

Masterarbeit

Evaluierung von Bewässerungsstrategien für Mais an einem subhumiden Standort im Marchfeld

verfasst von Christian Johannes FALLER, B.Sc.

im Rahmen des Masterstudiums Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, September 2022

Betreut von:

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Reinhard Nolz Institut für Bodenphysik und landeskulturelle Wasserwirtschaft (SoPhy) Department für Wasser-Atmosphäre-Umwelt (WAU)

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere an Eides statt, dass ich diese Masterarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Gedanken, die im Wortlaut oder in grundlegenden Inhalten aus unveröffentlichten Texten oder aus veröffentlichter Literatur übernommen wurden, sind ordnungsgemäß gekennzeichnet, zitiert und mit genauer Quellenangabe versehen.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher weder ganz noch teilweise in gleicher oder ähnlicher Form an einer Bildungseinrichtung als Voraussetzung für den Erwerb eines akademischen Grades eingereicht. Sie entspricht vollumfänglich den Leitlinien der Wissenschaftlichen Integrität und den Richtlinien der Guten Wissenschaftlichen Praxis.

Wien, 09.09.2022

Christian Faller (eigenhändig)

Abbildungen, Tabellen und Grafiken stammen so weit nicht anders vermerkt vom Verfasser und wurden im Zuge dieser Master-Thesis erstellt.

Inhaltsverzeichnis

Ei	desst	attlic	che Erklärung	i
Inl	haltsv	erze	eichnis	ii
Kι	urzfas	sun	g	v
AŁ	ostrac	:t		vi
1	Ein	führı	ung	1
	1.1	Re	elevanz des Themas	1
	1.2	Be	wässerungssteuerung anhand des Bodenwasserstatus	4
	1.3	Zie	elsetzung	5
2	Ma	teria	I und Methoden	7
	2.1	Lite	eraturrecherche	7
	2.2	Ma	ais (Zea mays L.)	7
	2.2	.1	Allgemeines	7
	2.2	.2	Wasseraufnahme durch Wurzeln	10
	2.3	Во	denwasserstatus	10
	2.3	.1	Beziehung zwischen Matrixpotential und Wasseranteil	10
	2.3	.2	Wasserspezifische Bodenkennwerte	13
	2.4	Ve	rsuchsaufbau Obersiebenbrunn	15
	2.4	.1	Bodendaten	18
	2.4	.2	Langjährige Klimadaten	20
	2.4	.3	Messungen am Standort	25
	2	2.4.3	8.1 Pflanzenwasser und Klima	25
	2	2.4.3	8.2 Bodenwasser	25
	2.4	.4	Bewässerungsmethoden	28
	2	2.4.4	.1 Tropfbewässerung	29
	2	2.4.4	.2 Unberegnet	30
	2	2.4.4	.3 Rohrnetzberegnung	30
	2	2.4.4	.4 Auslegerstativ	31

2.5 W	etterdaten für 2021	33
2.6 G	enutzte Software-Programme und deren Anwendung	38
2.6.1	ETo-Calculator	
2.6.2	CropWat	39
2.6.2	2.1 Festlegung von Austrocknungszuständen	40
2.6.2	2.2 Pflanzenparameter	41
2.6.2	2.3 Abschätzung des Wasserbedarfs und des Ertrags	42
2.6.3	Festlegung effektive Wurzelzone	
2.6.4	Hydrus-1D	43
2.6.5	RETC	46
2.6.6	AquaCrop	49
2.7 Ku	Ilturführung und Ernte 2021	52
2.7.1	Ernte Österreich	52
2.7.2	Rohdaten Obersiebenbrunn	53
2.7.3	Erntedaten gemäß LAKO-Bericht	54
3 Ergebr	isse und Diskussion	57
3.1 Er	gebnis der Literaturrecherche zu bestehenden Grenzwerten	57
3.2 Tł	neoretisch zulässiger Grenzwert	63
3.3 Ev	aluierung Feldversuch	63
3.4 Bo	odendaten 2021	66
3.4.1	Matrixpotential	66
3.4.7	1.1 Watermark	66
3.4.7	I.2 MPS-6	72
3.4.2	Bodenwasseranteil	73
3.4.2	2.1 HydraProbe	73
3.4.2	2.2 SM-1	79
3.5 Ev	valuierung der Bewässerungsstrategie	81
3.5.1	CropWat	81
3.5.2	AquaCrop	82

3.6	Evaluierung des Grenzwerts				
3.7	$Empfohlener \ \Psi_{m}$ -Wert	85			
4 Zusa	ammenfassung und Schlussfolgerungen	87			
Literatur	Literaturverzeichnis				
Abkürzungsverzeichnis					
Abbildur	Abbildungsverzeichnis				
Tabellenverzeichnis					
Anhang					
Anhang A					
Anhang B106					
Anhang C 109					
Anhang D110					
Anhar	ng E	112			
Anhar	Anhang F Bodenwasser113				

Kurzfassung

In Folge des Klimawandels wird sich aufgrund steigender Temperaturen und geänderter Niederschlagsverteilungen ein höherer Bewässerungsbedarf im trockenen Osten Österreichs ergeben. Bis 2050 wird mit einer Verdopplung des Wasserbedarfs und einer Ausbreitung der Bewässerungsgebiete in Richtung Westen gerechnet. Einem knapper werdenden Wasserdargebot muss mit einer Erhöhung der Wassernutzungseffizienz, u.a. durch bedarfsorientierte Bewässerungssteuerung, begegnet werden. Eine Möglichkeit ist die Beobachtung des Bodenwasserstatus. Diese Methode bietet den Vorteil, dass sie kontinuierlich möglich ist und im Gegensatz zu rechnerischen Bilanzmodellen den tatsächlichen Zustand im Boden darstellt. Zwei Größen beschreiben den Bodenwasserzustand, zum einen der Wasseranteil und zum anderen das Matrixpotential (Ψ_m). Aus dem Ψ_m lässt sich ableiten, wie fest das Wasser aufgrund von Adhäsions- und Kapillarkräften im Boden gebunden ist. Um dem Boden Wasser zu entziehen, müssen Wurzeln diese Kräfte überwinden. Es kann also ein bestimmtes Ψ_m als Schwellenwert festgelegt werden, ab dem mit Pflanzenwasserstress zu rechnen ist. Daraus kann der Bewässerungszeitpunkt abgeleitet werden. Für Mais an einem Standort im Marchfeld wurde das maximal zulässige Ψ_m , das nicht überschritten werden sollte, um Ertragsverluste zu vermeiden, in 20 cm Bodentiefe bestimmt. Vorab wurde die maximal tolerierbare Austrocknung mit CropWat ermittelt. Mit Hydrus 1D wurden die Ψ_m -Werte ermittelt, die sich in Folge der erlaubten Austrocknung in 20 cm Tiefe einstellen. Hieraus ergab sich, dass ein Ψ_m von 100 kPa nicht überschritten werden darf. Dieser Wert sollte im Feldversuch zur Bewässerungssteuerung herangezogen und im Nachgang mit AquaCrop evaluiert werden. Zur Erfassung des Bodenwasserstatus standen Sensoren, die leider nicht optimal positioniert waren, zur Verfügung. Daher konnte der Grenzwert von 100 kPa im Feld nicht direkt überprüft werden. In der Evaluierung mit AquaCrop erwies er sich aber als korrekt.

Abstract

As a result of climate change, there will be a greater need for irrigation in the dry eastern part of Austria due to rising temperatures and changes in precipitation distribution. By 2050, the water demand is expected to double and the irrigation areas will expand towards the west. A dwindling water supply must be countered with an increase in water use efficiency, among other things through demand-oriented irrigation control. One possibility is to observe the soil water status. This method has the advantage that it can be carried out continuously and, in contrast to calculated balance models, represents the actual condition in the soil. Two quantities describe the soil water status, on the one hand the water content and on the other the matrix potential (Ψ_m) . The Ψ_m indicates how firmly the water is bound in the soil due to adhesion and capillary forces. To extract water from the soil, roots must overcome these forces. A certain Ψ_m can therefore be defined as the threshold value above which plant water stress is to be expected. From this, the irrigation time can be derived. For maize at a site in Marchfeld, the maximum permissible Ψ_m , which should not be exceeded to avoid crop losses, was determined at a soil depth of 20 cm. Beforehand, the maximum tolerable depletion was determined with CropWat. Hydrus 1D was used to determine the Ψ_m values that occur as a result of the permitted drying out at a depth of 20 cm. This showed that a Ψ_m of 100 kPa must not be exceeded. This value was to be used in the field trial for irrigation control and subsequently evaluated with AquaCrop. Sensors, which unfortunately were not optimally positioned, were available to record the soil water status. Therefore, the limit value of 100 kPa could not be checked directly in the field, but it proved to be correct in the evaluation with AquaCrop.

1 Einführung

1.1 Relevanz des Themas

Wasser erfüllt in Bezug auf Pflanzenwachstum mehrere Funktionen. Zum überwiegenden Teil wird es von den Pflanzen transpiriert und die Blattoberflächen gekühlt, um Hitzestress zu vermeiden. Der dadurch entstehende Wasserstrom wird zum Transport von Nährstoffen genutzt. Ferner dient Wasser dem Aufrechterhalten des Turgors (Zellinnendruck), als Quell- und Baustoff sowie für biochemische Reaktionen bei der Photosynthese (Geyer, Jaksch, und Katroschan 2020, 50). Die Aufnahme des für die Photosynthese notwendigen Kohlenstoffdioxids erfolgt durch Spaltöffnungen an den Blättern, den sogenannten Stomata. Zwangsläufig entsteht durch das im Verhältnis zur Pflanze höher negative Wasserpotential der umgebenden Luft eine Wasserabgabe durch die Stomata, sodass Transpiration als direkte Konsequenz der CO₂-Aufnahme zu sehen ist. Bei Wassermangel verlangsamen Pflanzen den Neuzuwachs an Blattmasse und schließen die Spaltöffnungen, um den Wasserverbrauch zu begrenzen (Geyer, Jaksch, und Katroschan 2020, 51). Allerdings verringert sich durch diesen Anpassungsmechanismus auch die Aufnahme von CO₂, was sich in einer gedrosselten Photosyntheseleistung niederschlägt. Die volle Wachstumsleistung ist daher nur bei ausreichender Wasserversorgung möglich. Ab einer gewissen Wasserunterversorgung treten Wachstums- und Ertragsdepressionen auf, wobei das Ausmaß maßgeblich vom Zeitpunkt der Unterversorgung und generell von der Pflanzenart abhängig ist (Doorenbos et al. 1979, 1). Fehlender Niederschlag kann durch Bewässerung ersetzt werden, um Ertrags- und Qualitätseinbußen zu verringern oder zu vermeiden.

Aktuell werden in Jahren mit durchschnittlichen Niederschlägen ca. 69 Mio. m³ Wasser in Österreich zur Bewässerung eingesetzt; rund 64 Mio. m³ davon werden dem Grundwasser entnommen. Dies entspricht 2,3 % des gesamten Wasserverbrauchs Österreichs. In trockenen Jahren kann sich die benötigte Wassermenge jedoch um den Faktor acht erhöhen (Lindinger et al. 2021, 13). Insgesamt werden durchschnittlich nur 1,4 % der gesamten landwirtschaftlich genutzten Fläche bewässert, diese konzentrieren sich allerdings hauptsächlich auf das Marchfeld und das nördliche Burgenland im niederschlagsarmen Osten Österreichs (Lindinger et al. 2021, 109). Da Be-

wässerung nur zeitlich begrenzt während der Vegetationsperiode von März bis September und üblicherweise in Trockenzeiten anfällt, stellt die Verfügbarkeit von ausreichend Wasserressourcen bereits heute eine Herausforderung dar (Lindinger et al. 2021, 203).

Neben einer Temperaturzunahme wird in Folge des Klimawandels mit einer Veränderung der Niederschlagsmuster und einer möglichen Zunahme von Starkniederschlägen gerechnet. Während der Vegetationsperiode im Sommerhalbjahr wird eine Abnahme, im Winterhalbjahr eine leichte Zunahme der Niederschlagsmengen prognostiziert, sodass die Jahresmenge insgesamt nur gering abnimmt (Eitzinger 2007, 2). Für den Zeithorizont bis 2050 wird mit einer Ausbreitung der Bewässerungsgebiete in Richtung Westen und einer Zunahme des Bewässerungsbedarfs auf 115 bis 125 Mio. m³ gerechnet (Lindinger et al. 2021, 14). Unter Umständen kann dieser Bedarf im Osten Österreichs nicht mehr nachhaltig aus den künftig vorhandenen Grundwasserressourcen bedient werden (Lindinger et al. 2021, 331). Allerdings ist landwirtschaftliche Bewässerung nicht ausschließlich abhängig von den meteorologischen und bodenkundlichen Gegebenheiten, sondern vor allem auch von den kulturspezifischen Ansprüchen selbst. Diese können zusätzlichen Bedarf an Bewässerung erfordern. Bewässerungsgebiete müssen daher nicht zwangsweise in Trockengebieten sein (LfU Bayern o. J.). In Kombination mit der temperaturbedingten Zunahme des Verdunstungspotentials werden Pflanzen gerade im Sommerhalbjahr verstärkt Hitzeund Trockenstress ausgesetzt (Eitzinger 2007, 3). Neben der Kultivierung von neuen, trockenheitstoleranteren Pflanzen, Fruchtfolgen und Anbautechniken, die sich positiv auf das pflanzenverfügbare Bodenwasser (z.B. über Humusaufbau) auswirken, wird die Bedeutung landwirtschaftlicher Bewässerung für die Ertragssicherheit zunehmen (Eitzinger 2007, 3).

Eine effiziente Bewässerung versucht das benötigte Wasser möglichst sparsam einzusetzen und orientiert sich daher am tatsächlichen Bedarf der Pflanzen. Des Weiteren leistet sie einen Beitrag, um Bewässerung möglichst wirtschaftlich zu betreiben, da Überbewässerung und damit unnötige Arbeitszeit und Energiekosten vermieden werden. Bisher finden Konzepte zur bedarfsorientierten Bewässerung jedoch kaum Anwendung. In den USA ergaben Umfragen, dass für 76 % der bewässernden Betriebe der "Pflanzenzustand" und für 38 % das "Gefühl" für den Boden zur Bewässerungssteuerung benutzt wurden. Eine tatsächliche Erfassung des Pflanzenzustands bzw. Bodenwasserstatus mit Hilfe von Sensoren findet dabei jedoch nicht statt (Taghvaeian et al. 2020, 1604). In einem langjährigen Projekt in Bayern wurden ähnliche Entscheidungswege dokumentiert. Meist wird der Entschluss, wann und wie viel bewässert wird, von den Anwendern basierend auf Erfahrungswerten und Beobachtungen von Wetter und Pflanze sowie des Bodens (Spaten- bzw. Handproben) getroffen (Hageneder und Beck 2014, 5). Obwohl diese Vorgehensweise von Hageneder und Beck, den Verfassern der bayerischen Studie, als für die meisten Praktiker als zufriedenstellend beschrieben wird, ist es allerdings ein sehr subjektives Verfahren und es besteht die Gefahr von Fehleinschätzungen (Hageneder und Beck 2014, 5). Für Österreich können ähnliche Vorgehensweisen angenommen werden. Durch zu geringe Wassergaben werden die kultivierten Pflanzen ggfs. nicht ausreichend mit Wasser versorgt, was zu Ernteeinbußen führen kann. Wird zu viel Wasser ausgebracht, besteht neben den unnötigen Kosten die Gefahr von Versickerung und ggfs. von Nährstoffauswaschung bis hin zur Schaffung von anaeroben Bodenverhältnissen, welche sich wiederum negativ auf das Pflanzenwachstum auswirken (Irmak 2019).

Um Bewässerungssteuerung objektiver zu gestalten, existieren Entscheidungshilfesysteme, die zur Entscheidungsfindung herangezogen werden können. Neben allgemein zugänglichen Wetterprognosen werden beispielsweise spezielle Wetterprognosen für die Landwirtschaft angeboten. Detaillierter auf die Situation vor Ort gehen Bilanzmodelle ein. Aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration (ETo), lässt sich die sogenannte klimatische Wasserbilanz (KWB) bilden, aus der sich ableiten lässt, ob der gefallene Niederschlag die mögliche Verdunstung abdeckt. Anhand von Umrechnungsfaktoren kann diese potentielle Verdunstung in kulturspezifische Werte umgerechnet werden. Die Berechnung des Pflanzenwasserbedarfs basiert auf der Methode zur Berechnung der Referenzverdunstung gemäß Food and Agriculture Organization (FAO) FAO-Paper 56 (Allen et al. 1998) und verwendet adaptierte Pflanzenkoeffizienten. Anhand des gleichen Prinzips, der Gegenüberstellung von Niederschlag und Pflanzenverdunstung, ergänzt um den daraus resultierenden Bodenwassergehalt auf täglicher Basis, fungiert die Geisenheimer Bewässerungssteuerung als in der Praxis häufig verwendetes Bilanzmodell (LfL 2008, 13; Roth-Kleyer 2016, 117). Wird eine bestimmte negative Bodenwasserbilanz erreicht, wird eine Bewässerung durchgeführt. In jüngerer Zeit werden zudem Produkte basierend auf Fernerkundungsdaten in Kombination mit Pflanzenwuchsmodellen angeboten wie z.B. Variable-Rain der BayWa AG oder IrriWatch (BayWa AG o. J.; IrriWatch o. J.).

Konkrete Aussagen zur tatsächlichen Situation am Standort sind nur mit Messungen möglich. Mit Hilfe vor Ort positionierter Wetterstationen können kleinräumige Niederschlagsereignisse berücksichtigt und genauere klimatische Wasserbilanzen erstellt werden. Es bestehen verschiedene Möglichkeiten direkt an der Pflanze zu eruieren, ob diese unter Stress leidet. So können beispielsweise Saftfluss, Stammschrumpfung, Blatttemperatur oder das im Blatt herrschende Wasserpotential erfasst werden, wobei die beiden letztgenannten in erster Linie zur Bewässerungssteuerung verwendet werden (Henggeler, o. J., 30). Messungen direkt an der Pflanze sind die Einzigen, die alle Komponenten des Komplexes Pflanze-Boden-Klima beinhaltet. Allerdings sind die notwendigen Sensoren teuer, wenig robust und eine kontinuierliche Messung ist aufgrund der notwendigen Rahmenbedingungen problematisch. So sind können verlässliche Werte des Wasserpotentials im Blatt nur zu bestimmten Tageszeiten (kurz vor Sonnenaufgang und zur wolkenlosen Mittagszeit) ermittelt werden (Henggeler, o. J., 30f; MMM tech support GmbH & Co. KG 2020, 5). Eine praktikablere und robuste Methode zur Bewässerungssteuerung ist die Beobachtung des für das Pflanzenwachstum eminent wichtigen Bodenwasserzustandes. Diese ist durch eine Vielzahl von angebotenen Sensoren kontinuierlich möglich, bietet die Option zur Automatisierung (v.a. bei Tropfbewässerung) und es ist nicht notwendig, Niederschläge auf den jeweiligen Flächen separat zu berücksichtigen. Demgegenüber stehen Anschaffungskosten für Sensoren und Übertragungstechnik sowie die Frage der Repräsentanz einer Punktmessung.

