	36,4	36,4	36,2	36,2	36,2	36	35,9	35,9	35,6	35,5
22	55cm tief	50,1	50	50,1	31,4	31,1	30,8	30,1	30	29,9	29,6	29,5
23	Parzelle 5:											
24	5cm tief	25,9	24,5	25,3	29,6	29,5	29,6	26,2	32,3	27,9	20	23
25	15cm tief	31,8	31,7	30,1	30	30,3	31,6	27,3	25,6	25,2	35,1	33,9
26	30cm tief	41,1	40,6	40,4	38,8	38,6	38,4	37,9	37,7	37,4	37,3	37,1
27	55cm tief	31,4	31,8	31,8	31,7	31,6	31,5	31,5	31,5	31,4	31,4	31,4
28												
29	Mittelwert Parzellen 1-5:											
30	5cm:	23,16	23,94	23,4	25,86	26,42	26,68	25,34	26,56	25,34	25,54	25,42
31	15cm:	28,46	27,46	27,8	29,04	27,82	29,42	26,78	24,78	25,22	30,28	32,78
32	30cm:	36,52	36,7	36,54	35,74	35,5	35,2	34,68	34,46	34,24	34,08	33,96
33	55cm:	35,2	35,22	35,22	31,48	31,38	31,26	31,16	31,08	31	31,02	30,98
34												
35	Mittel 0-30cm	29,4	29,4	29,2	30,2	29,9	30,4	28,9	28,6	28,3	30,0	30,7
36	Mittel 0-55cm	30,8	30,8	30,7	30,5	30,3	30,6	29,5	29,2	29,0	30,2	30,8
37												
38	Standardabweichung Parzellen 1-5:											
39	5cm:	3,26	1,43	2,64	3,13	2,13	2,29	1,90	3,26	3,35	3,47	3,47
40	15cm:	2,98	3,65	2,80	2,88	2,96	2,86	2,88	4,04	2,84	3,73	3,50
41	30cm:	4,03	3,34	3,34	3,00	3,01	3,04	3,15	3,17	3,20	3,25	3,22
42	55cm:	8,49	8,42	8,48	1,71	1,67	1,67	1,77	1,78	1,77	1,87	1,91

1	Datum:	18. Aug.	25. Aug.	31. Aug.	07. Sept.	14. Sept.	21. Sept.	28. Sept.	05. Okt.	12. Okt.	19. Okt.
2	Wassergehalt in Vol.%, bewässertes Feld										
3	Parzelle 1:										
4	5cm tief	33,1	30,2	22,1	37,2	26,1	22,1	37,8	31,7	36,9	37
5	15cm tief	28,1	30,9	27,9	37,2	28	24,8	38,8	31,2	39,3	36,3
6	30cm tief	34,5	31	29,4	36,6	32,7	34,8	36,7	34,2	32,7	35,8
7	55cm tief	30,3	30,3	30,1	29,9	29,8	29,4	29,2	29,4	29,3	33,5
8	Parzelle 2:										
9	5cm tief	37,6	26,6	27	37,1	27,3	22,5	37,9	31,4	36,8	36,6
10	15cm tief	23,2	31,5	23,6	34	27	18,5	45,4	30,6	35,3	36,4
11	30cm tief	33,5	29,1	26	33,3	27,2	23,6	31,8	30,1	27,8	33,6
12	55cm tief	29,4	28,9	28,1	35,5	28,9	26,6	39	30	28,9	29,4
13	Parzelle 3:										
14	5cm tief	32,4	29,3	31,2	38,6	33	27	40	35,2	38,5	38,7
15	15cm tief	37,7	35,7	31	43,4	32,2	19,7	40,2	33,7	39,6	45,3
16	30cm tief	39,9	37,2	34,5	40,3	35	37,7	40,7	36,9	39,6	40,7
17	55cm tief	34,1	34,7	33,4	44,6	33,8	32,2	34,8	33,8	36,1	34,3
18	Parzelle 4:										
19	5cm tief	35,4	30,6	20,7	39,9	32	27,4	38,6	36,7	42,8	38,2
20	15cm tief	27,4	36,6	27,7	41,5	26,6	22,6	40,8	33	39,2	33,6
21	30cm tief	35,5	40,8	35,7	41,4	37,9	35	43	40,2	40,1	41,3
22	55cm tief	30,1	29,6	28,4	36,8	29,2	28,3	51,8	29,2	51,5	29,4
23	Parzelle 5:										
24	5cm tief	38	33	31,2	39,7	34,3	28,1	39,6	38,9	38,6	40
25	15cm tief	36,4	37,1	32,2	40,2	32,1	29	37,4	38,3	40	42,8
26	30cm tief	40,7	39,4	35,6	42	38,4	28,2	41,9	39,5	40,6	40
27	55cm tief	31,4	32,4	30,4	35,9	31,4	42	44,2	31,9	30,7	32,9
28											
29	Mittelwert Parzellen 1-5:										
30	5cm:	35,3	29,94	26,44	38,5	30,54	25,42	38,78	34,78	38,72	38,1
31	15cm:	30,56	34,36	28,48	39,26	29,18	22,92	40,52	33,36	38,68	38,88
32	30cm:	36,82	35,5	32,24	38,72	34,24	31,86	38,82	36,18	36,16	38,28
33	55cm:	31,06	31,18	30,08	36,54	30,62	31,7	39,8	30,86	35,3	31,9
34											
35	Mittel 0-30cm	34,2	33,3	29,1	38,8	31,3	26,7	39,4	34,8	37,9	38,4
36	Mittel 0-55cm	33,4	32,7	29,3	38,3	31,1	28,0	39,5	33,8	37,2	36,8
37											
38	Standardabweichung Parzellen 1-5:										
39	5cm:	2,54	2,31	4,93	1,33	3,62	2,88	0,99	3,23	2,43	1,36
40	15cm:	6,23	2,94	3,35	3,71	2,76	4,20	3,03	3,04	1,91	4,93
41	30cm:	3,27	5,18	4,34	3,68	4,56	5,79	4,59	4,14	5,68	3,39
42	55cm:	1,84	2,36	2,11	5,26	2,02	6,11	8,68	1,96	9,50	2,34

Unbewässerte Variante: Messwerte TDR Sonden, Mittelwerte und Standardabweichung

* gelb = Ausreißer -> bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt!

1	Datum:	18. Mai.	27. Mai.	28. Mai.	02. Jun.	08. Jun.	23. Jun.	02. Jul.	08. Jul.
2		16 Uhr	Wassergehalt in Vol.%, unbewässertes Feld						
3	Parzelle 6:								
4	5cm tief	20	32,3	25,1	32,1	36,9	32,5	29,2	21,6
5	15cm tief	21	25	26,1	25,8	25,4	34,6	25	17,2
6	30cm tief	24	23,9	24	23,9	24,1	39,7	33,3	28,5
7	55cm tief	30,1	31,1	31,5	31,4	32,6	32,4	32,1	30,1
8	Parzelle 7:								
9	5cm tief	24,1	28,1	30,9	27,4	32,6	34,9	21,3	17,9
10	15cm tief	20,5	29,5	27,9	22,5	23,9	32	19	14,1
11	30cm tief	14,1	14,8	14,8	14,5	14,3	23,1	20,6	19,5
12	55cm tief	17,1	19,1	19,3	19,2	20,1	31,5	28,2	26,8
13	Parzelle 8:								
14	5cm tief	18,4	29,2	24,8	24,6	35,4	35	27,1	22,6
15	15cm tief	22,6	31,7	27	21,7	25,8	35,8	24,1	21,1
16	30cm tief	26,3	33,3	32,9	30,5	28,6	37,9	28,2	26,5
17	55cm tief	28,4	28,5	28,5	28,4	28,4	33,2	29,1	26,5
18	Parzelle 9:								
19	5cm tief	17,4	24,3	18,3	23,3	26,5	25,9	23,4	16,4
20	15cm tief	22,1	24,9	32,7	22,5	34,3	36,2	28,2	18,8
21	30cm tief	23,6	27,1	26,8	25,6	31,4	38,6	30,7	26,1
22	55cm tief	26,8	26,7	26,7	26,5	26,4	26	24,7	23
23	Parzelle 10:								
24	5cm tief	23,9	31,1	29,7	29,1	34,6	38,1	20,3	23,6
25	15cm tief	16,3	30,9	31,2	25,4	31,7	33,3	25,5	21,9
26	30cm tief	30,7	33,7	33,7	33,1	33,3	39,9	36,1	30,7
27	55cm tief	32	32,3	32,3	32,1	32,3	34,6	32,5	31,3
28									
29	Mittelwerte Parzellen 6-10:								
30	5cm:	20,76	29	25,76	27,3	33,2	33,28	24,26	20,42
31	15cm:	20,5	28,4	28,98	23,58	28,22	34,38	24,36	18,62
32	30cm:	23,74	26,56	26,44	25,52	26,34	35,84	29,78	26,26
33	55cm:	26,88	27,54	27,66	27,52	27,96	31,54	29,32	27,54
34									
35	Mittel 0-30cm		28,0	27,1	25,5	29,3	34,5	26,1	21,8
36	Mittel 0-55cm		27,9	27,2	26,0	28,9	33,8	26,9	23,2
37									
38	Standardabweichung Parzellen 6-10:								
39	5cm:	3,10	3,09	4,97	3,52	4,05	4,58	3,80	3,11
40	15cm:	2,49	3,25	2,83	1,88	4,52	1,75	3,36	3,14
41	30cm:	6,08	7,78	7,68	7,18	7,57	7,17	5,91	4,20
42	55cm:	5,80	5,20	5,19	5,17	5,12	3,30	3,18	3,28

1	Datum:	14. Jul.	20. Jul.	28. Jul.	03. Aug.	06. Aug.	10. Aug.	15. Aug.	18. Aug.	25. Aug.
2	Wassergehalt in Vol.%, unbewässertes Feld									
3	Parzelle 6:									
4	5cm tief	30,3	39,9	22,1	40,9	33,8	25,2	23,6	32	29,4
5	15cm tief	35,8	37,1	26,2	34,9	36,1	30,2	28,8	29,7	30,6
6	30cm tief	36,3	39,9	35,6	31,2	32,5	32,4	31,3	32	36
7	55cm tief	29	30,6	31,2	40,1	38,1	34,8	24,4	24,2	26,8
8	Parzelle 7:									
9	5cm tief	30,2	36,8	18,4	37,9	33,6	25,1	22,8	32,3	27,5
10	15cm tief	25,7	35,9	25	33,6	38,1	27,7	24,7	23,2	30,1
11	30cm tief	36,4	39,3	35	45,5	38,3	34	30,3	31,3	34,5
12	55cm tief	26,3	33,4	30,6	35,7	34,1	30,6	28	27,5	27,3
13	Parzelle 8:									
14	5cm tief	29,9	36,7	26,3	38,2	34,3	23,2	21,7	30,2	24
15	15cm tief	33,7	37,8	33,4	28,8	17,3	28	22,4	30,7	35,8
16	30cm tief	26,9	37,1	31,8	28,4	28,1	28,2	28,4	28,2	27,9
17	55cm tief	25	30,7	28,6	26,5	26,2	25,9	25,6	25,5	25,2
18	Parzelle 9:									
19	5cm tief	25,6	31,2	21,8	40,1	30,6	22,5	22,8	27,7	24,5
20	15cm tief	34,2	34,1	28	38,7	34,8	24,2	25,6	34,8	22,8
21	30cm tief	29,9	39,3	34,3	39,5	39,4	34,4	32,4	31,1	28,1
22	55cm tief	22,7	22,6	23	23	22,9	23	23,3	23,3	23,2
23	Parzelle 10:									
24	5cm tief	26,1	32,5	23,6	40,4	34,3	31,5	24	35,6	27
25	15cm tief	35,4	39,9	28,6	36,9	35	29,4	28,2	40,5	34,2
26	30cm tief	39,3	40,1	34,6	20,5	39,6	34,7	34	33,7	38,6
27	55cm tief	33,8	35,4	33,6	38,2	35,1	34,1	33,8	33,6	25
28										
29	Mittelwerte Parzellen 6-10:									
30	5cm:	28,42	35,42	22,44	39,5	33,32	25,5	22,98	31,56	26,48
31	15cm:	32,96	36,96	28,24	34,58	32,26	27,9	25,94	31,78	30,7
32	30cm:	33,76	39,14	34,26	33,02	35,58	32,74	31,28	31,26	33,02
33	55cm:	27,36	30,54	29,4	32,7	31,28	29,68	27,02	26,82	25,5
34										
35	Mittel 0-30cm	31,7	37,2	28,3	35,7	33,7	28,7	26,7	31,5	30,1
36	Mittel 0-55cm	30,6	35,5	28,6	35,0	33,1	29,0	26,8	30,4	28,9
37										
38	Standardabweichung Parzellen 6-10:									
39	5cm:	2,36	3,53	2,88	1,36	1,55	3,55	0,88	2,91	2,23
40	15cm:	4,15	2,16	3,22	3,77	8,46	2,31	2,62	6,41	5,03
41	30cm:	5,15	1,19	1,46	9,74	5,09	2,69	2,12	1,99	4,81
42	55cm:	4,26	4,87	4,00	7,53	6,42	5,14	4,17	4,11	1,62

1	Datum:	31. Aug.	07. Sept.	14. Sept.	21. Sept.	28. Sept.	05. Okt.	12. Okt.	19. Okt.
2	Wassergehalt in Vol.%, unbewässertes Feld								
3	Parzelle 6:								
4	5cm tief	27,4	38,7	32,2	27,2	42,3	35,6	37,5	39,6
5	15cm tief	27,1	39	26,4	27,9	35,8	37	36,3	37,2
6	30cm tief	32,1	38,9	34,7	31,4	39,6	36,8	39,4	38,5
7	55cm tief	24,4	32,3	29,1	25,9	46,8	29,7	28,3	30,7
8	Parzelle 7:								
9	5cm tief	27,9	37,8	23,8	21,9	39,2	30,2	38	38,7
10	15cm tief	18,2	38,2	30,4	21,8	48,1	32,4	35,1	40,5
11	30cm tief	30,5	38,8	34,4	30,7	45	35,4	40,5	37,6
12	55cm tief	26,6	31,6	28,8	25,4	25,9	27,3	25,7	30,7
13	Parzelle 8:								
14	5cm tief	26,2	37,6	29,8	21	38,1	32,8	39,3	39,6
15	15cm tief	22,8	35,9	27,3	24,7	29,5	30,3	38,2	38,4
16	30cm tief	27,4	27,5	27,5	26,8	26,4	26,8	26,6	26,5
17	55cm tief	24,7	24,6	24,4	23,4	23,1	23,2	23,1	22,8
18	Parzelle 9:								
19	5cm tief	28,3	38,8	29,7	20,2	40,7	34,4	34,9	38,5
20	15cm tief	24,4	40	23,5	21,2	37,9	35,2	39	34,1
21	30cm tief	28,4	39,8	35,1	30	39,7	37,6	39,4	39,4
22	55cm tief	23,1	33,4	28	25,2	43,2	29,5	28	30,9
23	Parzelle 10:								
24	5cm tief	30,2	40,5	30,8	27,2	39,7	35,2	34,9	46,3
25	15cm tief	27,9	43,2	33,9	26,2	41,7	32,5	39	42,1
26	30cm tief	35,7	40,6	36,9	34,1	40,5	37,9	39,6	39,5
27	55cm tief	33,3	37,3	34,3	33,6	40	34,4	36,6	34,7
28									
29	Mittelwerte Parzellen 6-10:								
30	5cm:	28	38,68	29,26	23,5	40	33,64	36,92	40,54
31	15cm:	24,08	39,26	28,3	24,36	38,6	33,48	37,52	38,46
32	30cm:	30,82	37,12	33,72	30,6	38,24	34,9	37,1	36,3
33	55cm:	26,42	31,84	28,92	26,7	35,8	28,82	28,34	29,96
34									
35	Mittel 0-30cm	27,6	38,4	30,4	26,2	38,9	34,0	37,2	38,4
36	Mittel 0-55cm	27,3	36,7	30,1	26,3	38,2	32,7	35,0	36,3
37									
38	Standardabweichung Parzellen 6-10:								
39	5cm:	1,46	1,15	3,21	3,43	1,59	2,20	1,96	3,26
40	15cm:	3,87	2,67	3,98	2,85	6,91	2,63	1,75	3,08
41	30cm:	3,28	5,43	3,61	2,63	6,98	4,63	5,89	5,53
42	55cm:	4,04	4,61	3,54	3,97	10,64	4,07	5,07	4,35