1.2 Bewässerungssteuerung anhand des Bodenwasserstatus

Ausgedrückt werden kann der gemessene Bodenwasserstatus in zwei Kenngrößen, zum einen als volumetrischer Wassergehalt in cm³ cm⁻³ (Vol.-%), der die Quantität des vorhandenen Wassers abbildet, zum anderen als Matrixpotential (kPa). Das Matrixpotential gibt an, wie stark das Wasser im Boden gebunden ist. Daraus ist abzuleiten, wie viel Energie Pflanzen aufwenden müssen, um dem Boden Wassermoleküle zu entziehen (Irmak 2019). Beide Werte sind miteinander verknüpft und werden über die für jeden Boden typischen Beziehungskurven, sogenannte pF-Kurven, abgebildet. Der Wasseranteil gibt zwar die Menge des vorhandenen Bodenwassers an, trifft aber keine Aussage über die Pflanzenverfügbarkeit des Wassers. Ein Wasseranteil von 25 Vol.-% könnte beispielsweise in einem Sandboden nicht gespeichert werden und würde, bis die Feldkapazität (FK) erreicht ist, versickern. Die Feldkapazität entspricht dem maximal vom Boden gegen die Schwerkraft zu haltenden Wasseranteil. In einem Lehmboden stünde ein Wasseranteil von 25 Vol.-% den Pflanzen teilweise zur Verfügung, während er in einem Tonboden bereits so fest in der Bodenmatrix gebunden wäre, dass die Wurzeln das Wasser nicht mehr aufnehmen könnten. Dieser Zustand wird als permanenter Welkepunkt (PWP) bezeichnet (Amelung et al. 2018, 284).

Soll das Matrixpotential als Indikator zur Bewässerungssteuerung verwendet werden, ist es nicht notwendig Kenntnis über die Wassermenge im Boden, den Prozentsatz des nutzbaren Bodenwassers oder die Pflanzenverdunstung zu haben. Von Bedeutung sind lediglich das in der Hauptwurzelzone herrschende Matrixpotential und der Schwellenwert, der nicht überschritten werden sollte, um die Pflanzen vor Trockenstress zu bewahren (Stenitzer o. J.).

1.3 Zielsetzung

Unter dem Eindruck des im Zuge des Klimawandels erwarteten steigenden Wasserbedarfs für Bewässerungszwecke in Österreich – und im Speziellen im Marchfeld, im Nordosten Österreichs – soll diese Arbeit einen Beitrag zur Ertragssicherheit und zur Steigerung der Wassernutzungseffizienz im Sinne einer ressourcenschonenden und bedarfsorientierten Bewässerungssteuerung darstellen. Erfüllt werden soll diese Zielsetzung im Wesentlichen durch:

- Literaturrecherche über bestehende und angewandte Grenzwerte zur Bewässerungssteuerung für Mais.
- Festlegung, welches Matrixpotential in 20 cm Bodentiefe f
 ür Mais unter den gegebenen Umweltbedingungen (Boden und Klima) am Versuchsstandort Obersiebenbrunn ohne Ertragsverluste zulässig ist.

- Evaluierung der Strategie mittels Feldversuchs (Beobachtung der Bodenwasserdaten). Der theoretisch mögliche Grenzwert soll zur Bestimmung des Bewässerungszeitpunkts in Absprache mit den Verantwortlichen der Landwirtschaftlichen Fachschule Obersiebenbrunn im Zuge der dort stattfindenden Bewässerungsversuche während der Bewässerungssaison 2021 herangezogen werden.
- Evaluierung der Bewässerungsstrategie anhand von Pflanzenwuchsmodellen.

2 Material und Methoden

2.1 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zu bestehenden Grenzwerten fand über Google, Google Scholar sowie die Onlineressourcen der Universitätsbibliothek (BOKU:LITsearch) statt. Der Fokus dabei wurde auf deutsch- und englischsprachige Quellen gelegt. Recherchiert wurde ausgehend von den Überbegriffen: "Bewässerungssteuerung", "Bewässerung Mais", "Bewässerung Matrixpotential", "Irrigation control", "Irrigation control corn", "Irrigation control soil matrix potential", "Irrigation scheduling"

2.2 Mais (Zea mays L.)

2.2.1 Allgemeines

Mais (Zea mays L.) ist eine der bedeutendsten Kulturpflanzen und liefert zusammen mit Reis ca. 65 % der weltweit benötigten Nahrungsenergie und Nahrungsproteine. In Entwicklungsländern dient Körnermais als wichtige Nahrungsgrundlage, während er sonst überwiegend als energiereiches Futtermittel oder zur Produktion von Biofuels (Biokraftstoffen) verwendet wird (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 239; Orfanou, Pavlou, und Porter 2019, 1). 2020 wurden, ohne Grünmais, weltweit ca. 1,16 Mrd. Tonnen Mais geerntet (FAO 2022). Davon wurden in Österreich gesamt ca. 6,4 Mio. t kultiviert, aufgeteilt auf 2,4 Mio. t Körnermais und 4 Mio. t Silomais. Damit war Mais vor Hackfrüchten (Kartoffeln, etc.) mit 3,8 Mio. t und Weizen mit 1,5 Mio. t die meist angebaute Ackerpflanze (Statistik Austria 2022). Körnermais nimmt in Österreich eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Schweine- und Geflügelfütterung ein (Reiter et al. 2021, 7). Die Körnermaisproduktion beschränkt sich meist auf klimatisch günstige Gegenden, in Europa vorzugsweise Frankreich und Italien. So dominiert in den kühlgemäßigten Zonen mit zunehmender geographischer Breite der Silomaisanbau. Während Silomais bei maximaler Kornmasse vor der physiologischen Reife geerntet wird, muss Körnermais zumindest eine Kornfeuchte von < 40 % erreichen (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 239).

Mais stammt ursprünglich aus den tropischen Klimagebieten Süd- und Mittelamerikas und hat daher einen vergleichsweise hohen Temperaturanspruch, so gehören weite Teile Deutschlands bereits zu den Grenzlagen des Maisanbaus (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 242). Die Mindesttemperatur der Keimung liegt bei 8 bis 10°C, der Wachstumsbeginn setzt erst bei 14 bis 15°C ein. Seine volle Photosyntheseleistung erreicht Mais nach Diepenbrock et al. bei Temperaturen von mehr als 25°C. Bodner und Himmelbauer (2012) geben 30°C als optimale Temperatur an. Treten in der Jugendphase der Maispflanzen Temperaturen unter 12 bis 15°C auf, zeigen diese eine verminderte Photosyntheseleistung verbunden mit allgemeiner Wuchsdepression (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 242). Bereits im frühen Entwicklungsstadium, 6–8 Blatt-Stadium, sind die Ertragskomponenten festgelegt. Wird die Pflanze während dieses Stadiums kältebedingt Stress ausgesetzt, hat dies negativen Einfluss auf die Entwicklung der bereits vorhandenen Blätter, der Rispe und des Kolbens samt der zukünftigen Anzahl der Kornreihen (KWS Saat SE, o. J., 32).

Das Wurzelsystem entwickelt sich sehr früh. Bereits im 6–8 Blatt-Stadium ist eine flächendeckende Bewurzelung zu beobachten. Die volle Durchwurzelungstiefe von mehr als 1 Meter ist erst zum Rispenschieben, dem Erscheinen der männlichen Blüte, vorhanden. Einzelne Wurzeln können Tiefen von 2,5 m erreichen (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 241). Der Großteil der Wurzeln befindet sich jedoch in den obersten 30 cm Bodentiefe, dabei nimmt die Durchwurzelungsdichte mit der Tiefe exponentiell ab. Für die Wasserversorgung ist der Tiefgang der Wurzeln von Bedeutung. Selbst bei ausgetrocknetem Oberboden reichen wenige tief reichende Wurzeln aus, um die Wasserversorgung der Pflanze sicher zu stellen (Bodner und Himmelbauer 2012, 176). Grundsätzlich sind Wurzeln sehr dynamische Organe, die auf Trockenheit morphologisch als auch biochemisch reagieren. Trockenheit zum Beispiel regt das Tiefenwachstum von Wurzeln an (Bodner und Himmelbauer 2012, 176). Gesunde, gut genährte Pflanzen haben ein höheres Wasseraneignungsvermögen. Besonders Kalium nimmt eine wichtige Rolle ein, da es für den osmotischen Druck in den Pflanzenzellen und damit in den Wurzeln verantwortlich ist (KWS Saat SE, o. J., 36).

Mais ist als C4-Pflanze ein sehr effizienter Wassernutzer mit einem günstigen Transpirationskoeffizienten. Um ein Kilo Trockenmasse zu produzieren, werden lediglich 300 Liter Wasser benötigt, was im Vergleich zu den anderen gängigen Kulturpflanzen ein deutlicher Vorteil ist (Abbildung 1). Dennoch ist der absolute Wasserbedarf mit, je nach Vegetationsdauer und Witterung, 550-800 mm hoch und nicht zu unterschätzen (Bodner und Himmelbauer 2012, 175). Aufgrund der späten Aussaat Ende April / Anfang Mai, ist es nicht unwahrscheinlich, dass ertragssensible Entwicklungsphasen auch in eher feuchten Jahren in Zeiten fallen, in denen die Bodenwasserspeicher bereits zu Neige gehen. Die größten Ertragseinbußen entstehen, wenn die Pflanze während des Beginns der Blüte (Fahnenschieben oder auch Rispenschieben) und der Kornfüllung Stress ausgesetzt ist (BBCH-Code 55–79) (KWS Saat SE, o. J., 60–65). Eine gestörte Blüte führt zu einer unzureichenden Befruchtung und fehlendem Kornansatz, da die Narbenfäden der weiblichen Blüte durch Wassermangel nur verzögert austreten, wohingegen der Zeitpunkt des Pollenschüttens nahezu gleichbleibt. Somit stehen beim Erscheinen der Narbenfäden nicht mehr ausreichend Pollen zur Verfügung (Westmeier und Gresset 2013, 25). Wasserstress während der Kornfüllung führt zu einer Reduktion des Korngewichts (Diepenbrock, Ellmer, und Léon 2016, 242; Bodner und Himmelbauer 2012, 175; KWS Saat SE, o. J., 36). Während des Hauptmassenwachstums im Juli und August (Blüte bis Kornfüllung) können in geschlossenen Maisbeständen tägliche Verdunstungsraten von 8-10 mm erreicht werden. Leichte Böden können also schnell erschöpft sein (Bodner und Himmelbauer 2012, 174).

Wasserbedarf ausgewählter Kulturpflanzen*				
Kultur	Wasserbedarf (mm)	Transpirationskoeffizient (I H ₂ O kg ⁻¹ TM)	Kritisches Stadium	
Mais	550-800	300	Blüte – Kornfüllung	
Zuckerrübe	550-750	350	Reihenschluss	
Winterweizen	450-550	400	Schossen, Blüte – Kornfüllung	
Sommergerste	350-450	400	Schossen, Blüte – Kornfüllung	
Kartoffel	550-700	500	Blüte, Knollenbildung	
Raps	600-800	600	Schossen, Blüte	
Sonnenblume	600-800	600	Vor Blüte – frühe Reife	
Körnererbse	350-500	650	Blüte – frühe Reife	
*Quellen: FAO Land and Water Division, Ehlers (1996), Geisler (1988)				

Abbildung 1: Wasserbedarf ausgewählter Kulturpflanzen (zitiert nach Bodner und Himmelbauer, 2012)

2.2.2 Wasseraufnahme durch Wurzeln

Durch das negativere Wasserpotential ψ_w der Atmosphäre wird einer Pflanze stetig Wasser entzogen. Um diese negative Wasserbilanz auszugleichen, muss eine Pflanze ihre Wasserzufuhr aufrechterhalten. Die Aufnahme selbst erfolgt durch den Transpirationssog im Wesentlichen passiv. In der Regel weist der Boden einen höheren Wassergehalt bzw. ein weniger negatives Wasserpotential als Pflanzenwurzeln auf, wodurch die Wurzeln dem Boden Wasser entziehen können (Nultsch 2012, 283). Die Pflanze agiert als Bindeglied zwischen "trockener" Atmosphäre und "feuchtem" Boden. Weiterer Treiber der Wasseraufnahme ist das osmotische Potential, das ein Teil des Wasserpotentials darstellt. Der Zellsaft weist eine höhere Nährsalzkonzentration als die umgebende Bodenlösung auf. Ziel der Wasseraufnahme ist es, die Konzentrationen der beiden Lösungen durch Verdünnung des Zellsaftes anzugleichen (Degen und Schrader 2014, 39). Pflanzenwurzeln müssen also, um Wasser aufnehmen zu können, ein negativeres Wasserpotential aufweisen als der umgebende Boden, welches hinsichtlich des pflanzenverfügbaren Wassers hauptsächlich vom Matrixpotential bestimmt wird.

2.3 Bodenwasserstatus

2.3.1 Beziehung zwischen Matrixpotential und Wasseranteil

Der Wasseranteil eines Bodens ist vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung abhängig. Alle von der Matrix (Korngerüst) auf das Wasser einwirkenden Kräfte werden als Matrixpotential zusammengefasst. Je trockener ein Boden ist, desto höher ist das Matrixpotential und es ist dementsprechend mehr Arbeit nötig, um dem Boden Wasser zu entziehen. Durch das Zusammenspiel von Kohäsionskräften zwischen den Wassermolekülen und Adhäsionskräften zwischen festen Bodenpartikeln und Wasser entstehen an den Berührungsstellen der festen Teilchen Menisken. Je kleiner die Durchmesser der kapillaren Hohlräume sind, umso stärker ist die Bindung zwischen Wasser und Oberfläche. Es ist also mehr Energie nötig, um Wasser zu entziehen. Meist unterliegt das Bodenwasser Adsorptions- und Kapillarkräften. Mit steigendem Wassergehalt überwiegt der Einfluss der Kapillarkräfte die Bindungen aus Adsorption und umgekehrt (Scheffer et al. 2010, 222). Das Matrixpotential wirkt dem Gravitationspotential entgegen und hat demnach ein negatives Vorzeichen. Die Beziehung zwischen Matrixpotential und Wassergehalt wird graphisch in sogenannten pF-Kurven oder Wassergehaltskurven dargestellt (Abbildung 2). Der pF-Wert ergibt sich aus dem Logarithmus des Betrages des Matrixpotentials (pF = log hPa) (Amelung et al. 2018, 282f).



Abbildung 2: Exemplarische pF-Kurve (Amelung et al. 2018, 284)

Aus Abbildung 2 geht der Einfluss der Körnung auf den Wassergehalt hervor. Mit zunehmender Korngröße nimmt die Vollsättigung der Böden ab. Ferner ist ersichtlich, dass bei gleichem Wassergehalt aufgrund der unterschiedlichen adsorbierenden Oberfläche abweichende Haltungskräfte vorliegen (Amelung et al. 2018, 284f).

Wassergehaltskurven verändern, je nachdem ob eine Be- oder Entwässerung vorliegt, ihren Verlauf. Bei Bewässerungen (Sorption) weisen Böden in der Regel bei gleichem Matrixpotential einen geringeren Wassergehalt auf als bei Entwässerungen (Desportion). Dieser Effekt wird Hysteresis genannt. Eine Ursache liegt in Quell- und Schrumpfprozessen des Korngerüsts und damit sich verändernden Hohlraumvolumen (Amelung et al. 2018, 286). Ein weiterer Grund dafür ist, dass bei Desorption zuerst die groben Poren und dann die feinen Poren entwässert werden, während sich bei der langsamen Bewässerung die feinen Poren aufgrund von Kapillareffekten zuerst füllen. Der zum Entleeren oder zum Füllen einer Pore benötigte Sog hängt auch von den Porenradien ab, da die Haltekräfte davon abhängig sind (Dey, Sundriyal, und Sahoo 2017, 154). In Abbildung 3 sind die Effekte der Hysterese auf die pF-Kurve am Beispiel für Sand und Löss dargestellt. Ersichtlich ist ebenfalls, dass die Effekte bei Sandböden stärker ausfallen. Zur Beschreibung des Bodenwasserhaushalts sind Entwässerungskurven besser geeignet. Diese lassen sich im Labor zusätzlich leichter bestimmen als Bewässerungskurven (Disse und Hartmann 1997, 36).



Abbildung 3: Hysterese von pF-Kurven (Anmelung et al. 2018, 285)

Da die Bestimmung der Matrixpotentialkurven zeitaufwändig ist und bestimmte Apparaturen voraussetzt, wurden Verfahren (Pedotransferfunktionen) entwickelt, die es ermöglichen, die Kurve aus einfacher zu bestimmenden oder routinemäßig vorliegenden Daten zu berechnen. Eingangsgrößen können zum Beispiel Lagerungsdichte und Körnung sein (Amelung et al. 2018, 286).

Das Prinzip der Pedotransferfunktionen beschreibt den Zusammenhang zwischen den mathematisch-physikalisch und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens (Kammerer und Loiskandl 2005, 48). Anhand bekannter Korngrößen und des Humusanteils samt zugehöriger Schichtdicke können beispielsweise mit der Baumer-Formel die drei relevanten Werte FK, nFK und PWP berechnet werden.

2.3.2 Wasserspezifische Bodenkennwerte

Zur Beurteilung des Bodenwasserhaushalts werden meist die drei Begriffe Feldkapazität (FK), permanenter Welkepunkt (PWP) und nutzbare Feldkapazität (nFK) verwendet. Zur sinnvollen Bewässerungsteuerung und Beschreibung der Böden ist Kenntnis über diese Werte notwendig.

Als **Feldkapazität** wird der Wassergehalt beschrieben, der sich 1–2 Tage nach Vollsättigung einstellt und gegen die Schwerkraft in der Bodenmatrix gehalten wird. Demnach ist der Boden nicht mehr wassergesättigt und feinere Poren sind bereits wieder mit Luft gefüllt. Die Wasserspannungen liegen bei pF-Werten zwischen 1,8–2,5 (-60 bis –300 hPa). Je feinkörniger die Böden werden, desto größer ist dieser Wert. Sandböden erreichen ihre Feldkapazität bereits bei niedrigeren pF-Werten (Amelung et al. 2018, 302). In dieser Masterarbeit wird die Feldkapazität, sofern nicht anders vermerkt, generell bei pF 2,5 angesetzt.

In Abbildung 2 ist dieser Bereich grau schraffiert. Abhängig ist die Feldkapazität in erster Linie vom Korngerüst, großen Einfluss nehmen zusätzlich der Gehalt und die Zusammensetzung der organischen Substanz. Diese kann die FK deutlich erhöhen (Amelung et al. 2018, 302f).

Wenn eine Pflanze dem Boden nicht mehr genug Wasser entziehen kann, um den durch Transpiration entstehenden Bedarf zu decken, welkt diese. Es ist zwar noch Wasser im Boden vorhanden, aber so stark an die Matrix gebunden, dass die Pflanze es nicht mehr aufnehmen kann. Dieser Wasseranteil wird als **permanenter Welke-punkt** bezeichnet. Die Wasseraufnahmefähigkeit schwankt allerdings von Pflanze zu Pflanze. Als Referenzpflanzen dienen Sonnenblumen *(Helianthus annus)* und Kiefern *(Pinus Silvestris)*. Ab einem pF-Wert von 4,2, dies entspricht 150.000 hPa, können sie dem Boden kein Wasser mehr entziehen. Für die Mehrzahl der Kulturpflanzen kann dieser Wert verwendet werden, daher wird ein pF-Wert von 4,2 als allgemeingültig angenommen und zur Berechnung des pflanzenverfügbaren Wassers herangezogen. In diesem Zustand ist das Wasser nur noch in den Feinporen gebunden und an den

Wänden von Mittel- und Grobporen lediglich als dünner Film vorhanden. Deshalb ist der PWP eng mit dem Tongehalt verbunden (Amelung et al. 2018, 304).