10.7 Volumetrischer Wassergehalt – statistische Auswertung

<i>Gesamte Schicht</i>	Modell	M	SD	Block- effekt	df	F- Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
18. Mai neu_bew.	2-fakt. ANOVA	201,9	19,0	10,7 %	5,3	7,17	,068
18. Mai neu_unbew.		176,0	16,3				
19. Mai neu_morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	217,4	16,3		1,7	14,39	,007
19. Mai neu_morgens_unbew.		176,0	16,3				
19. Mai neu_mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	211,1	18,7		1,7	8,75	,021
19. Mai neu_mittags_unbew.		176,0	16,3				
19. Mai neu nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	214,9	11,7		1,7	17,64	,004
19. Mai neu nachmittags_unbew.		176,0	16,3				
27. Mai neu_bew.	2-fakt. ANOVA	229,7	18,6	6,6 %	5,3	10,12	,043
27. Mai neu_unbew.		197,6	26,9				
28. Mai neu_bew.	1-fakt. ANOVA	224,3	16,3		1,7	4,58	,070
28. Mai neu_unbew.		195,7	23,9				
2. Juni neu_bew.	1-fakt. ANOVA	220,9	15,5		1,7	6,94	,034
2. Juni neu_unbew.		188,8	21,2				
8. Juni neu_bew.	1-fakt. ANOVA	228,1	19,4		1,7	3,32	,111
8. Juni neu_unbew.		202,2	23,3				
23. Juni neu_bew.	2-fakt. ANOVA	240,1	18,9	4,0 %	5,3	9,01	,050
23. Juni neu_unbew.		232,8	21,1				
2. Juli neu_bew.	1-fakt. ANOVA	199,4	8,9		1,7	0,81	,397
2. Juli neu_unbew.		190,6	17,7				
8. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	184,3	18,1		1,8	1,42	,268
8. Juli_unbew.		170,1	19,6				

14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	229,6	19,7		1,8	3,48	,100
14. Juli_unbew.		205,2	21,6				
20. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	250,8	15,0		1,8	1,78	,219
20. Juli_unbew.		234,6	22,6				
28. Juli neu_bew.	1-fakt. ANOVA	214,0	12,7		1,7	1,44	,300
28. Juli neu_unbew.		203,2	13,9				
3. August_bew.	1-fakt. ANOVA	256,4	31,4		1,8	2,14	,182
3. August_unbew.		230,3	24,6				
6. August neu_bew.	1-fakt. ANOVA	243,7	14,8		1,7	0,71	,427
6. August neu_unbew.		233,5	21,7				
10. August_bew.	1-fakt. ANOVA	216,0	16,2		1,8	1,23	,299
10. August_unbew.		203,1	20,2				
12. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	230,3	29,8		1,8	2,85	,130
12. Aug. morgens_unbew.		203,1	20,2				
12. Aug. mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	230,5	27,7		1,8	3,18	,112
12. Aug. mittags_unbew.		203,1	20,2				
12. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	229,9	28,3		1,8	2,98	,123
12. Aug. nachmittags_unbew.		203,1	20,2				
13. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	220,8	15,2		1,8	2,45	,156
13. Aug. morgens_unbew.		203,1	20,2				
13. Aug. mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	219,4	14,9		1,8	2,09	,186
13. Aug. mittags_unbew.		203,1	20,2				
13. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	220,3	14,9		1,8	2,33	,165

13. Aug. nachmittags_unbew.		203,1	20,2				
15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	217,0	13,9		1,8	6,62	,033
15. Aug. morgens_unbew.		188,1	21,0				
15. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	219,1	15,3		1,8	7,10	,029
15. Aug. nachmittags_unbew.		188,1	21,0				
18. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	232,7	17,1		1,8	4,97	,056
18. Aug._unbew.		200,2	27,7				
25. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	228,8	19,2		1,8	9,27	,016
25. Aug._unbew.		194,1	16,8				
31. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	209,6	18,6		1,8	2,5	,150
31. Aug._unbew.		187,8	24,5				
7. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	264,8	24,1		1,8	1,97	,198
7. Sept._unbew.		240,2	30,9				
14. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	220,1	18,1		1,8	1,21	,304
14. Sept._unbew.		205,6	23,2				
21. Sept. neu_bew.	2-fakt. ANOVA	216,9	16,4	7,3 %	5,3	10,82	,039
21. Sept. neu_unbew.		183,9	22,1				
28. Sept. neu_2_bew.	1-fakt. ANOVA	265,2	22,8		1,6	0,21	,663
28. Sept. neu_2_unbew.		253,7	45,0				
5. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	233,1	16,7		1,8	1,58	,244
5. Okt._unbew.		216,5	24,2				
12. Okt. neu_bew.	1-fakt. ANOVA	240,4	22,8		1,7	0,69	,433
12. Okt. neu_unbew.		226,4	26,4				
19. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	249,2	15,9		1,8	1,04	,338
19. Okt._unbew.		233,8	29,8				

Obere Schicht	Modell	M	SD	Blockeffekt	df	F-Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
18. Mai neu_bew.	2-fakt. ANOVA	116,9	12,2	8,9 %	5,3	14,19	,027
18. Mai neu_unbew.		92,8	6,6				
19. Mai morgens neu_bew.	2-fakt. ANOVA	128,6	8,4	5,9 %	5,3	62,47	,003
19. Mai morgens neu_unbew.		92,7	6,6				
19. Mai mittags neu_bew.	2-fakt. ANOVA	122,1	10,3	8,7 %	5,3	23,28	,013
19. Mai mittags neu_unbew.		92,7	6,6				
19. Mai nachmittags neu_bew.	2-fakt. ANOVA	125,8	4,7	7,7 %	5,3	70,95	,003
19. Mai nachmittags neu_unbew.		92,7	6,6				
27. Mai neu_bew.	2-fakt. ANOVA	137,4	13,5	2,9 %	5,3	19,57	,017
27. Mai neu_unbew.		116,4	14,1				
28. Mai neu_bew.	2-fakt. ANOVA	132,3	9,9	2,2 %	5,3	27,19	,011
28. Mai neu_unbew.		112,5	13,2				
2. Juni neu_bew.	1-fakt. ANOVA	130,1	11,1		1,7	10,02	,016
2. Juni neu_unbew.		107,7	9,8				
8. Juni neu_bew.	2-fakt. ANOVA	137,5	16,0	10,8 %	5,3	6,10	,084
8. Juni neu_unbew.		121,4	9,4				
23. Juni neu_bew.	1-fakt. ANOVA	145,4	13,9		1,7	0,01	,942
23. Juni neu_unbew.		145,9	4,9				
2. Juli neu_bew.	1-fakt. ANOVA	113,1	8,0		1,7	0,32	,592
2. Juli neu_unbew.		108,2	15,7				
8. Juli_bew.	2-fakt. ANOVA	99,6	12,3	5,9 %	5,4	5,33	,066
8. Juli_unbew.		91,6	13,4				

14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	134,9	16,1		1,8	0,48	,511
14. Juli_unbew.		128,9	10,5				
20. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	151,5	11,6		1,8	0,03	,882
20. Juli_unbew.		150,7	4,8				
28. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	116,7	11,2		1,8	0,25	,634
28. Juli_unbew.		119,2	3,8				
3. August_bew.	1-fakt. ANOVA	148,2	13,4		1,8	0,57	,474
3. August_unbew.		140,2	19,8				
6. August neu_bew.	1-fakt. ANOVA	144,4	12,2		1,7	0,01	,957
6. August neu_unbew.		144,0	6,4				
10. August_bew.	1-fakt. ANOVA	122,9	14,2		1,8	0,31	,596
10. August_unbew.		118,9	8,3				
12. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	124,7	12,9		1,8	0,72	,423
12. Aug. morgens_unbew.		118,9	8,3				
12. Aug. mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	124,8	10,6		1,8	0,98	,354
12. Aug. mittags_unbew.		118,9	8,3				
12. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	124,3	10,9		1,8	0,79	,402
12. Aug. nachmittags_unbew.		118,9	8,3				
13. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	126,4	10,8		1,8	1,54	,251
13. Aug. morgens_unbew.		118,9	8,3				
13. Aug. mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	125,3	10,8		1,8	1,11	,325
13. Aug. mittags_unbew.		118,9	8,3				
13. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	126,5	11,0		1,8	1,54	,251

13. Aug. nachmittags_unbew.		118,9	8,3				
15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	124,0	9,3		1,8	5,62	,046
15. Aug. morgens_unbew.		111,5	7,4				
15. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	126,1	10,6		1,8	6,44	,035
15. Aug. nachmittags_unbew.		111,5	7,3				
18. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	139,5	12,6		1,8	3,46	,100
18. Aug._unbew.		125,9	10,6				
25. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	135,3	15,0		1,8	1,76	,222
25. Aug._unbew.		123,2	13,9				
31. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	119,4	13,9		1,8	0,54	,485
31. Aug._unbew.		113,7	10,5				
7. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	155,2	12,0		1,8	0,14	,723
7. Sept._unbew.		152,2	13,9				
14. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	128,2	13,9		1,8	0,18	,682
14. Sept._unbew.		125,0	9,5				
21. Sept. neu_bew.	1-fakt. ANOVA	118,1	3,8		1,7	2,79	,139
21. Sept. neu_unbew.		109,1	10,1				
28. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	156,9	8,1		1,8	0,04	,858
28. Sept._unbew.		155,1	21,0				
5. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	140,5	13,9		1,8	0,19	,678
5. Okt._unbew.		136,9	12,4				
12. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	149,7	14,8		1,8	0,02	,896
12. Okt._unbew.		148,6	10,1				
19. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	153,5	11,0		1,8	0,07	,806
19. Okt._unbew.		151,6	13,2				

Untere Schicht	Modell	M	SD	Blockeffekt	df	F-Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
18. Mai_bew.*	2-fakt. ANOVA	85,0	10,6	19,3 %	5,4	2,13	0,242
18. Mai_unbew.		80,6	17,4				
19. Mai morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	88,8	10,3		1,8	0,81	0,394
19. Mai morgens_unbew.		80,6	17,4				
19. Mai mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	89,0	9,8		1,8	0,88	0,375
19. Mai mittags_unbew.		80,6	17,4				
19. Mai nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	89,2	9,8		1,8	0,91	0,369
19. Mai nachmittags_unbew.		80,6	17,4				
27. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	92,2	9,5		1,8	1,38	0,274
27. Mai_unbew.		82,6	15,6				
28. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	92,1	9,4		1,8	1,24	0,298
28. Mai_unbew.		83,0	15,6				
2. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	90,9	9,4		1,8	1,05	0,337
2. Juni_unbew.		82,6	15,5				
8. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	90,6	9,5		1,8	0,70	0,429
8. Juni_unbew.		83,9	15,4				
23. Juni_bew.	2-fakt. ANOVA	94,7	9,2	4,0 %	5,4	5,88	0,056
23. Juni_unbew.		94,6	9,9				
2. Juli_bew.*	2-fakt. ANOVA	89,6	10,3	18,7 %	5,4	2,13	0,243
2. Juli_unbew.		88,0	9,5				
8. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	84,7	12,9		1,8	0,08	0,786
8. Juli_unbew.		82,6	9,8				
14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	94,8	7,9		1,8	3,59	0,096

14. Juli_unbew.		82,1	12,8				
20. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	99,3	5,5		1,8	1,20	0,307
20. Juli_unbew.		91,6	14,6				
28. Juli neu_bew.	1-fakt. ANOVA	95,3	6,0		1,7	1,14	0,322
28. Juli neu_unbew.		88,2	12,0				
3. August_bew.	1-fakt. ANOVA	108,3	19,2		1,8	0,59	0,466
3. August_unbew.		98,1	22,6				
6. August_bew.	1-fakt. ANOVA	99,4	7,7		1,8	0,36	0,568
6. August_unbew.		93,8	19,3				
10. August_bew.	1-fakt. ANOVA	93,1	5,5		1,8	0,31	0,598
10. August_unbew.		89,1	15,4				
12. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	105,6	25,5		1,8	1,55	0,249
12. Aug. morgens_unbew.		89,1	15,5				
12. Aug. mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	105,7	25,3		1,8	1,58	0,245
12. Aug. mittags_unbew.		89,1	15,5				
12. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	105,7	25,5		1,8	1,57	0,247
12. Aug. nachmittags_unbew.		89,1	15,5				
15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	93,1	5,6		1,8	3,83	0,087
15. Aug. morgens_unbew.		81,1	12,5				
15. Aug. nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	92,9	5,7		1,8	3,72	0,090
15. Aug. nachmittags_unbew.		81,1	12,5				
18. August_bew.	1-fakt. ANOVA	93,2	5,5		1,8	4,44	0,069
18. August_unbew.		80,5	12,4				
25. August_bew.	1-fakt. ANOVA	93,5	7,1		1,8	19,61	0,003

25. August_unbew.		76,5	4,9				
31. August_bew.	1-fakt. ANOVA	90,3	6,4		1,8	3,22	0,111
31. August_unbew.		79,3	12,2				
7. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	109,6	15,8		1,8	2,26	0,172
7. Sept._unbew.		95,5	13,8				
14. Sept._bew.	1-fakt. ANOVA	91,9	6,1		1,8	0,87	0,379
14. Sept._unbew.		86,8	10,6				
21. Sept._bew.	2-fakt. ANOVA	95,1	18,3	3,4 %	5,4	8,70	0,029
21. Sept._unbew.		80,1	11,9				
28. Sept. neu_2_bew.	2-fakt. ANOVA	110,4	19,1	10,6 %	5,2	7,48	0,123
28. Sept. neu_2_unbew.		99,2	30,1				
5. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	92,6	5,9		1,8	1,02	0,343
5. Okt._unbew.		86,5	12,3				
12. Okt. Neu_bew.	1-fakt. ANOVA	93,8	10,0		1,7	0,97	0,358
12. Okt. Neu_unbew.		85,1	15,3				
19. Okt._bew.	1-fakt. ANOVA	95,7	7,1		1,8	0,78	0,406
19. Okt._unbew.		89,9	13,1				

* p-Wert bei 1-fakt. ANOVA deutlich schlechter!