An grundwasserfernen Standorten berechnet sich das pflanzenverfügbare Wasser, die nutzbare Feldkapazität, aus der Differenz von FK und PWP. Angegeben wird die nFK in mm dm⁻¹. Multipliziert mit dem effektiven Wurzelraum (dm) ergibt sich die nFK in mm (Amelung et al. 2018, 495). Die sich, gerade zu Beginn, des Wachstums ändernde Wurzeltiefe muss bei der Berechnung der nFK berücksichtigt werden. Ferner sind der organische Anteil des Bodens sowie die Schichtung des Bodens von Bedeutung. So ergeben sich je nach Korngrößen unterschiedliche nutzbare Feldkapazitäten. Sandböden weisen aufgrund ihrer großen Porenräume die kleinsten nutzbaren Feldkapazitäten auf. Lehm- und Lössböden haben einen hohen Anteil an Mittelporen und verfügen deshalb über die größte nFK. Oftmals wird das pflanzenverfügbare Bodenwasser in Prozent angegeben. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterscheidet beispielsweise die in Tabelle 1 beschriebenen Klassen. Um aus den relativen Mengenangaben konkrete Mengen in mm zu erhalten, muss das Wasser über die betrachtete Bodentiefe aufsummiert werden, wobei 10 Vol.-% über 10 cm Tiefe 10 mm Wasser ergeben (DWD 2021, 4). Das Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) als Betreiber des Deutschen Dürremonitors gibt als Richtwerte zur Einordnung leicht abweichende Werte an. Ab 50 % nFK wird landwirtschaftliche Bewässerung als notwendig angesehen, um den optimalen Ertrag zu erzielen. Diese variieren aber gegebenenfalls in Abhängigkeit von Pflanzenart und Lagerungsdichte des Bodens (UFZ o. J.). Das leicht verfügbare Bodenwasser (50 % nFK) gilt als allgemeine Faustformel als der Teil des Bodenwassers, der dem Boden entzogen werden kann, bevor eine Reduzierung der Verdunstungsleistung auftritt. Besonders Feingemüse (z.B. Salat) hat durchaus höhere Ansprüche an das verfügbare Bodenwasser, die eine früheren Bewässerungsstart erfordern.

Tabelle 1: Bodenwassergehaltsklassen in Prozent nutzbarer Feldkapazität (% nFK) (DWD 2021, 2 verändert nach UFZ o. J.)

% nFK	Pflanzenentwicklung
< 30	die Pflanze steht unter Trockenstress, mit Ertragseinbußen ist zu rechnen
30 bis 50	noch ausreichend Wasserversorgung der Pflanzen, Bewässe- rung zur optimalen Ertragsausbeute notwendig. Beginnender Trockenstress
50 bis 80	optimales Wasserangebot
80 bis 100	Beginn der Überversorgung, Gefahr von Sauerstoffmangel
> 100	Überversorgung und Sauerstoffmangel

2.4 Versuchsaufbau Obersiebenbrunn

Seit 2005 werden an der Landwirtschaftsschule (LFS) Obersiebenbrunn im Marchfeld (Niederösterreich) Bodenbearbeitungsversuche durchgeführt. Untersucht wird der Einfluss der Intensität und Art der Bodenbearbeitung (BB) auf die Pflanzenproduktion. Um den inzwischen regelmäßig länger auftretenden Trockenperioden Rechnung zu tragen, wurde der Versuch 2018 um die Möglichkeit zur Bewässerung ergänzt (Kastelliz und Nolz 2022, 1). Durch diese Erweiterung des Versuchs ergibt sich die Möglichkeit Auswirkungen verschiedener Bewässerungstechniken (BW) in Kombination mit unterschiedlichen Bodenbearbeitungsvarianten zu vergleichen. In Abbildung 4 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Dabei werden vier Bodenbearbeitungsvarianten in drei Wiederholungen durchgeführt. Im 90 Grad Winkel dazu finden über die Länge der Bodenversuche Bewässerungsversuche statt. Daraus ergeben sich insgesamt 48 Versuchsparzellen.

Den größten Eingriff in das System Boden verursacht die konventionelle Bodenbearbeitung (BB 1) und ist dabei zudem die teuerste. Den geringsten Eingriff in den Boden weist Variante vier, die Direktsaat, auf. Diese benötigt allerdings eine spezielle Sämaschine und einen zusätzlichen Herbizid-Einsatz. In den Varianten zwei und drei wird auf den Einsatz eines Pfluges verzichtet und der Boden lediglich zweimal bzw. einmal mit einem Grubber bearbeitet.

Zur Erfassung des Bodenwasserzustandes stehen Monitoringsysteme der Marke ADCON (OTT Hydromet GmbH, Kempten) zur Verfügung, die sich in der dritten Wiederholung in der minimierten Bodenbearbeitungsvariante (BB 3) befinden. In Abbildung 4 sind die Stationen mit den Nummern 10947 bis 10950 gekennzeichnet.

2021 wurde in Obersiebenbrunn am 03.05.21 Körnermais der Sorte "Azalexx, Spät, RZ 400" mit der Saateinstellung 75 cm x 18 cm (Pflanzendichte = 7,4 Pflanzen m⁻²) ausgesät.



Abbildung 4: Versuchsaufbau 2021 für Mais in Obersiebenbrunn

2.4.1 Bodendaten

In den oberen 65 cm besteht der Boden aus sandigem Lehm (Horizont A/AC). Im Anschluss folgen sandiger Schluff / lehmiger Schluff bis 1 m Tiefe und Sand in über einem Meter Tiefe (Abbildung 5). In der digitalen Bodenkarte (eBod) des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) wird der Standort als hochwertiges Ackerland, bestehend aus Schwarzerde, beschrieben. Die Wasserverhältnisse sind als mäßig trocken angegeben. Der Boden besitzt eine hohe Speicherkraft und eine mäßige Durchlässigkeit. Als nutzbare Feldkapazität (FK bei pF=1,8) werden 140–220 mm angegeben (BFW o. J.).



Abbildung 5: Bodenprofil Obersiebenbrunn (BFW o. J.)

Für die vier Versuchsparzellen in Obersiebenbrunn wurden im Zuge einer Dissertation die in Abbildung 6 gezeigten Retentionskurven erstellt und die dazugehörigen van-Genuchten-Parameter, welche die Retentionskurve beschreiben, bestimmt. Jede Kurve repräsentiert den Mittelwert aus drei Probenahmen. Die Bodenproben wurden aus 10–20 cm Tiefe entnommen. Nicht pflanzenverfügbares Wasser, ab einem pF-Wert > 4,2, ist rötlich hinterlegt, der grüne Bereich veranschaulicht die nutzbare Feldkapazität. Der bläuliche Bereich symbolisiert die Zone zwischen den Definitionen der Feldkapazität.



Abbildung 6: pF-Kurven Obersiebenbrunn (Morales, persönliche Kommunikation, 09.04.21, verändert)

Die größte nutzbare Feldkapazität der Versuchsstellen weist die unberegnete Parzelle (NI) mit 127,4 (mm m⁻¹) auf, die geringste jene Parzelle, welche mit dem Auslegerstativ (BI) bewässert wird mit 111,3 (mm m⁻¹). Damit liegen die vor Ort ermittelten nutzbaren Feldkapazitäten unter den in der digitalen Bodenkarte angegebenen, wobei die Feldkapazität dort bei einem pF-Wert von 1,8 angesetzt wird. Im weiteren Verlauf wird mit den von Morales ermittelten Werten gearbeitet. In Tabelle 2 sind für alle vier Parzellen die wichtigsten Werte sowie van-Genuchten-Parameter dokumentiert. Zu beachten ist, dass die dargestellten pF-Kurven und beschriebenen Werte nur für die beprobte Bodenschicht Gültigkeit besitzen. Da sich in den oberen 65 cm die Bodenart nicht ändert, wird angenommen, dass die bestimmten nutzbaren Feldkapazitäten und van-Genuchten-Parameter zumindest bis zu einer Bodentiefe von 65 cm angewandt werden können.

		DI	NI	SI	BI
FK (2.5)	Vol%	29.97	30.09	24.97	27.86
FK (1.8)	Vol%	38.15	37.63	32.64	34.37
PWP	Vol%	17.85	17.35	12.36	16.73
nFK	Vol%	12.12	12.74	12.62	11.13
nFK	mm m ⁻¹	121.2	127.4	126.2	111.3
ϑr	(cm3 cm ⁻³)	0.137	0.11	0.039	0.101
ϑs	(cm3 cm ⁻³)	0.532	0.45	0.395	0.414
α	cm ⁻¹	0.095	0.0336	0.028	0.038
n		1.232	1.238	1.247	1.216
Ks	(cm Tag ⁻¹)	12.9	31.17	12.405	27.317

Tabelle 2: Bodenphysikalische Parameter Obersiebenbrunn

2.4.2 Langjährige Klimadaten

Mit den Wetteraufzeichnungen der Station in Obersiebenbrunn (O7B) wurden die zugehörige Referenzverdunstung (ETo) berechnet. Da diese deutlich von der im Rahmen der verschiedenen Klimaszenarien berechneten abwich (siehe Abschnitt 2.6.1), wurde eine Gegenüberstellung der Stationsdaten am Versuchsstandort und der nächsten offiziellen Station der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Form von Punktdiagrammen vorgenommen. Als Bezugsstation zur Berechnung der Referenzverdunstung für 2021 diente die ZAMG-Station in Groß-Enzersdorf (GE), die sich circa 13 km südwestlich vom Versuchsstandort befindet. In der Berechnung der Windgeschwindigkeit bestehen Unterschiede und eine deutliche Abweichung der gemessenen Niederschläge traten auf. Die ADCON-Station in Obersiebenbrunn misst die Windgeschwindigkeit direkt in km/h, während ZAMG-Tagesdaten in Beaufort angegeben werden, die erst in km/h bzw. m/s umgerechnet werden müssen. Diese Umrechnung wird bei Datendownload bereits seitens der ZAMG vorgenommen. Die Daten der Station Groß-Enzersdorf wurden aus dem Download-Portal der ZAMG bezogen (ZAMG 2022b). Dort liegen Wetterdaten in verschiedener zeitlicher Auflösung und in geprüfter Form vor (ZAMG 2022a).

Abbildung 7 stellt die gemessenen Niederschläge 2021 (Mai–September) in mm der beiden Stationen dar. Auffällig ist, dass die Niederschlagsereignisse meist an denselben Tagen stattfinden, sich in ihrer Höhe aber teils deutlich unterscheiden. Die blauen Säulen symbolisieren die Station Obersiebenbrunn, während die gelben Säulen Groß-Enzersdorf repräsentieren. Nahezu durchgehend wurden in GE größere Niederschlagsmengen gemessen.



Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Niederschlagsmengen Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf.

Grundsätzlich treten immer wieder Jahre auf, bei denen die Regenmengen in Obersiebenbrunn geringer ausfallen als in Groß-Enzersdorf. Allerdings wird die Station in Obersiebenbrunn als nicht den Standards der World Meteorological Organization (WMO) entsprechend beschrieben (Nolz, persönliche Kommunikation, 15.11.21), was bei einzelnen Messgrößen zu Messungenauigkeiten führen könnte. Deshalb wird sich im weiteren Verlauf auf die Niederschlagsdaten von Groß-Enzersdorf bezogen. Dennoch bestehen durch diese deutlichen Unterschiede in der Niederschlagsmessung Unsicherheiten hinsichtlich der Wasserbilanz am Versuchsstandort.

Im Anhang A ist die Gegenüberstellung der Wetterdaten 2021 von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf in Form von Punktdiagrammen beigefügt. Da die zur Bestimmung der ETo benötigten Parameter, mit Ausnahme der Windgeschwindigkeit, nahezu ident sind, werden die Werte von Groß-Enzersdorf verwendet (Abbildung 45 bis Abbildung 49). Aufgrund der geringen Distanz zwischen dem Versuchsstandort und der ZAMG-Station, wird davon ausgegangen, dass die mit den aus Groß-Enzersdorf stammenden Daten berechnete ETo auch für Obersiebenbrunn anwendbar ist und zwischen den Klimadaten keine großen Unterschiede existieren. Alle folgenden Darstellungen und Berechnungen beziehen sich auf Groß-Enzersdorf.

Das Marchfeld befindet sich im Einfluss des pannonischen Klimas mit heißen, relativ trockenen Sommern (BMLRT o. J.; Stenitzer 2004, 1). Der Versuchsstandort befindet sich somit in einem der trockensten Gebiete Österreichs. Aufgrund geringer Niederschläge, hoher Temperaturen, hohem Windpotential und des damit einhergehenden hohen Verdunstungspotentials besteht ein großes Trockenheitsrisiko in der Region. Durch weiter steigende Temperaturen und der dadurch steigenden potentiellen Evapotranspiration wird das Trockenstressrisiko weiterhin verschärft (Formayer 2017, 1).

Abbildung 8 zeigt das Klimadiagramm für Groß-Enzersdorf in Anlehnung an Walter und Lieht. Bezugshorizont sind die Jahre 1991–2020. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 10,8°C, der Jahresniederschlag ergibt sich mit 560,80 mm. Niederschlagsreichster Monat ist der Juli mit 72,5 mm, niederschlagsärmster hingegen der Monat Februar mit 20,6 mm. Rund zwei Drittel des Jahresniederschlags fallen im Sommerhalbjahr. Die höchsten Temperaturen werden mit einer mittleren Tagestemperatur von 21,5°C im Juli erreicht. Kältester Monat ist mit knapp über Null Grad der Januar.



Abbildung 8: Klimadiagramm Groß-Enzersdorf

In nachfolgender Abbildung (Abbildung 9) ist die tägliche mittlere Referenzverdunstung eines Monats dargestellt. Die höchste ETo, deren Berechnung in Punkt 2.6.1. nachvollzogen werden kann, ergibt sich im Juli mit 5,2 mm pro Tag. Insgesamt summiert sich die potentielle Verdunstung auf 906 mm. Für die Ackerbauregionen im



Abbildung 9: Mittlere tägliche Referenzverdunstung eines Monats

Osten Österreichs kann von einer potentiellen Evapotransiration zwischen 800 mm bis über 900 mm ausgegangen werden (Formayer 2017, 2).

Aus dem Jahresniederschlag und der berechneten potentiellen Verdunstung lässt sich die für die Landwirtschaft bedeutende klimatische Wasserbilanz (KWB) bilden. Abbildung 10 zeigt die kumulierten Summen der ETo und des Niederschlags im Jahresgang. Bereits im März übersteigt die ETo den Niederschlag und die klimatische Wasserbilanz wird negativ. Insgesamt weisen nur fünf Monate (Oktober-Februar) eine positive Wasserbilanz auf. Für die Periode 1978–2002 waren negative Werte erst ab April zu registrieren (Stenitzer 2004, 1). Mit sieben defizitären Monaten wird das Klima im Osten Österreichs als semi-arid beschrieben (Bodner, o. J., 1; Harlfinger 1999, 4). Im langjährigen Mittel ergibt sich eine negative klimatische Wasserbilanz von 345 mm.

Für die trockensten Gebiete Österreichs ergeben sich Wasserdefizite von rund 400 mm. Bedingt durch den Klimawandel wird davon ausgegangen, dass sich das Niederschlagsdefizit weiter erhöht (Formayer 2017, 2).



Abbildung 10: Klimatische Wasserbilanz Groß-Enzersdorf 1991–2020

2.4.3 Messungen am Standort

Auf den Versuchsfeldern der Landwirtschaftlichen Schule findet ein umfassendes Monitoring-Programm statt. Erfasst werden Klima- sowie Bodenwasserstatusdaten. Über das Datenportal der Marke ADCON können die aufgezeichneten Daten in Echtzeit abgerufen werden. Wetterdaten werden in 15-minütiger, Bodendaten in stündlicher Auflösung ausgegeben. Übermittelt werden die Daten mit einer RTU-Einheit (Remote Terminal Unit) der Marke ADCON, betrieben durch ein Solarpanel.

2.4.3.1 Pflanzenstatus und Wetterdaten

Zur Erfassung der Wetterdaten stehen zur Verfügung:

- SI-400 IRT, APOGEE. Infrarot-Radiometer zur Erfassung der Blattoberflächentemperaturen.
- TR2, ADCON. Messung von Lufttemperatur und Luftfeuchte.
- Pyranometer. Messung der Globalstrahlung.
- Anemometer. Messung Windgeschwindigkeit
- Regenmesser

2.4.3.2 Bodenwasser

Da die Bodenwasserdaten die Basis für diese Masterarbeit darstellen, wird nachfolgend auf die Messmethoden und Eigenschaften der verwendeten Bodenwasserstatussensoren eingegangen. Der Hauptfokus liegt dabei auf den Watermark und Hydra-Probe Sensoren. Ergebnisse der MPS-6 und SM-1 werden ergänzend dargestellt und diskutiert.

Watermark-Sensoren

In Obersiebenbrunn kommen zur Messung des Matrixpotentials unter anderem Watermark-Sensoren der Firma IRROMETER, Kalifornien, USA, zum Einsatz. Watermark-Sensoren sind sogenannte Granulare Matrix Sensoren (GMS). Die Messung des Matrixpotentials basiert bei diesen Sensoren auf dem Prinzip des elektrischen Widerstands. Der Sensor besteht im Wesentlichen aus einer durch ein Metallgitter geschützten, porösen, keramisch oder bei neueren Modellen aus Kunststoff hergestellten Außenhülle, die mit einem Granulat (z.B. Sand) gefüllt ist. In dieses Granulat sind zwei Elektroden eingebettet (Gholson 2021, 1; Irmak et al. 2016, 3). Ist der Sensor schlüssig in das umgebende Erdreich eingebunden, gleichen sich die Bodenwasserstatusverhältnisse im Inneren des Sensors denen des anstehenden Bodens an. Diese Veränderungen innerhalb des Sensors spiegeln sich im elektrischen Widerstand zwischen den zwei im Granulat installierten Elektroden wider. Watermark-Sensoren messen bis zu einem Wert von –200 kPa, deshalb eignen sie sich auch für trockenere Bodenverhältnisse. Aufgrund ihrer Wartungsfreiheit im Feld, Robustheit und Frostsicherheit sowie des relativ günstigen Preises werden Watermark-Sensoren häufig in der landwirtschaftlichen Bewässerung eingesetzt. Auch für langjährige Kulturen eignen sie sich, da sie im Winter nicht entnommen werden müssen.