<i>Schicht 1</i>	Modell	<i>M</i>	<i>SD</i>	Block- effekt	<i>df</i>	<i>F- Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
18. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	29,3	4,5		1,8	12,27	,009
18. Mai_unbew.		20,8	3,2				
19. Mai morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	29,8	3,3		1,8	20,27	,002
19. Mai morgens_unbew.		20,8	3,2				

19. Mai mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	29,0	4,4		1,8	11,87	,009
19. Mai mittags_unbew.		20,8	3,2				
19. Mai nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	29,2	4,4		1,8	12,41	,008
19. Mai nachmittags_unbew.		20,8	3,2				
27. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	31,3	4,2		1,8	0,94	,362
27. Mai_unbew.		29,1	3,1				
28. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	29,8	3,0		1,8	2,41	,160
28. Mai_unbew.		25,8	5,0				
2. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	30,1	3,5		1,8	1,54	,251
2. Juni_unbew.		27,3	3,6				
8. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	34,0	4,3		1,8	0,09	,774
8. Juni_unbew.		33,3	4,1				
2. Juli_bew._neu	1-fakt. ANOVA	28,6	4,7		1,7	2,31	,174
2. Juli_unbew._neu		24,3	3,8				
8. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	23,6	6,4		1,8	0,99	,390
8. Juli_unbew.		20,4	3,2				
14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	30,8	3,2		1,8	1,90	,206
14. Juli_unbew.		28,4	2,4				
6. August_bew.	1-fakt. ANOVA	34,1	2,2		1,8	0,90	,547
6. August_unbew.		33,3	1,6				
10. August_bew.	1-fakt. ANOVA	26,5	4,2		1,8	0,19	,683
10. August_unbew.		25,5	3,6				
12. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	23,2	3,3		1,8	1,18	,310
12. Aug. morgens_unbew.		25,5	3,6				
15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	25,5	3,5		1,8	2,57	,149

15. Aug. morgens_unbew.		23,0	0,9				
18. August_bew.	1-fakt. ANOVA	35,3	2,6		1,8	4,69	,063
18. August_unbew.		31,6	3,0				

<i>Schicht 2</i>	Modell	<i>M</i>	<i>SD</i>	Block- effekt	<i>df</i>	<i>F- Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
18. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	28,4	3,3		1,8	18,33	,003
18. Mai_unbew.		20,6	2,5				
19. Mai morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	27,9	2,6		1,8	21,12	0,002
19. Mai morgens_unbew.		20,6	2,5				
19. Mai mittags_bew.	1-fakt. ANOVA	23,5	2,6		1,8	3,46	,101
19. Mai mittags_unbew.		20,6	2,5				
19. Mai nachmittags_bew.	1-fakt. ANOVA	26,0	4,4		1,8	5,89	,045
19. Mai nachmittags_unbew.		20,6	2,5				
27. Mai_bew.	2-fakt. ANOVA	33,9	4,0	1,5 %	5,4	18,67	0,008
27. Mai_unbew.		28,5	3,3				
28. Mai_bew.	1-fakt. ANOVA	31,2	4,0		1,8	0,99	,351
28. Mai_unbew.		29,0	2,9				
2. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	32,2	2,0		1,8	50,82	,001
2. Juni_unbew.		23,6	1,9				
8. Juni_bew.	1-fakt. ANOVA	34,0	2,5		1,8	6,27	,037
8. Juni_unbew.		28,3	4,6				
23. Juni_bew.	2-fakt. ANOVA	35,5	1,1	4,7 %	5,4	6,30	,049
23. Juni_unbew.		34,4	1,8				

2. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	28,5	3,2		1,8	4,00	,081
2. Juli_unbew.		24,4	3,4				
8. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	21,5	1,3		1,8	3,58	,096
8. Juli_unbew.		18,7	3,2				
14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	33,2	0,6		1,8	0,02	,910
14. Juli_unbew.		33,0	4,2				
6. Aug._bew._neu	1-fakt. ANOVA	33,3	5,9		1,7	0,82	,398
6. Aug._unbew._neu		36,1	1,6				
10. Aug._bew.	1-fakt. ANOVA	30,3	2,6		1,8	2,29	,170
10. Aug._unbew.		27,9	2,4				
12. Aug. morgens_bew.	2-fakt. ANOVA	28,5	3,0	10,5 %	5,4	3,25	,139
12. Aug. morgens_unbew.		27,9	2,4				
15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	30,3	3,8		1,8	4,54	,066
15. Aug. morgens_unbew.		26,0	2,7				
18. August_bew.	2-fakt. ANOVA	30,6	6,3	8,7 %	5,4	3,68	,116
18. August_unbew.		31,8	6,5				

Schicht 3	Modell	M	SD	Block- effekt	df	F- Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
18. Mai_bew._neu	2-fakt. ANOVA	59,3	8,1	1,1 %	5,4	28,36	,010
18. Mai_unbew._neu		52,4	6,6				
19. Mai morgens_bew._neu	1-fakt. ANOVA	71,0	7,3		1,7	15,89	,006
19. Mai morgens_unbew._neu		52,4	6,6				
19. Mai mittags_bew._neu	1-fakt. ANOVA	69,7	9,5		1,7	9,56	,018

19. Mai mittags_unbew._neu		52,4	6,6				
19. Mai nachmittags_bew._neu	1-fakt. ANOVA	70,8	6,7		1,7	17,42	,005
19. Mai nachmittags_unbew._neu		52,4	6,6				
27. Mai_bew._neu	1-fakt. ANOVA	72,4	7,0		1,7	5,91	,046
27. Mai_unbew._neu		59,1	9,7				
28. Mai_bew._neu	1-fakt. ANOVA	71,5	6,5		1,7	5,77	,048
28. Mai_unbew._neu		58,8	9,5				
2. Juni_bew._neu	1-fakt. ANOVA	68,0	6,4		1,7	5,28	,056
2. Juni_unbew._neu		56,6	8,6				
8. Juni_bew._neu	2-fakt. ANOVA	69,6	10, 9	6,9 %	5,4	8,26	,057
8. Juni_unbew._neu		58,8	8,0				
2. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	59,6	6,3		1,8	0,00	1,000
2. Juli_unbew.		59,6	11, 9				
8. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	54,7	7,7		1,8	0,17	,694
8. Juli_unbew.		52,6	8,4				
14. Juli_bew.	1-fakt. ANOVA	70,9	13, 4		1,8	0,19	,676
14. Juli_unbew.		67,6	10, 3				
6. August_bew.	1-fakt. ANOVA	77,1	7,5		1,8	1,09	,329
6. August_unbew.		71,2	10, 2				
10. August_bew.	1-fakt. ANOVA	66,3	8,3		1,8	0,03	,874
10. August_unbew.		65,5	5,4				
12. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	73,1	8,1		1,8	3,05	,120
12. Aug. morgens_unbew.		65,5	5,4				

15. Aug. morgens_bew.	1-fakt. ANOVA	68,2	6,5		1,8	2,62	,145
15. Aug. morgens_unbew.		62,6	4,3				
18. August_bew.	1-fakt. ANOVA	73,7	6,6		1,8	10,56	,012
18. August_unbew.		62,6	4,0				
25. August_bew.	1-fakt. ANOVA	71,1	10, 4		1,8	0,62	,456
25. August_unbew.		66,1	9,7				

10.8 Gravimetrischer Wassergehalt – statistische Auswertung

1. Schnitt	Modell	<i>M</i>	<i>SD</i>	Block- effekt	<i>df</i>	<i>F- Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	2-fakt. ANOVA	12,7	1,7	0,08 %	5,4	52,53	,001
Schicht 1_unbew.		11,8	1,6				
Schicht 2_bew.	2-fakt. ANOVA	15,1	1,4	8,1 %	5,4	6,27	,049
Schicht 2_unbew.		13,3	1,4				
Schicht 3_bew.	2-fakt. ANOVA	35,1	2,7	8,8 %	5,4	4,82	,076
Schicht 3_unbew.		32,7	2,2				
Schicht 4 / Untere Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	58,3	3,2		1,8	20,93	,002
Schicht 4 / Untere Schicht_unbew.		49,7	2,7				
Obere Schicht_bew.	2-fakt. ANOVA	62,9	5,2	0,5 %	5,4	23,44	,005
Obere Schicht_unbew.		57,8	5,0				
Gesamte Schicht_bew.	2-fakt. ANOVA	121,2	3,8	10,2 %	5,4	16,89	,009
Gesamte Schicht_unbew.		107,6	4,5				

2. Schnitt	Modell	M	SD	Block- effekt	df	F- Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	1-fakt. ANOVA	16,1	2,2		1,8	0,45	,522
Schicht 1_unbew.		16,8	0,9				
Schicht 2_bew.	1-fakt. ANOVA	17,3	2,3		1,8	1,87	,209
Schicht 2_unbew.		18,8	0,9				
Schicht 3_bew.	2-fakt. ANOVA	38,9	6,3	1,9 %	5,4	11,93	,016
Schicht 3_unbew.		43,8	3,6				
Schicht 4 / Untere Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	59,7	7,1		1,8	0,03	,863
Schicht 4 / Untere Schicht_unbew.		59,1	3,0				
Obere Schicht_bew.	2-fakt. ANOVA	72,2	10,5	8,8 %	5,4	4,75	,079
Obere Schicht_unbew.		79,4	3,8				
Gesamte Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	131,9	17,1		1,8	0,67	,436
Gesamte Schicht_unbew.		138,5	5,3				

3. Schnitt	Modell	M	SD	Block- effekt	df	F- Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	1-fakt. ANOVA	24,3	1,7		1,8	0,51	,499
Schicht 1_unbew.		24,9	0,6				
Schicht 2_bew.	1-fakt. ANOVA	21,3	1,8		1,8	2,38	,162
Schicht 2_unbew.		22,6	0,4				

Schicht 3_bew.	1-fakt. ANOVA	41,0	3,2		1,8	0,93	,364
Schicht 3_unbew.		42,4	0,6				
Schicht 4 / Untere Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	65,1	7,1		1,8	0,22	,652
Schicht 4 / Untere Schicht_unbew.		63,5	2,3				
Obere Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	86,6	5,6		1,8	1,64	,236
Obere Schicht_unbew.		89,8	0,4				
Gesamte Schicht_bew.	1-fakt. ANOVA	151,7	12,2		1,8	0,09	,775
Gesamte Schicht_unbew.		153,3	2,3				

10.9 Messergebnisse P_{CAL}

	1. Schnitt	2. Schnitt	3. Schnitt
Parzelle 1	P in mg kg⁻¹ Boden		
0-10 cm	4,72	4,54	3,07
10-20 cm	2,84	2,79	0,10
20-40 cm	0,58	2,42	-
40-70 cm	4,16	2,76	0,05
Parzelle 2			
0-10 cm	4,06	1,67	2,32
10-20 cm	1,74	0,00	-
20-40 cm	-	-	-
40-70 cm	4,06	0,00	-
Parzelle 3			
0-10 cm	4,91	5,90	2,83
10-20 cm	6,64	1,29	0,56
20-40 cm	-	1,86	-
40-70 cm	-	4,44	-

Parzelle 4			
0-10 cm	7,86	0,93	3,76
10-20 cm	6,29	1,98	2,04
20-40 cm	2,69	-	-
40-70 cm	5,82	-	-
Parzelle 5			
0-10 cm	6,62	1,56	2,96
10-20 cm	5,42	0,00	-
20-40 cm	0,38	-	-
40-70 cm	1,43	1,21	-
Parzelle 6			
0-10 cm	7,11	6,80	3,30
10-20 cm	4,22	1,50	-
20-40 cm	8,19	0,60	-
40-70 cm	20,81	4,30	-
Parzelle 7			
0-10 cm	26,89	5,86	1,31
10-20 cm	6,12	2,32	-
20-40 cm	15,61	-	-
40-70 cm	5,25	1,18	-
Parzelle 8			
0-10 cm	4,19	3,56	0,43
10-20 cm	2,69	0,46	-
20-40 cm	-	-	-
40-70 cm	0,43	-	-
Parzelle 9			
0-10 cm	5,76	4,67	0,61
10-20 cm	3,36	2,50	-
20-40 cm	0,00	-	-
40-70 cm	0,78	1,04	-
Parzelle 10			
0-10 cm	6,36	4,18	-
10-20 cm	6,72	0,35	1,49
20-40 cm	0,47	-	-
40-70 cm	2,13	-	-

10.10 P_{CAL} – statistische Auswertung

1. Schnitt, 1-faktorielle ANOVA

Parameter	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	5	5,6	1,6	1,8	1,06	,332
Schicht 1_unbew.	5	10,1	9,5			
Schicht 2_bew.	5	4,6	2,2	1,8	0,001	,978
Schicht 2_unbew.	5	4,6	1,7			
Schicht 3_bew.	3					
Schicht 3_unbew.	4					
Schicht 4_bew.	4	3,9	1,8	1,7	0,21	,662
Schicht 4_unbew.	5	5,9	8,6			

2. Schnitt, 1-faktorielle ANOVA

Parameter	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	5	2,9	2,2	1,8	3,41	,102
Schicht 1_unbew.	5	5,1	1,3			
Schicht 2_bew.	5	1,2	1,2	1,8	0,10	,771
Schicht 2_unbew.	5	1,4	1,1			
Schicht 3_bew.	2					
Schicht 3_unbew.	1					
Schicht 4_bew.	4					
Schicht 4_unbew.	3					

3. Schnitt, 1-faktorielle ANOVA

Parameter	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	5	2,9	0,5	1,7	6,17	,042
Schicht 1_unbew.	4	1,4	1,3			
-> Residuenplot grenzwertig, aber Residuenplot der logarithmierten Daten noch schlechter!						
Schicht 2_bew.	3					
Schicht 2_unbew.	1					
Schicht 3_bew.	0					
Schicht 3_unbew.	0					
Schicht 4_bew.	1					
Schicht 4_unbew.	0					

10.11 Messergebnisse N_{\min}

kg ha ⁻¹	Bewässert			Unbewässert		
	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3	Schnitt 1	Schnitt 2	Schnitt 3
	Parzelle 1			Parzelle 6		
0-10 cm	2,68	-	-	0,34	-	-
10-20 cm	1,92	-	-	0,45	-	-
20-40 cm	1,02	1,13	-	0,18	-	-
40-70 cm	5,57	1,66	-	-	-	-
	Parzelle 2			Parzelle 7		
0-10 cm	1,08	-	-	-	-	-
10-20 cm	12,32	-	-	0,32	-	-
20-40 cm	6,88	5,95	-	-	-	-
40-70 cm	6,06	1,72	-	0,51	-	-
	Parzelle 3			Parzelle 8		
0-10 cm	0,91	-	-	0,65	-	-
10-20 cm	1,57	-	-	0,04	-	-
20-40 cm	4,24	1,40	-	-	-	-
40-70 cm	7,55	0,48	-	0,006	-	-
	Parzelle 4			Parzelle 9		
0-10 cm	0,33	-	-	0,56	-	-
10-20 cm	1,93	-	-	-	-	-
20-40 cm	0,44	-	-	-	-	-
40-70 cm	6,10	1,26	-	-	-	-
	Parzelle 5			Parzelle 10		
0-10 cm	-	-	-	1,33	-	-
10-20 cm	-	-	-	0,86	-	-
20-40 cm	0,41	-	-	0,24	-	-
40-70 cm	5,43	-	-	0,24	-	-

10.12 N_{\min} – statistische Auswertung

1. Schnitt, 1-faktorielle ANOVA

Parameter (mg kg ⁻¹)	<i>N</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	4	0,2	0,1	1,6	0,93	,371
Schicht 1_unbew.	4	0,1	0,1			
Schicht 2_bew.	4	0,6	0,7	1,6	2,32	,179
Schicht 2_unbew.	4	0,1	0,1			
Schicht 4_bew.	5	2,9	0,4	1,6	125,74	0,001
Schicht 4_unbew.	3	0,1	0,1			

Schicht 4: beachte ungleicher Stichprobenumfang! 2-faktorielle ANOVA nicht signifikant und Blockeffekt sehr hoch!