Watermark-Sensoren reagieren etwas träger als andere Sensoren auf trockener werdende Verhältnisse. Deshalb werden sie eher für Kulturen empfohlen, die nicht ganz so hohe Ansprüche an das verfügbare Bodenwasser stellen und bei denen zwischen den einzelnen Bewässerungsgaben längere Zeiträume liegen können (Hageneder und Beck 2014, 77, 87f). Vermutlich wird erst der umgebenden Membran Wasser entzogen bevor das Granulat reagiert. Ferner unterliegen Messergebnisse Temperaturschwankungen, die laut Hersteller über die Kalibrierfunktion korrigiert, aber dennoch von Anwendern beobachtet werden (Hageneder und Beck 2014, 77; Gholson 2021, 2).

Für ca. $50 \in$ pro Stück sind Watermark-Sensoren zu erwerben. Zusätzlich wird jedoch ein Handauslesegerät (ca. 290 \in) oder ein Datenlogger zur Bündelung mehrerer Sensoren (ca. 900 \in) notwendig. Auch ein Einbinden in automatisierte Bewässerungsprozesse und Datenfernübertragungen ist möglich (MMM tech support GmbH & Co. KG 2020, 10f).

MPS-6

Neben den Watermark-Sensoren werden zur Bestimmung des Matrixpotentials Dielectric Water Potential Sensors-6 (MPS-6) von DEACAGON DEVICES (jetzt METER GROUP), Washington, USA, verwendet. Dieser Sensor besteht aus einer Elektronikeinheit, einer Leiterplatte mit Sensorelement ergänzt durch zwei poröse Keramikscheiben, die durch gelochte Edelstahlplatten vor äußeren Einflüssen geschützt und in Position gehalten werden. Die Messung des Matrixpotentials erfolgt auf indirektem Weg. Durch Kontakt mit dem umgebenden Boden befinden sich die Keramikscheiben mit diesem im hydraulischen Gleichgewicht.

Das Sensorelement bestimmt die Dielektrizitätszahl (Permittivität) der Keramikscheiben und somit des umgebenden Bodens. Die dimensionslose Dielektrizitätszahl von Luft, der Keramik und Wasser sind bekannt und betragen 1, 5 und 80. Die tatsächliche in der Keramikscheibe vorliegende Zahl hängt also von dem in den Poren vorhandenem Wasser ab (Decagon Devices Inc. 2017, 7). Der Sensor bestimmt die Permittivität auf kapazitivem Wege mittels FDR (Frequency Domain Reflectometry). Dazu wirkt der Sensor wie ein Kondensator und wird mit einer gewissen Frequenz angeregt. Gleichzeitig wird die Resonanzfrequenz des Dielektrikums (Keramikscheiben), welche abhängig von der Dielektrizitätszahl ist, erfasst (Hanson und Douglas 2000, 43). Beim MPS-6 beträgt die Frequenz 70 MHz bei einer Messdauer von 150 ms. Die Umrechnung von Dielektrizitätszahl/Wasseranteil in das Matrixpotential erfolgt direkt im Sensor. Der Messbereich reicht von -9 bis -100.000 kPa, wobei die Genauigkeit bis zu einem Wert von -100 kPa ± 10 % beträgt und danach abnimmt (Decagon Devices Inc. 2017, 2).

HydraProbe

Zur Bestimmung des volumetrischen Wasseranteils (cm³ cm⁻³) werden in jeder Parzelle in 20 cm Tiefe unter anderem HydraProbe Soil Sensoren von STEVENS WATER MONITORING SYSTEMS, Oregon, USA, betrieben. Ferner werden die Dielektrizitätszahl, Bodentemperatur sowie die elektrische Leitfähigkeit des Bodens erfasst (Stevens Water Monitoring System Inc. 2007, 6). Der Sensor besteht im Wesentlichen aus zwei Hauptkomponenten, zunächst aus einem Gehäuse, das alle elektrischen Bestandteile inklusive eines Thermometers beinhaltet. Die zweite Komponente ist eine Zinkenanordnung bestehend aus einer gemeinsamen Grundplatte und insgesamt vier Zinken mit einer Länge von 58 mm bei einem Durchmesser von 3 mm, die um den mittleren Zinken ein gleichseitiges Dreieck bilden (Kammerer et al. 2014, 1209). Im Gehäuse wird eine elektromagnetische Welle mit einer Frequenz von 50 MHz erzeugt. Deren Verhalten im Boden (Laufzeit/Abschwächung) zwischen den Zinken wird vom Sensor gemessen und daraus die Permittivität bestimmt (Stevens Water Monitoring System Inc. 2007, 31). Damit ist der HydraProbe Sensor der Einzige der vier zum Einsatz kommenden Sensoren, der den Bodenwasserstatus mit der TDR-Methode (Time Domain Reflectometry) ermittelt. Der Sensor gilt als sehr robust und fehlerresistent. Mehrere US-Behörden und Universitäten nutzen ihn deshalb zu Monitoring-zwecken (Stevens Water Monitoring System Inc. 2007, 6). Allerdings liegen die Kosten je Sonde bei mehreren hundert Euro.

SM-1 Sensoren

Zur Erfassung des Wasseranteils über das Bodenprofil steht eine SM1-Rohrsonde von ADCON, Wien, zur Verfügung. Über eine Bodentiefe von 90 cm hinweg wird im Abstand von 10 cm der Wasseranteil erfasst. Pro Messtiefe erfassen zwei ringartig angeordnete Elektroden auf kapazitivem Wege (FDR-Methode) den Wasseranteil. Ausgegeben werden die Ergebnisse in SFU-Einheiten (Scaled Frequency Units) und müssen anhand einer Kalibrierfunktion in den volumetrischen Wasseranteil umgerechnet werden.

2.4.4 Bewässerungsmethoden

In dem beschriebenen Versuchsaufbau finden vier Bewässerungsstrategien bzw. drei Bewässerungstechniken Anwendung. Tabelle 3 gibt Auskunft über die im Bericht verwendeten Abkürzungen bzgl. der verschiedenen Bewässerungstechniken.

Tabelle 3:	Ubersicht	Bewässerungsmethoden

Bezeichnung:	Abkürzung in Bericht und Grafiken:
Tropfschläuche	DI = drip Irrigation
Unberegnet	NI = no irrigation
Rohrnetzberegnung	SI = sprinkler irrigation
Auslegerstativ	BI = boom irrigation

2.4.4.1 Tropfbewässerung

Der Vorteil der Tropfbewässerung besteht im hohen Wirkungsgrad von ca. 90–95 % aufgrund geringer Wasserverluste durch Winddrift und Interzeption (Klik 2019, 9). Einzig Verluste durch Evaporation treten auf, bzw. Versickerungsverluste bei suboptimalem Betrieb. Ein weiterer positiver Effekt der Tropfbewässerung sind niedrige notwendige Betriebsdruckwerte von 0,5–3 Bar und damit einhergehend geringere Betriebskosten (Nolz 2020, 107; Hageneder und Beck 2014, 33).

Die Kosten der Beregnung werden bei einer Jahresgabe von 120 mm mit 1600 €/ha bzw. 13,30 €/mm angegeben. Maßgeblich sind die im Vergleich zu anderen Bewässerungstechniken hohen Investitionskosten pro Fläche (Mastel und Sourell 2004 zitiert nach Klik 2019, 9).

Auf den Versuchsplots wurden Tropfschläuche der Firma NETAFIM, Israel, mit der Produktbezeichnung "Streamline X 16080" verwendet. Der Abstand zwischen den einzelnen Schläuchen betrug 50 cm mit einem Abstand von 30 cm zwischen den einzelnen Tropfern. Bei einem Betriebsdruck von 1 Bar beträgt die aufgebrachte Wassermenge je Tropfer 0,7 Liter pro Stunde. Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigen die Ende Juni installierten Tropfschläuche in der beobachteten Versuchsparzelle.



Abbildung 11: Detailaufnahme der Tropfschläuche vom 01.07.2021



Abbildung 12: Detailaufnahme der ADCON Messstation 10950 im Bereich der Tropfbewässerung vom 01.07.2021
2.4.4.2 Unberegnet

Als Kontrollgröße dient eine unbewässerte Parzelle (siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021

2.4.4.3 Rohrnetzberegnung

Durch Evaporation und vor allem durch Winddrift reduziert sich der Wirkungsgrad von Beregnungen auf 75–80 %. Die Kosten können bei einer Jahresgabe von 120 mm mit 586 € / ha bzw. 4,90 €/ha veranschlagt werden (Mastel und Sourell 2004 zitiert nach Klik 2019, 9). Schlagpendelregner operieren bei höherem Druck als Tropfbewässerungen, ca. 3–6 Bar sind für den Betrieb notwendig (Nolz 2020, 104).

Insgesamt wurden für den Versuch sieben Regner aus Metall, welche in einem Abstand von 18 m positioniert sind, installiert. Hersteller der Regner (Modell 233 B) ist die NAAN NaanDanJain Irrigation Ltd., Indien. Der Düsendurchmesser beträgt 4,5 mm und abhängig vom Betriebsdruck an der Düse schwankt die Intensität zwischen 5,5 mm/h bei 3 Bar und 7,2 mm/h bei 5 Bar (NAANDANJAIN Ltd. 2017). Abbildung 14 zeigt eine Detailaufnahme des Regnerkopfes. Im Hintergrund ist die 30 Schlauchtrommel des Auslegerstativs zu erkennen. In Abbildung 15 sind die Regner während eines Bewässerungsereignisses am 02.07.2021 abgebildet.



Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner



Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21

2.4.4.4 Auslegerstativ

Der Gesamtwirkungsgrad wird mit 75–80 % angegeben. Dieser dürfte im Vergleich zur Schlagpendelberegnung aufgrund der höheren Intensität jedoch etwas besser sein. Als Kosten können bei einer Jahresgabe von 120 mm/Jahr 434 €/ha bzw. 3,60 €/mm angesetzt werden (Mastel und Sourell 2004 zitiert nach Klik 2019, 9).

Im Vergleich zu den bereits genannten Bewässerungsvarianten, die jeweils 18 m abdecken, deckt das Auslegerstativ mit 60 m Reichweite eine deutlich größere Feldbreite ab. Zum Einsatz kam das Modell AS 50 der Röhren- und Pumpenwerk BAUER GmbH, Österreich. Zur Schlauchaufnahme und Wasserversorgung des Auslegerstativs dient das Modell E 51 der BAUER GmbH (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17). Düsenwagen operieren bei relativ geringem Druck von unter 3 Bar. Von den installierten Bewässerungstechniken weist das Auslegerstativ allerdings die höchste Intensität auf. Diese kann, abhängig vom Betriebsdruck, Größenordnungen > 50 mm/h erreichen (Nolz 2020, 105).



Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers

Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21

2.5 Wetterdaten für 2021

Wetterdaten der Station Groß-Enzersdorf für das Jahr 2021 wurden vom Download Portal der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bezogen (ZAMG 2022c).

Der Mai 2021 war im Vergleich zum langjährigen Mittel deutlich kühler. Während langjährig 15,7°C Tagesmitteltemperatur gemessen wurden, waren es 2021 lediglich 14,0°C. Besonders Anfang Mai traten einige Nächte mit Temperaturen von weit unter 10°C auf. Deutlich wärmer hingegen war der Juni mit einer mittleren Temperatur von 21,6°C im Vergleich zum langjährigen Wert von 19,5°C. Der Juni wies sieben Hitzetage (Tmax. ≥ 30°C) auf, fünf davon am Stück vom 18.06.–22.06. Zwei Tropennächte (Tmin. ≥ 20°C) sind für Juni zu erwähnen. Nochmals wärmer war der Juli mit einer mittleren Monatstemperatur von 22,9°C. Dieser lag damit auch über dem Durchschnitt der letzten 30 Jahre. Die höchste gemessene Temperatur wurde am 08.07. dokumentiert (35,7°C). Ferner sind für den Juli 2021 elf Hitzetage und eine Tropennacht zu verzeichnen. Der August startete warm mit dem Höhepunkt von vier Hitzetagen vom 14.08.–16.08. und endete kühl mit Tageshöchstwerten um 20°C. Insgesamt fiel der August im Monatsmittel 0,8°C kühler aus als im Schnitt. Der September war im Monatsmittel 1,7°C wärmer als das langjährige Mittel. Die höchste Temperatur erreichte der September am 14.09. mit 27,8°C. Aufgrund der überdurchschnittlichen Monate Juni, Juli und September lag die mittlere Temperatur während der Vegetationsperiode bei 19.2°C und damit ein halbes Grad über dem langjährigen Mittel (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991-2020

In Abbildung 19 sind die monatlichen Niederschläge des Jahres 2021 im Vergleich zur Referenzperiode 1991–2020 als Balkendiagramm aufgetragen. In Linienform wird der kumulierte Niederschlag während der Monate Mai-September dargestellt. Für den Zeitraum Januar-April wurden 58,6 mm Niederschlag (50 % vom langjährigen Mittel) verzeichnet. Der Mai 2021 fiel mit Regenmengen von 82,2 mm nass aus. Die Niederschläge lagen um ca. 30 % über dem Durchschnitt. Im Juni trat eine 23 Tage lang andauernde Trockenperiode vom 01.06. bis zum 23.06. auf, die nur von geringen Niederschlagsmengen (1,2 mm am 12.06.) unterbrochen wurde. So fielen im Juni lediglich 22,4 mm Niederschlag, rund 31 % der zu erwartenden Menge. Deutlich ergiebiger zeigte sich der Juli mit erheblichen Niederschlagsmengen von 112,9 mm. Allein am 16.07 und 17.07. fielen durch Gewitter 60,7 mm, also mehr als die Hälfte der gesamten Monatsmenge. Der August war ebenfalls sehr regenreich und lag mit 103,4 mm fast 60 % über dem Mittel. Allein am 16.08. fielen 37,9 mm. Im September trat von 01.09-15.09. eine 15-tägige Trockenperiode auf. Erst am 16.09. fielen nach zwei Wochen mit nur 11,3 mm wieder nennenswerte Mengen. Der gesamte September brachte 29,2 mm Niederschlag und blieb somit hinter dem langjähren Mittel (62,4 mm) zurück. Aufsummiert ergibt sich eine Niederschlagssumme von 350,1 mm für die Monate Mai-September.



Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020

Abbildung 20 stellt die Tagesdurchschnittswerte der Globalstrahlung jeden Monats gegenüber. Erwartungsgemäß ist die Strahlung aufgrund der Tageslänge im Juni am höchsten. Der niederschlagsreiche Mai wies 2021 weniger auf als der Durchschnitt. 16,54 (MJ m⁻²)/Tag stehen 20,47 (MJ m⁻²)/Tag zu erwartenden gegenüber. Im heißen, trockenen Juni wurden 25,19 (MJ m⁻²)/Tag erfasst, deutlich mehr als in der Referenzperiode mit 21,46 (MJ m⁻²)/Tag. Der Juli 2021 unterschied sich kaum von den Aufzeichnungen der Jahre 1991-2020: 22,24 (MJ m⁻²)/Tag stehen 21,51 (MJ m⁻²)/Tag gegenüber. Der Monat August 2021 war mit 16,70 (MJ m⁻²)/Tag strahlungsärmer als zu erwarten (18,79 (MJ m⁻²)/Tag). Der September 2021 wich mit 13,86 (MJ m⁻²)/Tag etwas vom langjährigen Mittel ab und lag knapp über dem Wert von 12,78 (MJ m⁻²)/Tag.



Abbildung 20: Durchschnittliche Tagesglobalstrahlung eines Monats 2021/1991-2020

Die potentielle Evapotranspiration erreicht im Juni mit durchschnittlich 6 mm/Tag 2021 ihren Höhepunkt (Abbildung 21). Hohe Strahlungswerte, die den sensitivsten Parameter der Verdunstung darstellen (Sulerz 2013, 29), und die damit vorhandene Energie in Kombination mit warmen Temperaturen führen zu dem deutlich über dem Schnitt liegenden Wert von 4,8 mm/Tag. Grundsätzlich spiegelt Abbildung 21 das Muster von Abbildung 20 wider. Im Juli 2021 könnten potentiell 5,8 mm/Tag über einer Referenzfläche verdunsten. Auch im Juli 2021 lagen Temperatur und Globalstrahlung über den für Juli zu erwartenden Werten, sodass die langjährige Rate von 5,2 mm/Tag überschritten wurde. Im Mai hätten bei optimaler Wasserversorgung 3,6 mm/Tag verdunsten können, weniger als die für Mai üblichen 4 mm/Tag des 30-jährigen Mittels. Im August 2021 betrug die Referenzverdunstung 3,8 mm/Tag und damit weniger als im Durchschnitt (4,3 mm/Tag). Für den September stehen sich 3,0 mm/Tag für 2021 und 2,7 mm/Tag gegenüber. Aufsummiert beträgt die ETo für die Monate Mai–September 2021, bedingt durch die stark erhöhten Werte in Juni und Juli, 680 mm.



Abbildung 21: Mittlere tägliche ETo eines Monats 2021/1991-2020

Für Mai bis September ergibt sich aus den gemessenen Niederschlägen und berechneten Werten der potentiellen Evapotranspiration eine negative klimatische Wasserbilanz von 330 mm (Abbildung 22).



Abbildung 22: Klimatische Wasserbilanz Mai-September 2021

In Anhang B sind die Wetterdaten für 2021 (Mai-September) auf Tagesbasis graphisch dargestellt zu finden. Diese Daten sind die Eingangsparameter für die Kalkulation der ETo.

2.6 Genutzte Software-Programme und deren Anwendung

2.6.1 ETo-Calculator

Die Referenz-Evapotranspiration (ETo) setzt sich zusammen aus der Evaporation, der Wasserverdunstung von unbewachsenen Oberflächen und der Transpiration, also dem Verdunsten von Wasser durch Pflanzen. Berechnet wurde die ETo mit Hilfe des ETo-Calculators der FAO. Dieser verwendet zur Berechnung die FAO-Penman-Monteith Formel gemäß FAO-Paper 56 (Allen et al. 1998). Als Eingangsgrößen dienen Temperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlungsdaten. Die Berechnung erfolgt für eine sogenannte Referenzfläche. Diese ist großflächig und gleichmäßig mit 12 cm hohem geschnittenen Gras bewachsen, welches ausreichend Wasser und Nährstoffe zur Verfügung hat (Allen et al. 1998). Die Umrechnung in pflanzentypische Werte erfolgt anhand von eingeführten Faktoren (Kc-Werte). Diese Kc-Werte sind pflanzenspezifisch und abhängig vom jeweiligen Entwicklungsstadium der Pflanze. Die somit angepasste Evapotranspiration wird als ET_C bezeichnet.

Für die Simulationen mit CropWat wurden drei Klimaszenarien erstellt und die entsprechende ETo mit dem ETo-Calculator errechnet. Zur Verfügung stand eine Zeitreihe von 14 Jahren (2000–2013) Klimadaten in täglicher Auflösung bezogen auf die Station Groß-Enzersdorf. Das Szenario "trocken" enthält die drei trockensten Jahre dieser Zeitreihe (2001, 2003 & 2011), das Szenario "nass" die drei niederschlagsreichsten (2002, 2007 & 2010) und das Szenario "Durchschnitt" alle Jahre. Die täglich berechnete ETo diente neben dem Niederschlag als Eingangsdaten zur Beschreibung des Klimas in CropWat. Tabelle 4 gibt Auskunft über die Ergebnisse der ETo-Kalkulation. Tabelle 4: Die wichtigsten klimatischen Kenngrößen der drei betrachteten Klimaszenarien. Ergänzt um die Daten des Jahres 2021 und der Referenzperiode 1991-2020. Alle Daten beziehen sich auf den Vegetationszeitraum von Mai–September.

	Trocken	Durchschnitt	Nass	2021	1991–2020
T _{mittel} /°C	19,3	18,9	18,9	19,2	18,7
Niederschlag/mm	266	340	451	350	336
ETo/mm	631	610	610	680	630
KWB/mm	-365	-270	-159	-330	-294

2.6.2 CropWat

CropWat ist ein von der FAO angebotenes Entscheidungshilfesystem zur Kalkulation des Pflanzenwasserbedarfs und zur Bewässerungsplanung basierend auf Boden-, Klima- und Pflanzendaten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Programm für eine erste Einschätzung des Bewässerungsbedarfs und der maximal möglichen Boden-austrocknung verwendet. CropWat baut unmittelbar auf dem FAO-Ansatz zur Berechnung des Pflanzenwasserbedarfs auf. Um die tatsächliche Pflanzenverdunstung zu berechnen, wird ergänzend zu den bereits erwähnten Kc-Werten ein weiterer Faktor eingeführt, der die Verfügbarkeit des Bodenwassers in Abhängigkeit der gewählten Pflanze beschreibt, genannt Ks-Faktor. Für gängige Kulturpflanzen ist in der CropWat Datenbank die sogenannte *critical depletion* hinterlegt. Diese gibt in Prozent an, wie weit das zur Verfügung stehende Bodenwasser, je nach Entwicklungsstadium, genutzt werden kann, bevor es zu einer Reduktion der Verdunstungsleistung kommt. Wird die *critical depletion* nicht überschritten, ergibt sich der Ks-Faktor mit 1, beim PWP liegt der Ks-Faktor bei 0. Die reale Pflanzenverdunstung wird vom FAO-Modell demnach wie folgt berechnet:

$$\mathsf{ET}_{\mathsf{C} \operatorname{adj}} = \mathsf{ET}_{\mathsf{o}} \mathsf{x} \mathsf{K}_{\mathsf{C}} \mathsf{x} \mathsf{K}_{\mathsf{S}} \tag{1.}$$

CropWat berechnetet keinen absoluten Ertrag, sondern lediglich eine Ertragsreduktion in Prozent aus dem Verhältnis von potentieller zu tatsächlicher Verdunstung wie folgt (Doorenbos, Kassam, Bentvelsen, Branscheid, Plusje, et al. 1979, 1):

$$\left(1 - \frac{Ya}{Ym}\right) = ky\left(1 - \frac{ETa}{ETm}\right)$$
(2.)

39

Ya	=	tatsächlich geernteter Ertrag
Ym	=	maximal möglicher Ertrag. Vom Modell anhand Wetterdaten berechnet
ky	=	Ertragsreduktionsfaktor. Abhängig von Pflanze und Entwicklungsstadium
ETa	=	tatsächliche Pflanzenverdunstung
ETm	=	potentielle Pflanzenverdunstung (= ETc)

2.6.2.1 Festlegung von Austrocknungszuständen

Anhand der vorliegenden Retentionskurven wurde die Austrocknung des Bodens ermittelt, die sich bei einem bestimmten Matrixpotential einstellt. Dazu wurde vom Wasseranteil der FK (pF 2,5) derjenige Wasseranteil abgezogen, der sich beim gewollten Matrixpotentialwert einstellt. Durchgeführt wurde dies für Werte von 50, 100, 150 und 200 kPa. In CropWat wurde der so bestimmte Wert als management allowed depletion (MAD) eingestellt. Ist dieses Wasser durch Verdunstung verbraucht, wird ein Bewässerungsereignis einberechnet. In Tabelle 5 sind alle berechneten und zur ersten Bewässerungsplanung verwendeten Werte für unterschiedliche Bodenprofiltiefen, die als effektive Wurzelzone angesehen wurden, dargestellt. Betrachtet wurden dabei drei verschiedene Bodentiefen (40, 60 und 100 cm). Für die jeweilige Bodenmächtigkeit wurden in weiterer Folge die zulässige Austrocknung berechnet. Standardmäßig ist in CropWat für Mais eine maximale Wurzeltiefe von 1 m, die zum Blühbeginn erreicht wird, hinterlegt. Das Gros der Wurzelmasse befindet sich jedoch in den oberen 30-40 cm (Bodner und Himmelbauer 2012, 176). In Anlehnung an bestehende Grenzwerte (Absatz 3.1) wurden zusätzlich eine Durchwurzelungstiefe von 60 cm miteinbezogen, da bis zur Blüte diese Tiefe von den Autoren als durchwurzelter Raum angenommen und zur Bewässerungssteuerung herangezogen wird. Bei einer Bodenwasserspannung von 150 kPa sind rund 50 % des pflanzenverfügbaren Wassers verbraucht.

Tabelle 5: Übersicht über die Erlaubte Austrocknung (MAD) in mm für jede Station und die betrachteten Bodenprofiltiefen (100, 60, 40 cm). TAW (*Total available water*) gibt die nutzbare Feldkapazität an. RAW (*Readily available water*) beschreibt das leicht pflanzenverfügbare Bodenwasser (50 % nFK).

		TAW	RAW	MAD			
				50	100	150	200
				kPa	kPa	kPa	kPa
		mm	mm	mm	mm	mm	mm
	100 cm	121,1	60,6	21,9	46,1	58,7	68,8
DI	60 cm	72,7	33,4	13,2	27,7	35,2	41,3
	40 cm	48,5	24,2	8,8	18,5	23,5	27,5
	100 cm	127,4	63,7	20,3	47,8	61,0	71,7
NI	60 cm	76,4	38,22	12,2	28,7	36,6	43,0
	40 cm	51,0	25,5	8,1	19,1	24,4	28,7
	100 cm	126,2	63,1	20,7	48,3	61,4	72,1
SI	60 cm	75,7	37,9	12,4	29,0	36,9	43,2
	40 cm	50,5	25,2	8,3	19,3	24,6	28,8
	100 cm	111,3	55,63	19,2	41,0	52,4	61,7
BI	60 cm	66 <i>,</i> 8	38,4	11,5	24,6	31,5	37,0
	40 cm	44,5	22,3	7,7	16,4	21,0	24,7

2.6.2.2 Pflanzenparameter

In Abbildung 23 sind die zur Simulation in CropWat verwendeten Pflanzenparameter abgebildet. Diese wurden als Standardwerte übernommen und nicht verändert. Die Wurzeltiefe wurde bei einem Meter belassen. Der durchwurzelbare Raum wurde über die jeweiligen Boden-files gesteuert und dort mit 40, 60 und 100 cm angegeben.



Abbildung 23: Übersicht über die in CropWat zur Simulation verwendeten Pflanzenparameter

2.6.2.3 Abschätzung des Wasserbedarfs und der Ertragsreduktion

Insgesamt wurden mit CropWat 117 Simulationen durchgeführt. Jede Retentionskurve wurde kombiniert mit den drei verschiedenen Wurzeltiefen, den drei Klimaszenarien und den gewünschten Grenzwerten. Eine Ausnahme bildet NI, denn dort wurden keine Grenzwerte simuliert, sondern nur die in Abhängigkeit von Klimaszenario und Wurzeltiefe zu erwartende Ertragsreduktion. Der höchste Pflanzenwasserbedarf ergibt sich mit 566 mm beim trockenen Klimaszenario, 552 mm für ein durchschnittliches Jahr und 548 mm für das eher niederschlagsreiche Szenario.

Die Effizienz wurde bei der Tropfbewässerung mit 90 %, bei Regner-Systemen mit 75 % gewählt. Als Einzelgaben wurden bei Beregnungen 30 mm und bei Tropfbewässerung 35 mm gewählt. Je nach erlaubter Austrocknung abhängig von Wurzeltiefe und Grenzwert wurden die Wassergaben angepasst.

Für die nicht bewässerten Flächen wurde eine Ertragsreduktion, je nach Szenario, von 24 % (nass, 1 m Wurzelraum) bis 64 % (trocken, 40 cm Wurzelraum) prognostiziert.

Bei den bewässerten Varianten zeigten sich insgesamt keine Ertragsreduktion, auch nicht bei einem Startwert von 200 kPa, bei dem das leicht verfügbare Bodenwasser überstrapaziert wird. Zu bedenken gilt allerdings, dass, sobald die erlaubte Austrocknung erreicht ist, der Wasserspeicher unverzüglich aufgefüllt wird. Betriebliche Eigenschaften wie die Verfügbarkeit von Bewässerungslagen, Wasser oder Arbeitskraft bleiben unberücksichtigt. Da bei den beiden höheren Startwerten keine Ertragsreduktion auftrat, wurden 50 & 100 kPa aufgrund ihres hohen Wasserbedarfs und der großen Anzahl an Einsätzen von der weiteren Analyse ausgeschlossen und der Fokus auf die Grenzwerte 150 und 200 kPa gelegt.

2.6.3 Festlegung effektive Wurzelzone

Aus Abbildung 24 geht hervor, dass in den ertragssensiblen Wachstumsphasen vom Blühbeginn (VT 1) bis zur Kornfüllung (R4–R5) der Großteil der Wasseraufnahme aus einer Tiefe von bis zu 50 bis 70 cm erfolgt. Ferner beträgt die Mächtigkeit des lehmigen Bodens gemäß eBOD in etwa 65 cm (Abbildung 5), danach ist mit sandigem Material zu rechnen. Da die nutzbare Feldkapazität von Sandböden eher gering ist und

zu dieser Bodenschicht keine pF-Kurven vorlagen, und somit nicht eindeutig war, welchen Beitrag diese Schicht zur Pflanzenversorgung leisten kann, wurde sie nicht berücksichtigt, um das pflanzenverfügbare Bodenwasser nicht zu überschätzen. Zur Bewässerungssteuerung wird in dieser Masterarbeit deshalb eine effektive Wurzeltiefe von **60 cm** als relevant angenommen.



Planzen, Bodenwasseraufnahme, Wurzelentwicklung und Aufnahmeverteilung Abbildung 24: Wasseraufnahme des Mais im Laufe der Vegetationszeit, Wurzelentwicklung und Aufnahmeverteilung (zitiert nach Cepuder, 2021)

2.6.4 Hydrus-1D

Hydrus-1D ist ein an der University of California, Riverside, USA, entwickeltes Programm zur Simulation des Transports von Wasser, Wärme und gelösten Stoffen in eindimensionalen, unterschiedlich gesättigten Medien. Fließbewegungen werden nummerisch anhand der Richards-Gleichung gelöst (Simunek et al. 2013, V). Mit Hilfe von Hydrus-1D wurde unter Berücksichtigung der van-Genuchten-Parameter das Matrixpotential in verschiedenen Tiefen bei bestimmten Wasseranteilen bestimmt.

Durch die Verwendung von Hydrus 1D sollte festgestellt werden, welches Matrixpotential in 20 cm Tiefe bei verschiedenen Austrocknungszuständen (150 & 200 kPa) in der betrachteten effektiven Wurzelzone (0–60 cm) herrscht. Als Startwert der Simulationen wurde ein Bodenwassergehalt angenommen, welcher der Feldkapazität entspricht. Es wurde weiterhin angenommen, dass dem Boden durch Wurzel Wasser entzogen wird, dementsprechend wurde in Hydrus 1D die Einstellung "Root Water Uptake" (Feddes-Model für Mais) aktiviert. Als Eingangsgröße dienen die in Tabelle 2 abgebildeten van-Genuchten-Parameter und als untere Randbedingung wurde eine freie Drainage unterstellt. Als zeitabhängige Randbedingung wurde die Austrocknung als konstant über 10 Tage angegeben, sodass nach 10 Tagen Wasserentzug die, je nach Grenzwert, gewünschte Austrocknung erreicht wurde. Zielgröße waren die Matrixpotentiale in 20, 40 und 60 cm.

Die Feldkapazität in Hydrus 1D wird vom Programm selbst berechnet und weicht daher von der angenommenen FK bei pF 2,5 ab, auf der die zuvor getroffenen Annahmen und Berechnungen fußen (Simunek et al. 2013, 35). Grundsätzlich liegen die mit Hydrus 1D berechneten Feldkapazitäten über denen bei pF 2,5. Würde nun ausgehend von der FK bei 2,5 die erlaubte Austrocknung vom Wassergehalt abgezogen, wäre bereits eine teils deutliche Austrocknung impliziert, die zu überhöhten Ψ_m -Werten in 20 cm führen würde. Da die Verläufe der Retentionskurven aus dem Labor und der mit Hydrus 1D erstellten bis auf die Feldkapazität sehr ähnlich waren, wurden die nachfolgenden Simulationen exemplarisch anhand der NI-Kurve durchgeführt, da die Differenz der Feldkapazitäten dort am geringsten ausfiel. Für einen Grenzwert von 200 kPa ist eine Austrocknung von 43 mm, für 150 kPa eine Austrocknung von 36,6 mm berücksichtigt worden (Tabelle 5). Daraus ergab sich ein Matrixpotential von 125 kPa in 20 cm Tiefe für den höheren Grenzwert und 95 kPa für den niedrigeren. In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind exemplarisch die berechneten Matrixpotentiale für drei Bodentiefen bei einem Grenzwert von 200 kPa sowie der volumetrische Wasseranteil abgebildet.

Observation Nodes: Pressure Heads



Abbildung 25: Matrixpotentiale für 20 (schwarz), 40 (blau) und 60 (grün) cm der Kurve NI. Berechnet in Hydrus 1D für eine gesamte Austrocknung um 43 mm.



Abbildung 26: Volumetrischer Wasseranteil in 20 (schwarz), 40 (blau) und 60 (grün) cm Tiefe der Kurve NI bei einer gesamten Austrocknung um 43 mm.

2.6.5 RETC

RETC wurden von den Hydrus-1D Autoren entwickelt. Das Programm ermöglicht es unter anderem anhand gemessener Werte (Wasseranteil und Matrixpotential) pF-Kurven zu erstellen und die dazugehörigen van-Genuchten-Parameter zu bestimmen. Das Modell arbeitet mit den parametrischen Modellen von Brooks-Corey und van Genuchten, um die Retentionskurven zu erstellen. Zur Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit zieht es die Porengrößenverteilungsmodelle von Mualem und Burdine heran (van Genuchten, Leij, und Yates 1991, iii). RETC wurde verwendet, um die zur Vervollständigung der Wasseranteilsdaten notwendigen in-Situ-Kurven zu erstellen (*gap filling*).

Da die Messreihen der HydraProbe und damit des volumetrischen Wasseranteils leider unvollständig waren, sollten diese anhand der vollständig vorliegenden Ψ_m -Werte bestimmt werden. Als statistisches Gütemaß wurde aus den vorhandenen und neu bestimmten Wasseranteilen der Nash-Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE) berechnet. Der NSE reicht von $-\infty$ bis 1, wobei ein Wert von 1 eine perfekte Übereinstimmung von Beobachtung und Modell signalisiert (Schulz 2019, 15). Mit RETC wurden neue pF-Kurven (In Situ Kurven) anhand der gemessenen Daten von HydraProbe und Watermark erstellt. Als Modell-Typ wurde van Genuchten/Mualem gewählt und als Startwerte der nötigen Iterationen die Standardwerte des Programms für Lehm.

Folgende Abbildungen (Abbildung 27 bis Abbildung 30) geben Auskunft über das beschriebene *gap filling* zur Vervollständigung der fehlenden HydraProbe Daten. Die durchgezogenen blauen Linien zeigen gemessene Wasseranteilwerte, während gepunktete blaue Linien die berechneten Werte darstellen. Zusätzlich ist in den Diagrammen der NSE angegeben. Klar ersichtlich ist der Zusammenhang zwischen Wasseranteil und Matrixpotential (rote Linie). Die Übereinstimmung der berechneten mit den gemessenen Werten ist deutlich zu erkennen, daher wird die Vorgehensweise als zulässig angenommen. Die mit RETC erstellten Kurven werden deshalb ebenfalls als plausibel angesehen, wobei auf eine Interpretation und Analyse verzichtet wird. Einzig für NI wird vom Programm keine Kurve berechnet. Vermutlich liegen die Messpunkte zu eng beieinander. Eine Gegenüberstellung der Laborkurven, RETC-Kurven und der im Feld gemessenen Punkte ist in Anhang C zu finden.



Watermark vs. HydraProbe 20 cm DI

Abbildung 27: Gap-filling Wasseranteil DI







Watermark vs. HydraProbe 20 cm SI

Abbildung 29: Gap-filling Wasseranteil SI



Abbildung 30: Gap-filling Wasseranteil BI

2.6.6 AquaCrop

Zur Evaluierung der gewählten Bewässerungsstrategie wurde das Programm Aqua-Crop verwendet. AquaCrop ist ein von der FAO entwickeltes Pflanzenwachstums- und Wasserbilanzierungsmodell und stellt die Weiterentwicklung des CropWat-Modells dar. Es wird ebenfalls zur Bewässerungsplanung eingesetzt und bietet die Möglichkeit verschiedene Managementstrategien (z.B. Bodenbearbeitung) zu überprüfen und Varianten zu vergleichen. Im Gegensatz zu CropWat werden konkrete Erträge als Ergebnis ausgegeben. Die Berechnungen basieren auf komplexen biophysikalischen Prozessen, um eine möglichst genaue Simulation der Kulturpflanzen im System Pflanze-Boden zu gewährleisten. Durch eine Vielzahl von Parametern und eine Aufteilung in Teilmodelle ist es möglich Prozesse in der Natur mit AguaCrop realistischer darzustellen als mit CropWat. Hauptsächlich wird die Ertragsbildung von wassersensitiven Stressfaktoren der Teil-Modelle beeinflusst, daher wird das Modell als waterdriven bezeichnet (Steduto et al. 2009, 426). AquaCrop verwendet wenige explizite Parameter und weitgehend intuitive Eingabevariablen, die oftmals allgemein verfügbar sind oder mit einfachen Mitteln bestimmt werden können. Viele Parameter bedürfen daher einer Kalibrierung und Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten (FAO o. J.).

Das Berechnungsschema besteht aus vier Schritten, die auf täglicher Basis ausgeführt werden.

1. Zunächst wird die Bodenbedeckung durch die Pflanze berechnet. Die Entwicklung des *Green Canopy Cover* (CC) reicht von 0 bei Aussaat bis 1 (100 %), wobei der Bodenwasseranteil berücksichtigt wird. Trockenstress führt zu einer Verzögerung in der Entwicklung bzw. zu einer Reduzierung des Bedeckungsgrades und ggfs. zu einer früheren Abreife.

2. Pflanzentranspiration: Bei guten Bodenwasserbedingungen wird die Transpiration der Pflanze (Tr) anhand der ETo multipliziert mit einem Pflanzenkoeffizienten (K_{CTr}) berechnet. Der K_C-Wert ist proportional zu CC und ändert sich daher während der Vegetationsperiode. Wasserstress wirkt sich auf die CC-Entwicklung sowie direkt auf die Tr aus.

3. *Above-ground-biomass* (Biomasse): Die Menge der produzierten Biomasse (B) ist proportional zur kumulativen Transpiration der Pflanze (ΣTr). Der Proportionalitätsfaktor wird als Wasserproduktivität (WP) bezeichnet.