1. Schnitt, 1-faktorielle ANOVA

Parameter (kg ha ⁻¹)	N	M	SD	df	F-Wert	p-Wert (Korrigiertes Modell)
Schicht 1_bew.	4	1,2	1,0	1,6	0,93	0,371
Schicht 1_unbew.	4	0,7	0,4			
Schicht 2_bew.	4	4,4	5,3	1,6	2,32	0,179
Schicht 2_unbew.	4	0,4	0,3			
Schicht 4_bew.	5	6,1	0,8	1,6	132,62	0,001
Schicht 4_unbew.	3	0,3	0,3			

Schicht 4: beachte ungleicher Stichprobenumfang! 2-faktorielle ANOVA nicht signifikant und Blockeffekt sehr hoch!

10.13 Ernteerträge der Parzellen

1. Schnitt, 08. Juli 2020

Bewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 1	6,34	1,01	0,46	0,03		1,5
Parz. 2	7,54	1,15	0,62	0,05		1,82
Parz. 3	6,74	1,02	0,57	0,03		1,62
Parz. 4	5,44	0,81	0,45	0,04	0,01	1,31
Parz. 5	7,34	1,04	0,68	0,05	0,01	1,78
Ø	6,68	1,006	0,556	0,04		1,606
SD	0,753	0,110	0,090	0,009		0,187
Unbewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 6	6,24	0,92	0,57	0,02		1,51
Parz. 7	5,24	0,72	0,46	0,02	0,1	1,3
Parz. 8	9,44	1,27	0,96	0,06		2,29
Parz. 9	8,24	1,09	0,87	0,08		2,04
Parz. 10	7,24	1,04	0,69	0,03	0,01	1,77
Ø	7,28	1,008	0,71	0,042		1,782
SD	1,472	0,183	0,185	0,024		0,355

2. Schnitt, 10. August 2020

Bewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 1	8,64	0,86	0,93	0,01		1,8
Parz. 2	8,64	0,78	1,04	0,02		1,84
Parz. 3	8,24	0,64	1,07	0,03		1,74
Parz. 4	6,64	0,61	0,8	0,01	0,01	1,43
Parz. 5	8,64	0,78	1,12	0,02		1,92
Ø	8,16	0,734	0,992	0,018		1,746
SD	0,776	0,094	0,114	0,007		0,168
Unbewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 6	6,94	0,54	1,02	0,04		1,6
Parz. 7	6,74	0,57	0,89	0,04	0,11	1,61
Parz. 8	6,44	0,5	1,05	0,02	0,01	1,58
Parz. 9	7,64	0,59	1,18	0,03		1,8
Parz. 10	6,84	0,56	1,07	0,04	0,01	1,68
Ø	6,92	0,552	1,042	0,034		1,654
SD	0,397	0,031	0,093	0,008		0,080

3. Schnitt, 19. Oktober 2020

Bewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 1	7,74	0,79	0,76	0,15		1,7
Parz. 2	9,04	1,08	0,89	0,09		2,06
Parz. 3	6,34	0,88	0,72	0,08		1,68
Parz. 4	5,84	0,77	0,67	0,07	0,02	1,53
Parz. 5	5,74	0,84	0,63	0,07		1,54
Ø	6,94	0,872	0,734	0,092		1,70
SD	1,420	0,124	0,100	0,033		0,21

Unbewässert:	Frischmasse (kg)	Trockenmasse (kg)				
		Blätter	Stängel	Braune Blätter	Wildtyp	Gesamt
Parz. 6	2,84	0,35	0,34	0,04		0,73
Parz. 7	5,04	0,69	0,57	0,08	0,06	1,4
Parz. 8	3,84	0,62	0,45	0,09	0,005	1,165
Parz. 9	4,34	0,59	0,47	0,13		1,19
Parz. 10	4,04	0,67	0,45	0,05		1,17
Ø	4,02	0,584	0,456	0,078		1,13
SD	0,801	0,137	0,082	0,036		0,24

10.14 Hektar-Erträge – statistische Auswertung

1-faktorielle ANOVA, N=10, Signifikanzniveau bei 0,05

1. Schnitt (dt)	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
FM_bew.	116,3	14,7	1,8	0,53	,489
FM_unbew.	126,8	28,7			
TM Blätter_bew.	17,6	2,2	1,8	0,01	,986
TM Blätter_unbew.	17,6	3,6			
TM br. Blätter_bew.	0,7	0,2	1,8	0,03	,879
TM br. Blätter_unbew.	0,7	0,5			
TM Stängel_bew.	9,7	1,7	1,8	2,25	,172
TM Stängel_unbew.	12,4	3,6			
TM Gesamt_bew.	27,9	3,7	1,8	0,77	,407
TM Gesamt_unbew.	31,1	6,9			

2. Schnitt (dt)	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)	Anmerkung
FM_bew.	4,9	0,2	1,8	7,67	,025	Daten logarithmisch transformiert!
FM_unbew.	4,8	0,1				
TM Blätter_bew.	2,7	0,2	1,8	15,17	,005	Daten logarithmisch transformiert!
TM Blätter_unbew.	2,4	0,1				
TM br. Blätter_bew.	0,3	0,1	1,8	8,53	,019	

TM br. Blätter_unbew.	0,6	0,2				
TM Stängel_bew.	17,3	2,2	1,8	0,46	,517	
TM Stängel_unbew.	18,1	1,8				
TM Gesamt_bew.	30,4	3,3	1,8	0,98	,354	
TM Gesamt_unbew.	28,8	1,6				

3. Schnitt (dt)	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
FM_bew.	120,8	24,8	1,8	16,05	,004
FM_unbew.	69,9	13,9			
TM Blätter_bew.	15,2	2,2	1,8	12,18	,009
TM Blätter_unbew.	10,2	2,4			
TM br. Blätter_bew.	1,6	0,6	1,8	0,41	,539
TM br. Blätter_unbew.	1,4	0,6			
TM Stängel_bew.	12,8	1,7	1,8	23,13	,002
TM Stängel_unbew.	7,9	1,4			
TM Gesamt_bew.	29,7	3,8	1,8	15,39	,005
TM Gesamt_unbew.	19,7	4,3			

10.15 Blatt-Stängel-Verhältnis – statistische Auswertung

1-faktorielle ANOVA, N=10, Signifikanzniveau bei 0,05

1. Schnitt	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>df</i>	<i>F-Wert</i>	<i>p-Wert</i> (Korrigiertes Modell)
Bewässert	1,9	0,2	1,8	10,70	0,011
Unbewässert	1,5	0,1			
2. Schnitt					
Bewässert	0,8	0,1	1,8	10,78	0,011
Unbewässert	0,6	0,1			
3. Schnitt					
Bewässert	1,3	0,1	1,8	1,80	0,217
Unbewässert	1,4	0,2			