4. Pflanzenertrag: Die simulierte Biomasse umfasst alle photosynthetischen Produkte, die während einer Vegetationsperiode assimiliert werden. Berechnet wird der Ertrag (Y, *yield*) aus der Biomasse und einem Ernteindex (HI, *harvest index*), der den verwertbaren Anteil der Biomasse angibt. Durch Stress wird der HI vermindert.

Prinzipiell ist das AquaCrop-Modell für Mais kalibriert, eine Anpassung an regionale Gegebenheiten oder sich ändernde Witterungsbedingungen wird allerdings empfohlen (Steduto et al. 2009, 435). Zeitgleich zu dieser Arbeit wurde im Rahmen einer anderen Masterarbeit eine Parametrisierung für Mais am Standort Groß-Enzersdorf anhand von Lysimeter-Daten für verschiedene klimatische Verhältnisse durchgeführt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden die Mais-Parameter zur Evaluierung jenen angepasst, die am ehesten den 2021 herrschenden klimatischen Verhältnissen entsprechen. In erster Linie betraf dies die Länge der einzelnen Vegetationsstufen. Beispielsweise wurde wegen der kühlen Maitemperaturen der Saataufgang auf 12 Tage nach Saattermin verschoben, im Gegensatz zu 6 Tagen der Standardeinstellung. Ebenfalls wurde der Beginn der Blüte um einige Tage, von Tag 66 auf Tag 81 nach Aussaat, verschoben (Abbildung 31). Angepasst wurde ferner die Saatdichte auf 7,4 Pflanzen m⁻² analog zur im LAKO-Bericht verwendeten Pflanzendichte, sowie die Wurzeltiefe, die zu Beginn der Blüte erreicht wird, auf maximal 90 cm in Anlehnung an die bestehenden Grenzwerte. Eine Wurzeltiefe von maximal 60 cm, wie zu Beginn dieser Arbeit angenommen, führte mehr oder weniger zu einem Totalverlust.

🙏 Crop characteristics	- [×
Description Mode Developmen	Production Fertility stress Calendar	
	JAN growing cycle Jan Feb Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov Dec day 1 after soving maturity	
Growth Stages	Length Date	
From day 1 after sowing:	3 May	
to maximum canopy cover	12	
to maximum rooting depth	23 July	
to start of canopy senesend	10 August 124	
to flowering		
Length building up HI Duration of flowering		
	✓ OK	

Abbildung 31: Angepasste Dauer der Vegetationsstufen in AquaCrop. (Smilkova, persönliche Kommunikation, 24.01.22)

Abweichend von den Simulationen in CropWat lagen für die Simulation in AquaCrop detailliertere Bodenkennwerte vor (Abbildung 32). Diese Bodendaten werden von Morales zur Simulation im Rahmen ihrer Dissertation verwendet und haben sich bei der Modellkalibrierung hinsichtlich der simulierten Erträge als zutreffender als die zu Beginn verwendeten pF-Kurven erwiesen. Schichtdicken und Kennwerte wurden anhand von Bodenproben bestimmt (Morales, persönliche Kommunikation, 25.05.22). Ferner wurde die Feldkapazität bei einem pF-Wert von 1,8 angesetzt, was zu einer höheren pflanzenverfügbaren Wassermenge führt. Würde man die Feldkapazität, der zu Beginn genutzten pF-Kurven ebenfalls bei pF 1,8 ansetzen, würden sich ähnliche Mengen an pflanzenverfügbarem Wasser ergeben.

Number soil horizons					Plot soil water 💌
5			Soil water	Stoniness	Penetrability
horizon description	thickness m	TAW mm/m	reten in fine soil PWP FC	tion fraction SAT %	hydraulic conductivity Ksat tau mm/day -
1 silt loam	0.15	226	12.3 34	.9 49.6	322.0 0.65
2 silt loam	0.15	191	14.5 33	.6 47.8	152.0 0.50
3 loam	0.30	193	14.5 33	.8 44.8	95.0 0.43
4 loam	0.30	232	11.9 35	.1 47.1	379.0 0.69
5 sandy loam	0.30	120	10.0 22	.0 41.0	1200.0 1.00

Abbildung 32: Verwendete Bodendaten in AquaCrop (Morales, persönliche Kommunikation, 03.03.22)

2.7 Kulturführung und Ernte 2021

In Tabelle 6 sind alle wesentlichen Eckpunkte der Kulturführung 2021 dargelegt. Aussaat war am 03.05., geerntet wurde am 01.10.

Bodenbearbeitung:	23.07.2020	BB1, BB2, BB3: Scheibenegge
	27.07.2020	BB1: Pflug
	27.07.2020	BB1, BB2: Grubber
Anbau Begrünung:	31.07.2020	Begrünung: Mais
Mulchen:	10.11.2020	
Bodenbearbeitung:	12.11.2020	BB1-BB4: Crosscutter Väderstad, seicht
	03.05.2021	BB1-BB3: Crosscutter Väderstad, seicht
Anbau:	03.05.2021	Sorte: Azalexx, Spät, RZ 400, Säeinstellung 75 x 18 cm
Düngung:	17.06.2021	160 kg NAC
Pflanzenschutz:	29.04.2021	nur in BB4: Herbizid Clinic Free 5 I + ÖI 0,5 I + Netzmittel 0,2 I
	02.06.2021	Herbizid MaisTer power 0,75 l
	15.06.2021	MaisTer power 0,75 l
	25.06.2021	Optikugeln (Schlupfwespen) gegen Maiszünsler mittels Drohne
	06.07.2021	Optikugeln gegen Maiszünsler mittels Drohne
Bewässerung:	02.07.2021	Tropfer 25 mm am 01.07, Rohr 58,8 mm, Stativ 23,3 mm
	09.07.2021	Tropfer 20,2 mm, Rohr 39,4 mm, Stativ 25,1 mm
Drusch:	01.10.2021	2 Reihen mit Parzellenmähdrescher

Tabelle 6: Wesentliche Eckpunkte der Kulturführung 2021 (Kastelliz und Nolz 2022; verändert)

2.7.1 Ernte Österreich

Österreichweit wurde 2021 auf 218.198 ha (2020: 212.596 ha) Körnermais angebaut. Dabei konnte eine Ernte von landesweit 2.434.896 Tonnen (2020: 2.411.926 t) eingebracht werden. Daraus ergibt sich ein flächenbezogener Ertrag von 11,16 t ha⁻¹ (2020 11,35 t ha⁻¹). Je nach Bundesland bestehen aber deutliche Unterschiede in Ertrag und Anbaufläche. In Niederösterreich betrug die Anbaufläche 76.936 ha, dagegen wurde in Vorarlberg auf lediglich 10 ha Körnermais kultiviert. Die höchsten Erträge konnten mit 11,98 t ha⁻¹ in der Steiermark erzielt werden. In Niederösterreich betrug der Durchschnittsertrag 10,99 t/ha, während in Wien mit 8,74 t ha⁻¹ und im Burgenland mit 8,76 t ha⁻¹ deutlich weniger als der landesweite Durchschnitt produziert werden konnte (Statistik Austria 2022).

2.7.2 Rohdaten Obersiebenbrunn

Angestrebt war, bei einem Reihenabstand von 75 cm und 18 cm Abstand in der Reihe, eine Saatdichte von 74.000 Pflanzen ha⁻¹, also umgerechnet 7,4 Pflanzen m⁻². Durch kühle Witterung mit Bodentemperaturen von unter 13°C in der zweiten Maihälfte und einem starken Auftreten von Drahtwürmern war der Feldaufgang stark unregelmäßig und erschwerte die Auswertung (Kastelliz und Nolz 2022, 2). Bei Bodentemperaturen von unter 13°C stellt Mais sein Blattwachstum ein (KWS Saat SE, o. J., 63).

Die Rohdaten wurden von der LFS zu Verfügung gestellt. Pro Parzelle wurde mit einem Parzellenmähdrescher eine bestimmte Fläche geerntet, die Feuchtmasse sowie die Feuchte in Prozent und die Pflanzenanzahl bestimmt. Mit der Trockenmasse der abgeernteten Fläche wurden die Erträge auf Hektar hochgerechnet. Die Pflanzendichte ergibt sich aus der abgeernteten Fläche und der erfassten Pflanzenanzahl.

In

Tabelle 7 sind die Erntedaten der beobachteten Versuchsparzellen ersichtlich. Den größten Ertrag lieferte die Parzelle der Tropfbewässerung mit einem rechnerischen Ertrag von 10,38 t ha⁻¹, gefolgt von 9,59 t ha⁻¹ der BI-Parzelle, 8,89 t ha⁻¹ der SI-Parzelle und 6,03 t ha⁻¹ der unbewässerten Parzelle. Ersichtlich ist ebenfalls die sehr unterschiedliche Pflanzendichte, welche eine Vergleichbarkeit der Daten erschwert. Eine Möglichkeit wäre den Ertrag auf eine gewünschte Pflanzenanzahl umzurechnen, was allerdings zu Fehlern führt: Pflanzen, welche mehr Platz haben, haben mehr Wurzelraum und mehr Licht, sind in ihrem Wachstum also begünstigt. In einer einfachen Hochrechnung wird dieser Effekt nicht berücksichtigt (Kastelliz, persönliche Kommunikation, 02.11.21).

	Pflanzen m ⁻²	t ha⁻¹
DI	8,39	10,38
NI	6,03	6,89
SI	7,9	8,89
BI	9,29	9,59

Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Versuchsparzellen

Zu den stattfindenden Versuchen an den landwirtschaftlichen Schulen werden von der landwirtschaftlichen Koordinationsstelle (LAKO) jährlich Berichte veröffentlicht. Die an die geplante Saatdichte angepassten und statistisch aufbereiteten Daten sind im nächsten Abschnitt beschrieben.

In von der University of Georgia durchgeführten Versuchsanbauen, die dem in Obersiebenbrunn durchaus ähneln, ging hervor, dass die Pflanzendichte sich kaum auf die benötigte Wassermenge auswirkte und dichtere Bestände nicht immer zu höheren Ernten führen (Orfanou, Pavlou, und Porter 2019, 1). Der Versuchsanbau verglich konservative mit bodenschonender Bodenbearbeitung sowie Bodenwasserstatus gesteuerte Bewässerung mit einer Wasserbilanzierungs-Methode.

2.7.3 Erntedaten gemäß LAKO-Bericht

Der höchste Ertrag konnte auf den mit dem Auslegerstativ bewässerten Feldern erreicht werden, gefolgt von der Rohrnetzberegnung und Tropfbewässerung. Erwartungsgemäß wurde der geringste Ertrag in den unbewässerten Bereichen produziert. Bei den Bodenbearbeitungsvarianten zeigte sich die Direktsaat am ertragsreichsten, gefolgt von reduzierter, konventioneller und minimierter Bodenbearbeitung. Die beste Wassernutzungseffizienz der Bewässerungen wurde in den unberegneten Parzellen ermittelt. Am ineffizientesten zeigte sich die Rohrnetzberegnung. Tabelle 8 berücksichtigt alle 48 Versuchsparzellen. Die Werte der Bewässerungen wurden über alle Bodenbearbeitungsvarianten hinweg ermittelt, ebenso die Bodenbearbeitungsvarianten über alle Bewässerungen hinweg.

Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereffizienz, sortiert nach Bewässerung (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (Kastelliz und Nolz 2022, 2)

	Ertrag Trockenmasse Korn kg/ha			Wassereffizienz g/m ²				
	Bewässerung		Bodenbearbeitung		Bewässerung		Bodenbearbeitung	
Variante	BW	% des Ø	BB	% des Ø	BW	% des Ø	BB	% des Ø
1 Tropfer/konventionelle Bodenbearbeitung	9308	96	9486	98	3,145	96	3,193	98
2 unbewässert/reduzierte Bodenbearbeitung	9007	93	9965	103	3,589	110	3,366	103
3 Rohrnetz/minimierte Bodenbearbeitung	10105	105	9072	94	2,895	89	3,060	94
4 Auslegerstativ/Direktsaat	10250	106	10148	105	3,428	105	3,437	105
MW des Versuches	9668				3,264			

Die Messstationen befinden sich in Parzellen mit minimierter Bodenbearbeitung (BB 3). Tabelle 9 zeigt die Erntedaten 2021 der verschiedenen Kombinationen aus Bewässerungsstrategie und Bodenbearbeitung. Gelb markiert ist BB 3. Diese Werte werden als Referenzwerte zur Beurteilung der Bewässerungsstrategie herangezogen, um Effekte der Bodenbearbeitung auszuschließen, da diese nicht Gegenstand dieser Arbeit sind. Dennoch soll an dieser Stelle kurz auf das Gesamtergebnis des Versuchs 2021 eingegangen werden. Als beste Kombination hinsichtlich der Ernte zeigte sich mit einem Ertrag von 116 % des Versuchsmittelwerts (MW) die Kombination aus Auslegerstativ und reduzierter Bodenbearbeitung. Die Kombination aus Auslegerstativ und Direktsaat zeigte sich mit 113 % des MW ebenfalls deutlich überdurchschnittlich. Schlusslicht ist die Kombination aus minimierter Bodenbearbeitung und keiner Beregnung mit lediglich 85 % des Mittelwerts.

Betrachtet man die Wassernutzungseffizienz, weisen die unberegneten Parzellen die besten Werte und in Kombination mit Direktsaat beachtliche Erntemengen auf. In dieser Kombination konnten bei einer Effizienz von 4,1 (g m⁻²) / mm rund 10,3 t ha⁻¹ Körnermais produziert werden. Damit lag die Wassernutzungseffizienz dieser Kombination bei 126 % des Mittelwerts der Effizienz und bei 103 % des Erntedurchschnitts. Bewässerung kann zu einer gesteigerten Maisproduktion beitragen. Allerdings kann eine Erhöhung der Wassergaben nicht direkt mit höheren Erträgen gleichgesetzt werden (Orfanou, Pavlou, und Porter 2019, 1). Es gilt zu beachten, dass im LAKO-Bericht Wetterdaten der Wetterstation Obersiebenbrunn verwendet wurden. Zu den Abweichungen gegenüber der in der vorliegenden Masterarbeit verwendeten Station Groß-Enzersdorf sei auf Abschnitt 2.4.2 verwiesen.

Mit einem Gesamtmittelwert des Versuchs von 9,67 t ha⁻¹ liegen die Erträge unter dem Österreich- und Niederösterreichschnitt, aber ca. 1 t über denen des Burgenlandes und Wiens (Statistik Austria 2022).

ARM AOV Mittelwerttabelle		Trockenr	nasse K	orn in k	g/ha		Eff	izienz i	in g/m² i	und Lit	er Was	ser
Variante	sign. Abw.	MW	% MW	Min	Max	Median	sign. Abw.	мw	% MW	Min	Max	Median
1BW1BB1	а	9296	96	8398	10320	9169	b-e	3,1	95	2,8	3,5	3,1
2BW1BB2	а	9652	100	9252	10034	9669	b-e	3,3	101	3,1	3,4	3,3
3BW1BB3	a	9546	99	8266	10379	9993	b-e	3,2	98	2,8	3,5	3,4
4BW1BB4	а	8738	90	5668	10417	10130	cde	3	92	1,9	3,5	3,4
5BW2BB1	а	8543	88	8079	9449	8100	bcd	3,4	104	3,2	3,8	3,2
6BW2BB2	а	9025	93	7132	10480	9462	abc	3,6	110	2,8	4,2	3,8
7BW2BB3	а	8184	85	7679	8635	8238	b-e	3,3	101	3,1	3,4	3,3
8BW2BB4	а	10278	106	9746	10571	10518	а	4,1	126	3,9	4,2	4,2
9BW3BB1	а	10334	107	9066	11102	10835	cde	3	92	2,6	3,2	3,1
10BW3BB2	а	9977	103	8518	11155	10257	de	2,9	89	2,4	3,2	2,9
11BW3BB3	a	9413	97	8894	9691	9654	e	2,7	83	2,5	2,8	2,8
12BW3BB4	а	10697	111	10052	11288	10752	b-e	3,1	95	2,9	3,2	3,1
13BW4BB1	а	9772	101	8976	10231	10108	b-e	3,3	101	3	3,4	3,4
14BW4BB2	а	11208	116	10665	12242	10716	ab	3,7	113	3,6	4,1	3,6
15BW4BB3	а	9146	95	6759	11085	9593	cde	3,1	95	2,3	3,7	3,2
16BW4BB4	а	10877	113	10562	11086	10983	abc	3,6	110	3,5	3,7	3,7
Gesamtmittelwert		9667,8						3,26				

Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Gegenüberstellung der verschiedenen Varianten, wobei die Werte der reduzierten Bodenbearbeitung (BB3) gelb markiert sind. (Kastelliz und Nolz 2022, verändert)

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Ergebnis der Literaturrecherche zu bestehenden Grenzwerten

Für einige Kulturpflanzen existieren empfohlene Messtiefen und optimale Matrixpotentialbereiche, die unabhängig vom Boden angewandt werden können, da die Information und Aussagekraft des Matrixpotentials prinzipiell von Boden zu Boden übertragbar ist (MMM tech support GmbH & Co. KG 2020, 4; Mosler o. J. zitiert nach Hageneder und Beck 2014, 48). Auf diesem Wege festgelegte Grenzwerte eignen sich aber tendenziell nicht für Defizitstrategien, da sie mit 10-50 kPa doch eher im feuchten Bereich bzw. teilweise im Bereich der Feldkapazität anzusiedeln sind. Bei der Defizitbewässerung wird die ausgebrachte Wassermenge bewusst unterhalb des Wasserbedarfs gehalten, der ein optimales Pflanzenwachstum ermöglich würde, um die Wassernutzungseffizienz zu erhöhen. Eine andere Herangehensweise zur Grenzwertfindung behandelt die Frage wie viel Wasser der Boden den Pflanzen leicht verfügbar anbieten kann und welches Matrixpotential zu diesem Zeitpunkt herrscht (Irmak et al. 2016). Die dritte Herangehensweise (u. a. Pringel et al. 2017) basiert auf Versuchen, bei denen Bewässerungsereignisse anhand verschiedener Grenzwerte initiiert wurden. Ferner nehmen Faktoren wie die gewollte Strategie (Defizit- oder Vollbewässerung), Ausstattung der Betriebe oder grundsätzliche Ziele wie Ertragssteigerung oder Ertragserhalt Einfluss auf die Grenzwertfindung. Eine allgemeingültige Aussage ist daher schwer zu treffen.

Es existieren bereits einige Grenzwerte in der Literatur, die zur Bewässerungssteuerung herangezogen werden können. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Literaturrecherche für Mais inklusive der Messtiefen und der Matrixpotentialwerte in kPa, welche nicht überschritten werden sollten, abgebildet. Um den Bodenwasserstatus in der Wurzelzone möglichst genau darzustellen und den größten Informationsgehalt zu erreichen, bieten sich mehrere Messtiefen an. Wird nur in einer Tiefe gemessen, so wird der Bodenwasserstatus in der Wurzelzone unter Umständen missinterpretiert. Es besteht die Gefahr, den Wasserbedarf zu überschätzen, wenn nur Messwerte aus oberen Schichten verwendet werden, da diese in der Regel trockener sind als tiefere durchwurzelte Bereiche und durch eine übermäßige Wassergabe Perkolation aus der Wurzelzone erzeugt wird (Henggeler, o. J., 22). Wie die Messwerte zu interpretieren bzw. zu verrechnen sind beschreiben die folgenden Abschnitte. In welcher Tiefe die Sensoren installiert werden, hängt maßgeblich von den kultivierten Pflanzen und ihrer effektiven Wurzelzone ab.

Generell beschreiben alle Autoren die Wahl des richtigen Standorts der Messungen als entscheidend und schwer, da eine für das gesamte Feld repräsentative Stelle gefunden werden muss, sofern man die Anzahl an Sensoren geringhalten möchte.

Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche zu bestehenden Grenzwerten zur Bewässerungssteuerung für Mais.

Autoren	Publikation	Messtiefen (cm)	Grenzwert (kPa)
Irmak	Soil Water Content- and Soil Ma- tric Potential-Based Irrigation Trigger Values for Different Soil Types (2019)	30, 60 & 90	90 bis 100 Arithmetisches Mittel
Mosler zitiert nach Hagene- der und Beck	Abschlussbericht Projekt "Opti- mierung der Bewässerung für den Freilandgemüseanbau" (2014)	20	10 bis 45 Einzelmessung
Roach und Gholson	Utilizing Moisture Sensors to In- crease Irrigation Efficiency (2016)	15, 30, 60 & 90	80 bis 100 Gewichtetes Mittel
Pringel et al.	Initiation of Furrow Irrigation in Corn on a Dundee/Forestdale Silty Clay Loam Soil with and without Deep Tillage (2017)	23, 46 & 69	50 bis 100 Arithmetisches Mittel
Orfanou et al.	Maize Yield and Irrigation Applied in Conservation and Conventional Tillage at Various Plant Densities (2019)	20, 40 & 60	30 bis 35 Gewichtetes Mittel
Heggeler	Irrigation scheduling (o .J.)	20 bis 30	50 bis 80 Einzelmessung
Stenitzer	Irrigation scheduling with gypsum blocks in Austria (o. J.)	10 bis 20	200 Einzelmessung

Irmak 2019 geht als einziger Autor detailliert auf verschiedene Bodentypen ein und empfiehlt typabhängig abweichende Grenzwerte. Gewählt wurde die Bodenart, die am ehesten den in Obersiebenbrunn vorkommenden wiedergibt. In diesem Fall wurde *U-pland silt loam* gewählt, der mit einer Feldkapazität von 32,2 Vol.-% und einem PWP von 17,3 Vol.-% den in Abbildung 6 dargestellten pF-Kurven recht nahe kommt. Von

Irmak (2019) angegebene Werte basieren auf langjährigen Untersuchungen der University of Nebraska-Lincoln. Dabei werden insgesamt drei Sensoren jeweils mit einem Fuß (1 ft = 30,48 cm) Abstand zueinander installiert. Zur Bewässerungssteuerung wird vor der Maisblüte der Mittelwert der ersten beiden Sensoren in 30 cm und 60 cm Tiefe herangezogen. Danach wird der Mittelwert aller Sensoren als Grenzwert berücksichtigt (Irmak 2019). Als Grenzwert werden 90-100 kPa, die nicht überschritten werden sollten, angegeben. Für leichte Böden wie Sand oder lehmigen Sand gibt der Autor deutlich geringere Werte zwischen 20-30 kPa an. Ziel ist ein Bewässerungsstart bevor 50 % der nFK verbraucht sind. Von einer Austrocknung bis auf 50 % nFK wird abgeraten, da es je nach Betriebsstruktur einige Tage in Anspruch nimmt, bis die entsprechenden Flächen bewässert werden (Umlaufzeit Bewässerungsturnus) und es somit zu einer ertragsreduzierenden Austrocknung kommen kann. Die Werte wurden so berechnet, dass eine Austrocknung von 35 % der FK zugelassen wird und keine Ernteeinbußen auftreten (Irmak et al. 2016, 10). Eindeutig Bezug auf bestimmte Pflanzen wird nicht genommen. Im Versuchsanbau mit Mais haben diese sich aber bewährt (Irmak 2019).

Das bayerische Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Landshut hat in Zusammenarbeit mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und der bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau in einem dreijährigen Forschungsprojekt an verschiedenen Standorten in Bayern Aspekte der Bewässerung und der Bewässerungssteuerung untersucht. Ziel des Projektes war für Anbauer geeignete Verfahren und Messinstrumente zu identifizieren und etablieren, um eine bedarfsgerechte nach objektiven Kriterien gesteuerte Bewässerung sicherzustellen. Der Fokus lag vor allem auf den Freilandgemüseanbau. Neben Grundlagen zu Bewässerungssystemen wird auch auf Bodenwasserstatussensoren Bezug genommen. Der Bericht enthält zusätzlich Ergebnisse des dreijährigen Versuchsanbaus und geht auf die Unterschiede zur Interpretation der Messergebnisse ein. So raten die Autoren bei intensivbewässerten Kulturen (Salat, etc.) eher zur Verwendung von Tensiometern als Watermark-Sensoren (Hageneder und Beck 2014, 77). Als optimaler Matrixpotentialbereich wird für Zuckermais bei einer Messung in 20 cm Tiefe 100-450 hPa (10-45 kPa) angegeben (Mosler o. J. zitiert nach Hageneder und Beck 2014, 48). In vom Bewässerungsforum Bayern veröffentlichten Beratungsblättern zum Thema Bodenwasserstatuserfassung weisen die Autoren allerdings daraufhin, dass bei Bewässerungssteuerung anhand solch niedriger Bodenwasserspannungen die Gefahr von Versickerung und Nitratauswaschung besteht. Soll eine Defizitbewässerungsstrategie angewandt werden, so sind die Startwerte höher zu wählen (Beck et al. 2021, 5).

Nachfolgender Grenzwert bezieht sich auf Feldversuche der Mississippi State University. Für die dortigen "Mississippi-Böden" werden 80 bis 100 kPa als Schwellenwert empfohlen. Genauere Angaben zu den Bodeneigenschaften sind der Quelle leider nicht zu entnehmen. Für ältere Bewässerungsanlagen mit limitierter Kapazität sollten die Grenzwerte um 20 kPa herabgesetzt werden. Um die gesamte effektive Wurzelzone zu berücksichtigen, werden bis zu vier Sensoren in Bodentiefen von 6, 12, 24 und 36 Zoll installiert. Dies entspricht Tiefen von ca. 15, 30, 60 und 90 cm. Je nach Wuchsfortschritt der Wurzel wird das gewichtete Mittel aus den abgelesenen Sensorwerten gebildet. Liegt die Wurzeltiefe beispielsweise bei 12 Zoll, werden die Messwerte der 6 und 12 Zoll Sensoren mit einem Faktor von 50 % multipliziert und zum Wert des durchschnittlichen Matrixpotentials aufaddiert. Beträgt die Wurzeltiefe 24 Zoll, werden die ersten beiden Sensoren mit 25 % berücksichtigt, während der 24 Zoll tiefe Sensor mit 50 % in die Berechnung einfließt. Die Faktoren für die maximale Wurzeltiefe von 36 Zoll ergeben sich wie folgt: 6 Zoll = 17 %, 12 Zoll = 17 %, 24 Zoll = 33 %, 36 Zoll = 33 % (Roach und Gholson 2016). Um dieses Verfahren anwenden zu können, ist es notwendig die tatsächliche Wurzeltiefe der Pflanzen zum jeweiligen Zeitpunkt zu kennen. Diese kann aus den sich verändernden Matrixpotentialkurven (Anstieg der Kurve durch Wasserentzug) der Sensoren abgeleitet werden (Gholson und Roach, 2021). In einer jüngeren Veröffentlichung betonten die Autoren die Relevanz der Dauer des Bewässerungszyklus. Ist eine Bewässerung täglich möglich werden 100 kPa gewichtetes Mittel als Schwellenwert als ausreichend gesehen. Beträgt der Bewässerungszyklus hingegen beispielsweise acht Tage werden 44 kPa empfohlen, um keine ertragsreduzierende Austrocknung zwischen den Bewässerungen zu riskieren (Gholson und Roach, 2021).

Diese Publikation bezieht sich auf Untersuchungen zu Furchenbewässerung für Mais auf schluffig-tonigem Lehm im Mississippi-Delta. Ziel des Projektes war es, Empfehlungen zum Bewässerungsstart für diese Region zu entwickeln. Dazu wurde in den Jahren 2009–2012 zu verschiedenen Zeitpunkten Bewässerungen initiiert. Erträge, Wachstumsstadien, Bodenbearbeitung und zugehörige Matrixpotentiale wurden verglichen. Aus diesen Vergleichen wurden einzelne Parameter oder Parameterkombinationen identifiziert, welche den größten Einfluss auf die Ertragsbildung hatten. Sensoren wurden in Tiefen von 23, 46 und 69 cm installiert, um die Hauptwurzelzone des Mais auf diesem Bodentyp abzudecken. Der Grenzwert errechnet sich aus dem arithmetischen Mittel der Sensoren. Bei diesem Boden sind bei einer Bodenwasserspannung von 159 kPa 50 % der nFK aufgebraucht. Um den maximalen Ertrag zu gewährleisten, empfehlen die Autoren Werte von **50 kPa**. Allerdings besteht dann die Gefahr einer übermäßigen Bewässerung. Ein Grenzwert von **100 kPa** reduziert den Wassereinsatz, in manchen Jahren besteht jedoch die Gefahr reduzierter Erträge (Pringel et al. 2017).

In Georgia, USA, wurden in den Jahren 2015–2017 ein Versuchsanbau von Mais, ähnlich dem in Obersiebenbrunn, durchgeführt. Ziel war eine möglichst hohe Ernte, teilweise konnten Erträge von über 15 t ha⁻¹ erzielt werden. Die Erfassung der Bodenwasserspannung erfolgt mit drei Watermark-Sensoren in den Tiefen 20, 40 und 60 cm. Aus diesen drei Messwerten wird, mit je nach Wuchsfortschritt veränderlichen Faktoren, das gewichtete Mittel berechnet (siehe Tabelle 11). Zur Bestimmung des Wuchsfortschritts wurden Growing Degree Days (Tagesdurchschnittstemperatur–10°C) aufsummiert. Lag die Temperatur unter 10°C wurden 10°C aufgezeichnet, bei über 30°C wurden 30°C hinzugezählt. Der Grenzwert des gewichteten Mittels wurde mit **30– 35 kPa** gewählt und damit deutlich geringer als von anderen Autoren (Orfanou, Pavlou, und Porter 2019).

GDDs (°C)	α (20 cm)	β (41 cm)	γ (61 cm)
0-354	0.80	0.20	0.00
355-724	0.60	0.30	0.10
725-878	0.50	0.30	0.20
879-1099	0.50	0.25	0.25
1100-end of irrigation	0.40	0.30	0.30

Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Sensors abhängig von den Growing Degree Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2019)

Henggeler von der University of Missouri gibt 50 bis 80 kPa als Grenzwert an. Der kleinere Wert wird für trockene, wärmere Regionen empfohlen, während 80 kPa für kühlere, humide Klimata genannt werden. Regionen, die zwischen diesen beiden Charakteristiken liegen, sollen Zwischenwerte verwenden. Es ist vom Autor allerdings nicht klar definiert was, unter den jeweils beschriebenen Klimata zu verstehen ist. Da das Hauptwurzelwachstum in den Regionen zwischen 20 und 30 cm stattfindet, wird diese Schicht vom Autor als die für die Bewässerung entscheidende angesehen (Henggeler, o. J., 24). Werden in mehreren Tiefen Daten erhoben, ist der Durchschnittswert ausschlaggebend. Alternativ können zwei Sensoren installiert werden, der erste in der Hauptwurzelzone 20-30 cm und ein weiterer in 50-70 cm Tiefe. Zur Bewässerungssteuerung dient der obere der zwei Sensoren, der untere hingegen, um Versickerung zu registrieren und die Bewässerungsmenge ggfs. anzupassen. Sind ausreichend Erfahrungswerte hinsichtlich des Pflanzen- und Bodenverhaltens vorhanden, wird eine Messung unter Umständen als ausreichend beschrieben. Der Sensor sollte in der Hauptwurzelzone von 9-12 Zoll (23-30,48 cm) installiert werden, um diese bestmöglich zu erfassen und um gegen die starken Schwankungen der Bodenoberfläche geschützt zu sein. Die Entscheidung, wie viele Sensoren und in welchen Tiefen sie verbaut werden, ist abhängig von der kultivierten Pflanze und den Erfahrungswerten des Anbauers (Henggeler, o. J.).

Die einzigen Daten mit Österreich-Bezug wurden von Stenitzer über die FAO publiziert. In dieser Publikation wird mit zwei granularen Matrixsensoren (z.B. Watermark) in zwei Bodentiefen, in 20–40 cm zur Bewässerungssteuerung und in 60–70 cm, um Perkolationsverluste zu registrieren, gearbeitet. Es wird erwähnt, dass in den Bewässerungsregionen in Ostösterreich, aufgrund der gut strukturierten und durchwurzelbaren, schluffigen Lehmböden, Bodenwasserspannungen von 0,4–0,6 MPa (400–600 kPa) kein Ertragsrisiko darstellen. Basierend auf den durchgeführten Experimenten wird empfohlen, den Boden in der Schicht zwischen 20–40 cm auf 0,5–0,6 MPa (500– 600 kPa) austrocknen zu lassen, um Wasser zu sparen und dennoch ein hohes Ertragsniveau erreichen zu können. Für Gemüsekulturen oder solche, die ein eher schwaches Wurzelsystem ausbilden, kann die Bodenwasserspannung in **10–20 cm** Tiefe auf unter **0,20 MPa (200 kPa)** gehalten werden (Stenitzer o. J.).

3.2 Theoretisch zulässiger Grenzwert

Anhand der vorangegangenen Berechnungen und getroffenen Annahmen in CropWat bzw. Hydrus 1D (Absätze 2.6.2 bis 2.6.4) wird ein Grenzwert des Matrixpotentials von ca. **100 kPa** als maximal zulässige Bodenwasserspannung in 20 cm Bodentiefe angestrebt. Als maßgeblich wird der Wert des von oben betrachtet ersten Watermark-Sensors angesehen, da diese im trockeneren Bereich zuverlässige Ergebnisse liefern und häufig zur Bewässerungssteuerung verwendet werden. Besonders während der ertragssensiblen Phase zwischen der männlichen Blüte (Rispenschieben) und Kornfüllung sollte dieser Wert nicht überschritten werden. Ab ca. 4 Wochen vor der geplanten Ernte ist jedoch keine Bewässerung mehr nötig, da sich der Mais bereits im Abreifen befindet.

3.3 Evaluierung Feldversuch

Mit der LFS Obersiebenbrunn wurde vereinbart die dort üblichen Wassermengen aufzubringen. Mit Erreichen des festgelegten Grenzwerts des Matrixpotentials von 100 kPa in 20 cm Tiefe sollten die Bewässerungssysteme in Betrieb genommen werden.

In Tabelle 12 sind die Bewässerungsereignisse 2021 ersichtlich. Während der Vegetationsperiode wurde jede Parzelle Anfang Juli zweimal bewässert. Die Tropfschläuche (DI) wurden das erste Mal am 01.07. mit einer Wassergabe von 25 mm in Betrieb genommen. Am Tag vor der Bewässerung maß der Watermark-Sensor in 20 cm Tiefe einen Wert von 42,31 kPa. Der Mittelwert aller Sensoren in 20 cm Bodentiefe betrug 43,95 kPa. Durch eine zu hohe Wassergabe würde Perkolation aus der Wurzelzone heraus entstehen. Um dies zu vermeiden, wurde am Tag nach der Bewässerung (02.07) unterhalb eines Tropfers mit einem Spaten gegraben, um die Infiltrationstiefe festzustellen. Ein klar ausgeprägter Infiltrationshorizont konnte dabei allerdings nicht festgestellt werden. Zur Kontrolle wurde an einer Stelle ohne Tropfer ebenfalls gegraben, wobei an beiden Stellen der Boden nach ca. 30 cm noch recht feucht war. Die Watermark-Sensoren in 40 cm und 60 cm zeigten zum Zeitpunkt unmittelbar vor der Bewässerung ebenfalls geringere Ψ_m -Werte als derjenige in 20 cm auf, was auf höhere Wasseranteile hinweist. Auf die Bewässerungsmenge von 25 mm reagierten die Matrixpotential-Werte in 40 cm und 60 cm nicht. Somit werden die Wassergaben von 25 mm als passend angesehen, da Infiltration in tiefere Schichten ausgeschlossen werden kann. Ein Bewässerungsschlauch war direkt neben/über der Messstation positioniert.

In den Parzellen ohne zusätzliche Wassergabe (NI) betrugen die Watermark-Werte 73 kPa und 70 kPa am Vortag des 01.07 bzw. 09.07. Sehr ähnlich lagen die Mittelwerte aus Watermark & MPS-6 Sensoren mit 74 kPa und 69 kPa.

Die größte Wassergabe erfolgte bei der Rohrnetzberegnung (SI) am 02.07. mit 58,8 mm. Eine Woche darauf wurden nochmals 39,4 mm ausgebracht. Bei beiden Einsätzen war das Ψ_m bei zwei Feststellungsmethoden ähnlich: 54 kPa und 58 kPa bei den Watermarks sowie 47 kPa und 55 kPa unter Berücksichtigung der MPS-6.

Das Auslegerstativ (BI) wurde ebenfalls zweimal eingesetzt. Ausgebracht wurden am 02.07. 23,3 mm und am 09.07. 25,1 mm. An den Vortagen wurden von den Watermark-Sensoren ein Ψ_m von 70 kPa und 63 kPa gemessen. Das Mittel aller Sensoren ergab sich mit 97 kPa und 76 kPa. Zur Interpretation dieser Werte sei auf Abschnitt 3.4 verwiesen.

		Wassergabe /	Watermark /	x MPS-6 & Watermark /
	Datum	mm	kPa	kPa
וח	01.07.	25	42	44
ы	09.07.	20,2	31	30
NI	02.07.	-	73	74
	09.07.	-	70	69
SI	02.07.	58,8	54	50
51	09.07.	39,4	58	55
BI	02.07.	23,3	69	97
ы	09.07.	25,1	63	76

Tabelle 12: Übersicht über die Bewässerungsereignisse 2021. Angaben zum Matrixpotential beziehen sich auf den Tag vor der Bewässerung und 20 cm Bodentiefe.

Die erste Beregnung am 01.07/02.07 fand zur Überprüfung der richtigen Positionierung der Anlagen statt. Aufgrund des starken Windes während des Einsatzes der Beregnungen (SI und BI) wurden die Messtationen kaum oder nur in sehr geringem Umfang vom Wasser erreicht. Dies spiegelt sich auch in den Reaktionen der Bodenfeuchtsensoren wider. Zur Interpretation der Bodenwasserstatusdaten siehe Abschnitt 3.4. Aufgrund der ausbleibenden Reaktion wurde die Positionierung der Regner und des Auslegerstativs nochmals verändert. Beide wurden um eine Rohrlänge (6 m) verlegt, um die dazugehören Messstationen besser abdecken zu können (Nolz, persönliche Kommunikation, 09.07.21). Die Bewässerungen am 09.07. fanden ohne Rücksprache statt.