10.16 Ergebnisse Ölgehalte Pfefferminze

Volatile oil	1,7	% (vol/m)
Oil components		
Carvon	0,04	%/volatile oil
1,8-Cineol	3,47	%/volatile oil
Isomenthon	3,94	%/volatile oil
Isopulegol	0,13	%/volatile oil
Limonene	0,7	%/volatile oil
Menthol	16,27	%/volatile oil
Menthofuran	1,53	%/volatile oil
Menthon	56,96	%/volatile oil
Menthyacetat	0,5	%/volatile oil
Neomenthol	1,5	%/volatile oil
Piperiton	1,82	%/volatile oil
Pulegon	1,8	%/volatile oil

Abbildung 51: Ölgehalte 1. Schnitt, bewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA

Volatile oil	1,9	% (vol/m)
Oil components		
Carvon	0,03	%/volatile oil
1,8-Cineol	3,35	%/volatile oil
Isomenthon	4,06	%/volatile oil
Isopulegol	0,14	%/volatile oil
Limonene	0,7	%/volatile oil
Menthol	15,36	%/volatile oil
Menthofuran	1,34	%/volatile oil
Menthon	58,14	%/volatile oil
Menthyacetat	0,29	%/volatile oil
Neomenthol	1,83	%/volatile oil
Piperiton	1,72	%/volatile oil
Pulegon	1,36	%/volatile oil

Abbildung 52: Ölgehalte 1. Schnitt, unbewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA

Volatile oil	2,7	% (vol/m)
Oil components		
Carvon	0,17	%/volatile oil
1,8-Cineol	3	%/volatile oil
Isomenthon	4,17	%/volatile oil
Isopulegol	0,12	%/volatile oil
Limonene	0,7	%/volatile oil
Menthol	11,92	%/volatile oil
Menthofuran	4,3	%/volatile oil
Menthon	61,1	%/volatile oil
Menthyacetat	0,5	%/volatile oil
Neomenthol	1,54	%/volatile oil
Piperiton	1,4	%/volatile oil
Pulegon	3,24	%/volatile oil
aw-value	0,430	

Abbildung 53: Ölgehalte 2. Schnitt, bewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA

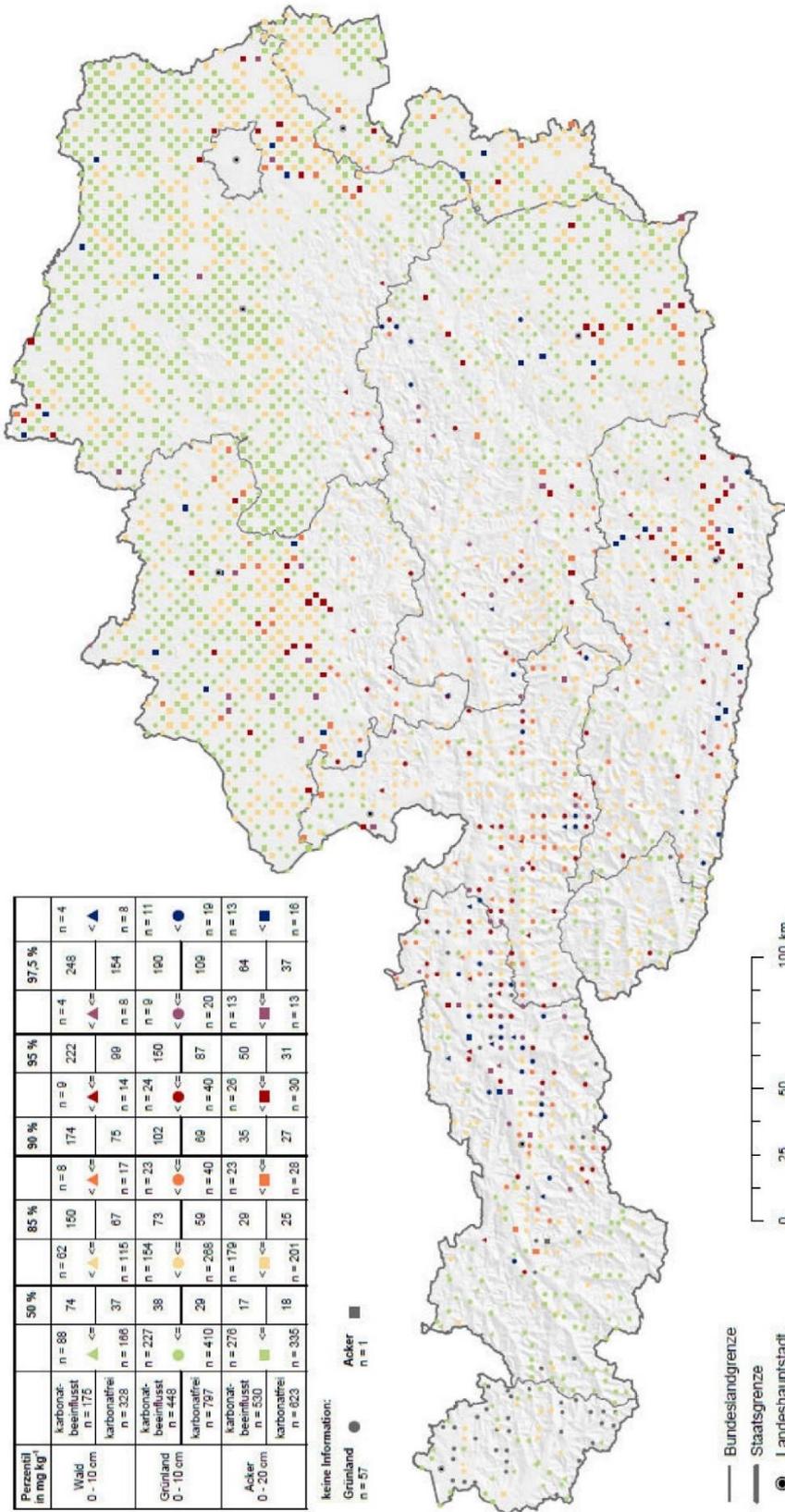
Volatile oil	3,3	% (vol/m)
Oil components		
Carvon	0,15	%/volatile oil
1,8-Cineol	2,85	%/volatile oil
Isomenthon	4,17	%/volatile oil
Isopulegol	0,12	%/volatile oil
Limonene	0,7	%/volatile oil
Menthol	11,17	%/volatile oil
Menthofuran	4,7	%/volatile oil
Menthon	62,68	%/volatile oil
Menthyacetat	0,43	%/volatile oil
Neomenthol	1,58	%/volatile oil
Piperiton	1,43	%/volatile oil
Pulegon	3,39	%/volatile oil
aw-value	0,352	

Abbildung 54: Ölgehalte 2. Schnitt, unbewässerte Variante, Analyse-Ergebnisse GBA

Ölgehalte 3. Schnitt: siehe Einzelanalysen in Kapitel 5.7.4.1

10.17 Bleibelastung im Oberboden Österreichs, Stand 2006

Karte 7: Blei (Pb) im Oberboden (0 - 10 cm bzw. 0 - 20 cm) unter Berücksichtigung der Karbonatbeeinflussung



Quelle: Daten der Bodenzustandsinventur der Bundesländer und der Waldbodenzustandsinventur des BFW aus BORIS GIS-Bearbeitung: Ingrid Roder, Oktober 2006

umweltbundesamt

Abbildung 55: Bleibelastung in Österreichs Oberboden nach (Bodenzustandsinventur des BFW aus BORIS 2006)