Abbildung 33 gibt einen Überblick über die verschiedenen Bewässerungstechniken in Aktion am 02.07.21. Gut zu erkennen sind im unteren Bereich des Fotos die Tropfschläuche und die von ihnen benetzte Bodenoberfläche. Die Aufnahme wurde im Zuge der Infiltrationskontrolle aufgenommen. Ebenfalls gut zu erkennen ist der lückige Bestand des Mais. In der Mitte des Fotos sind auf einer Linie mit den roten Stangen (Bodenwasserstatussensoren der Firma PLANTCARE, Schweiz) die Regner der Rohrnetzberegnung zu sehen. Am rechten Bildrand ist das Auslegerstativ abgebildet. Eine immense Verdriftung des Wassers durch starken Wind war, vor allem bei der Rohrnetzberegnung, an diesem Tag zu beobachten.


Abbildung 33: Überblick über alle drei Bewässerungstechniken während der Beregnung vom 02.07.21

3.4 Bodenwasserdaten 2021

3.4.1 Matrixpotential

3.4.1.1 Watermark

Die Watermark-Sensoren wurden mit Hilfe von grauen Kunststoffrohren installiert, waren 2021 allerdings nicht optimal positioniert. Sie befanden sich nicht in den Pflanzenreihen, sondern im 75 cm breiten Zwischenraum der einzelnen Maisreihen (Abbildung 12). Dadurch werden die Bodenwasserverhältnisse im Wurzelbereich vermutlich nicht akkurat repräsentiert, da der Bodenwasseranteil zwischen den Reihen höher ist und deshalb in Relation zur tatsächlichen Situation im effektiven Wurzelraum zu geringe oder zeitlich verzögerte Matrixpotential-Werte angezeigt werden. Der Bewässerungsbedarf wird durch diese nicht repräsentativen Werte verspätet oder im schlimmsten Fall nicht erkannt. Als problematisch wird dieser Umstand vor allem für Pflanzen angesehen, die mehr vertikale als horizontale Wurzelstrukturen aufweisen, wie z.B. Soja. Aber auch bei Mais befindet sich die effektive Wurzelzone – und damit auch der Großteil der Wasseraufnahme – hauptsächlich in der Pflanzreihe und nicht zwischen den Reihen (Irmak et al. 2016, 4f). Die in Obersiebenbrunn gemessenen Werte dürften daher durchgehend zu niedrig sein, wobei aufgrund von fehlenden Vergleichswerten der Fehlerwert nicht quantifiziert werden kann.

Bei allen Stationen war zu Beginn die obere der drei erfassten Bodenschichten trockener als die nachfolgenden. Durch den nassen Mai änderte sich dies und die unteren Schichten wiesen höhere Spannungswerte auf. Im Verlauf des Junis trocknete der Oberboden stärker aus und war im Vergleich wieder trockener als tiefere Bodenschichten. Durch Niederschläge bzw. den Bewässerungseinsatz drehten sich die Bodenwasserstatusverhältnisse wiederum und bis zum Ende der Saison lag das Matrixpotential im Bereich von 20 cm unter jenen der tieferen Bodenschichten. Dieses Wechselspiel erschwert eine Bewässerungssteuerung nur anhand eines Sensors, da die unteren Bodenschichten, je nach Wasseranteil, zur Versorgung der Pflanze beitragen oder eben nicht. Wird nur ein Sensor verwendet, entgeht diese wichtige Information und der Zeitpunkt der Bewässerung wird unter Umständen zu früh bzw. zu spät gewählt.

In zwei Grafiken (BI & NI) sind bei bestimmten Kurvenverläufen deutliche Sprünge, die mit Niederschlagsereignissen korrelieren zu erkennen. Diese dürften dadurch entstehen, dass Wasser entweder im oder am Kunststoffrohr des Sensors entlang rinnt. Dies führt zu einer sprunghaften Zunahme des Wasseranteils, die durch den trockeneren umgebenden Boden allerdings rasch ausgeglichen wird. Die ebenfalls sprunghaften Anstiege, also ein Austrocknen, der betreffenden Werte lassen sich möglicherweise auf einen von Auswaschungen verursachten, ungenügenden Bodenschluss zurückführen.

Angelehnt an vorhandene Grenzwerte, die meist die Werte mehrerer Sensoren im Bodenprofil berücksichtigen, wurde für jede Parzelle einen Tag vor der Bewässerung das Mittel der Matrixpotentialwerte über die Tiefe hinweg berechnet. Dadurch soll die in Obersiebenbrunn gefahrene Strategie mit den beschriebenen Startwerten der Literatur verglichen werden können. Wie bereits erwähnt, muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die erfassten Werte im Feld aufgrund der nicht idealen Position der Sensoren zu niedrig ausfallen dürften. Für einen maximalen Ertrag werden Grenzwerte von unter 50 kPa empfohlen (Absatz 3.1). Diese Grenze wurde, wenn auch nicht bewusst, eingehalten.

Anfang Mai lagen die Matrixpotentialwerte in 60 cm Tiefe der Tropfbewässerung unter jenen der oberen Bodenschichten. Durch den nassen Verlauf des Monats reduzierten sich die Ψ_m -Werte der 20 cm Schicht erheblich, wobei sich die tieferen Schichten kaum änderten. Interessanterweise nahmen die Wasseranteile in 40 und 60 cm im Verlauf des trockenen und heißen Junis laut Ψ_m zu, während das Austrocknen des ersten Sensors durch das stetige Ansteigen der Kurve veranschaulicht wird (siehe Abbildung 34). Das Bewässerungsereignis vom 01.07. erreichte die unteren Bodenschichten nicht, das zweite wirkte sich sehr wohl auf diese aus. Nach der zweiten Bewässerung trockneten die 40 und 60 cm tief gelegenen Sensoren kontinuierlich aus. Die Wasseraufnahme durch die Maiswurzel fand somit auch in diesen Bereichen statt. Wie bei den volumetrischen Wasserdaten zeigen auch hier die hohen Niederschläge von Mitte Juli kaum Auswirkungen auf die Sensorwerte. Am 30. Juni lag der Mittelwert aller Sensoren bei 33 kPa, am 8. Juli geringfügig niedriger bei 30 kPa.



Abbildung 34: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle DI. Gemessen mit Watermark-Sensoren.

In Abbildung 35 ist der Verlauf des Matrixpotentials für die unbewässerte Parzelle abgebildet. Zu Beginn der Saison nehmen die Wasseranteile nach unten hin deutlich zu und auch die oberste Bodenschicht wird durch die Mainiederschläge gut durchfeuchtet. Bis Mitte Juli änderte sich der Bodenwasserstatus in den zwei unteren Schichten kaum, der Sensor in 20 cm dokumentierte hingegen eine deutliche Austrocknung, die erst durch Niederschläge Mitte Juli gestoppt wurde. Diese Niederschläge drangen aber offensichtlich keine 40 cm in den Boden ein. Bis Ende September nahmen die Matrixpotentialwerte in 40 und 60 cm Tiefe kontinuierlich zu, wobei die bereits beschriebenen Sprünge der Kurve beobachtet werden konnten. Die obere Bodenschicht wurde den August hindurch immer wieder von Niederschlägen durchdrungen. Die steil ansteigende Kurve nach Niederschlägen lässt auf eine Aufnahme des leicht verfügbaren Bodenwassers durch den Mais schließen. Am 1. Juli betrug das Mittel aller Sensoren 45 kPa, am 8. Juli 46 kPa.



Abbildung 35: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle NI. Gemessen mit Watermark-Sensoren.

In der Parzelle der Rohrnetzberegung fällt auf, dass sich das Ψ_m in 40 und 60 cm nahezu gleich entwickelten (siehe Abbildung 36). Gegen Ende der Vegetationsperiode wies das komplette beobachtete Bodenprofil in etwa den gleichen Bodenwasserstatus auf, was in den anderen Parzellen nicht so einheitlich beobachtet werden konnte. Die ausgebrachten Bewässerungsmengen führten, zumindest im Bereich der Monitoringstation, zu keiner durchdringenden Bodenbefeuchtung. Aufgrund des bereits erwähnten Standortwechsels der Regner lässt sich zumindest die zweite Wassergabe in den Messwerten wiedererkennen. Die Mittelwerte am Tag vor den jeweiligen Bewässerungen betrugen 37 kPa und 40 kPa.



Abbildung 36: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle SI. Gemessen mit Watermark-Sensoren.

Abbildung 37 stellt die Matrixpotentiale der Parzelle BI dar. Auch hier ist die fehlerhafte Position der Bewässerungsanlagen in den Werten zu erkennen. Erst nach dem zweiten Ereignis fallen die Werte, und zwar in allen drei Messtiefen, teils deutlich ab. Der Sensor in 60 cm Tiefe weist die erwähnten Spitzen auf. Ende September erreicht die Bodenwasserspannung in 20 cm 95 kPa und damit den höchsten aller mit Watermark-Sensoren erfassten Werte. Aber auch vor der ersten Bewässerung betrug das Matrixpotential in 20 cm 75 kPa. Aufgrund der Witterung wurde mit einem Erreichen des Grenzwerts innerhalb der nächsten Tage gerechnet und eine Bewässerung wäre wohl veranlasst worden. Am 1.7. betrug der Mittelwert 46 kPa, am 8.7. 47 kPa.



Abbildung 37: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle BI. Gemessen mit Watermark-Sensoren.

3.4.1.2 MPS-6

Neben den Watermark-Sensoren sind in 20 cm Tiefe pro Messstation zwei MPS-6 in den Boden eingebaut. In Abbildung 38 ist der Verlauf der gemessenen Werte für die BI-Parzelle dargestellt. Grafiken zu den restlichen Versuchsflächen sind in Anhang D zu finden. Im feuchteren Bereich liefern die Sensoren nahezu identische Ergebnisse. Ab einer Bodenwasserspannung von ca. 50 kPa schnellen die mit MPS-6 erfassten Werte in die Höhe und reagieren sehr volatil.



Abbildung 38: Gegenüberstellung der Watermark-Sensoren und der MPS-6 für die Parzelle BI

3.4.2 Bodenwasseranteil

3.4.2.1 HydraProbe

Mit Ausnahme der Parzelle SI sind die Datenaufzeichnungen der HydraProbe-Sensoren (rote durchgezogene Linie) lückenhaft. Wie im Kapitel 2.6.5 bereits dargestellt wurden die fehlenden Daten berechnet und in den nachfolgenden Diagrammen als gepunktete rote Linie dargestellt. Ferner sind in den Diagrammen als hellblaue Balken Niederschlagshöhen bzw. in dunkelblau aufgebrachte Bewässerungsmengen enthalten. Ergänzt werden die Darstellungen durch die gängigen Bodenwasserkennwerte des permanenten Welkepunkts, des leicht verfügbaren Bodenwassers (50 % nFK) – ausgehend von einer Feldkapazität bei einem pF-Wert von 2,5 – der in Hydrus 1D berechneten Feldkapazität und der Feldkapazität bei pF 1,8. Zwischen den verschiedenen Feldkapazitäten einer Parzelle bestehen teilweise deutliche Unterschiede. Auffällig ist, dass die starken Niederschläge Mitte Juli (rund 61 mm in zwei Tagen) in allen Parzellen nur zu einem geringen Anstieg der Bodenfeuchte in 20 cm Tiefe führen. Hier verdeutlicht sich die in Kapitel 2.4.2 erwähnte bestehende Unsicherheit hinsichtlich der Niederschlagsdaten zwischen den Wetterstationen Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf. Vermutlich sind in Obersiebenbrunn diese Niederschläge nur in kleinerem Umfang gefallen. Gerade bei geringeren Niederschlägen mit schwächerer Intensität wird durch Interzeption die am Boden ankommende Wassermenge verringert. Ferner werden zuerst die Poren der oberen Bodenschicht aufgefüllt, bevor sich die Bodenwasserverhältnisse in 20 cm Tiefe verändert. Deshalb spiegeln sich geringere Niederschlagshöhen meist nicht im Wasseranteil in 20 cm Tiefe wider.

In der zweiten Septemberhälfte nimmt aufgrund der sehr gering ausfallenden Niederschläge der Wasseranteil in allen Parzellen ab. Da sich der Mais zu diesem Zeitpunkt im Ausreifen befindet, verringert sich grundsätzlich der Wasserbedarf der Pflanze und es würde auch nicht mehr bewässert werden.

In Abbildung 39 ist der Wasseranteilsverlauf der Parzelle DI während der Monate Mai– September dargestellt. Der PWP liegt bei einem Wasseranteil von 0,18 (cm cm⁻³). Die Feldkapazitäten mit einem pF-Wert von 1,8 und die anhand der van-Genuchten-Parameter in Hydrus 1D berechneten liegen mit 0,38 bzw. 0,37 (cm cm⁻³) sehr nah beieinander. Das schnelle Abfallen der Kurve nach Niederschlägen oder Bewässerungen, beispielsweise Ende Mai oder Anfang Juli, lässt annehmen, dass sich die Feldkapazität eher im Bereich von pF 2,5 (30 Vol.-%) bewegen dürfte und eine Feldkapazität bei einer Wasserspannung von pF 1,8 zu hoch angesetzt wäre. Das Abfallen der Kurve wird maßgeblich durch die Wasseraufnahme der Maiswurzeln verursacht. Je flacher die Kurve wird, umso weniger Wasser kann entzogen werden und es ist seitens der Wurzeln dementsprechend mehr Energie aufzuwenden. Der Wasseranteil, der zwischen der hellgrünen Linie (FK bei pF 2,5) und der schwarzen Linie bei 24 Vol.-% liegt, repräsentiert das leicht verfügbare Bodenwasser. Mit Überschreiten des leicht verfügbaren Bodenwassers flacht die Kurve augenscheinlich ab. Die höchsten Wasseranteile werden Ende Mai, nach der Bewässerung am 09.07. und Anfang August erreicht. Weshalb nach der ersten Bewässerung am 01.07. kein Anstieg der Wasseranteile beobachtet werden konnte, ist leider unklar. Der permanente Welkepunkt wird zu keiner Zeit erreicht.



Abbildung 39: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der Parzelle DI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten.

Parzelle NI war erwartungsgemäß deutlich trockener als die bewässerten (Abbildung 40). Für Mai und Juni liegen leider keine gemessenen Daten vor. Sowohl zu Beginn der Vegetationsperiode als auch gegen Ende bewegen sich die Wasseranteile nahe dem PWP. Durch die Niederschläge im Mai wurde ein Anstieg der Wasseranteile in den Bereich des leicht verfügbaren Bodenwassers errechnet. Sofern leicht verfügbaren res Bodenwasser vorlag, wurde dieses durch den Mais auch aufgenommen, was

durch das steile Abfallen der Kurven symbolisiert wird. Die Niederschläge Mitte August führten auch in 20 cm Tiefe zu einem Anstieg der Wasseranteile, da durch die gefallenen Regenmengen Anfang August die oberen Bodenschichten noch nicht so ausgetrocknet waren, wie dies im Juli der Fall gewesen sein dürfte. Wasseranteile im Bereich der Feldkapazitäten waren nicht zu verzeichnen. Im Gegensatz zu Parzelle DI bewegen sich die Feldkapazitäten bei pF 2,5 und gemäß Hydrus 1D in ähnlichen Größenordnungen. In den letzten zwei Septemberwochen änderten sich die Wasseranteile kaum noch, ähnliches war bereits in den letzten zwei Juliwochen zu beobachten. Offensichtlich war das pflanzenverfügbare Bodenwasser in dieser Schicht erschöpft bzw. so stark an die Bodenmatrix gebunden, dass es vom Mais nicht mehr aufgenommen wurde. Das grundsätzlich aus dieser Bodenschicht Wasser von den Wurzeln entzogen wurde, verdeutlicht der August mit den abfallenden Kurven nach Niederschlägen.



Abbildung 40: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der Parzelle NI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten.

Parzelle SI startete von einem recht hohen Feuchtigkeitsniveau in die Kulturzeit des Maises und auch die reichlichen Niederschläge im Mai finden sich in den gemessenen Wasseranteilsdaten wieder (siehe Abbildung 41). Der PWP in dieser Parzelle liegt mit 12,4 Vol.-% deutlich unter den anderen (16,7 bis 17,9 Vol.-%). Insgesamt viermal werden Zustände erreicht, die den Wert der Feldkapazität repräsentieren. Bei einem pF-Wert von 2,5 entspricht die FK 24,5 Vol.-%, die in Hydrus 1D berechnete 28,9 Vol.-%. Sehr gut ist auch in dieser Grafik das zunehmend flacher werdende Gefälle der Wasseranteilskurve zu erkennen. Die hohe Bewässerungsgabe am 02.07. hatte so gut wie keinen Einfluss auf die Bodenfeuchte in 20 cm Tiefe, da zum einen die Positionierung der Bewässerungsanlagen nicht optimal war und zum anderen eine immense Windverdriftung des Wassers beobachtet werden konnte (siehe Abschnitt 3.3) In Kombination mit auftretenden Niederschlägen wirkte sich die zweite Bewässerung vom 09.07. positiv auf die Bodenwasserverhältnisse aus. Am geringsten war der Wasseranteil am Ende der Vegetationszeit, dabei waren in dieser Bodenschicht 50 % der nutzbaren Feldkapazität aufgebraucht.



Abbildung 41: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der Parzelle SI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten.

In Abbildung 42 ist der Wasseranteilsverlauf für die mit dem Auslegerstativ bewässerte Parzelle abgebildet. Bis zur ersten Bewässerung ähnelt die Kurve sehr stark jener aus der SI-Parzelle. Die erste Bewässerung wurde initiiert, als das leicht verfügbare Bodenwasser nahezu erschöpft war. Auch hier zeigten sich die fehlerhafte Position des Bewässerungsstativs, der starke Windeinfluss und die damit einhergehende Verdriftung. Zusätzlich dürfte die obere Bodenschicht aufgrund des sehr niederschlagsarmen und heißen Junis nahezu ausgetrocknet gewesen sein, daher konnte kein Anstieg des Wasseranteils in 20 cm am Messpunkt festgestellt werden. Die Parzelle BI ist die einzige, bei der sich die in Hydrus 1D berechnete Feldkapazität und die bei pF 1,8 näher sind als die bei 2,5 angesetzte. Im Mai steigt der Wasseranteil auf 32,6 Vol.-%, was in etwa der in Hydrus 1D berechneten FK entspricht, bevor er wieder zurückgeht. Die bei 1,8 angesetzte FK beträgt 34,4 Vol.-%. Nach der zweiten Bewässerung am 09.07. bildet sich, unterstützt durch Niederschläge, für einige Tage ein Plateau im Bereich der FK (Hydrus 1D) aus. Auch in dieser Grafik ist die sich am unteren Rand des leicht verfügbaren Bodenwassers abflachende Kurve zu erkennen. Ausgehend von den Messwerten, wäre es möglich, die FK für diese Station höher als bei pF 2,5 anzusetzen. Dementsprechend würde sich auch die Linie, die das leicht verfügbare Bodenwasser markiert, nach oben verschieben.



Abbildung 42: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der Parzelle BI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten.

3.4.2.2 SM-1

Zusätzlich zu den Messungen der HydraProbe-Sensoren wurden mit kapazitiven Rohrsonden (FDR) die Wasseranteile bis zu einer Tiefe von 90 cm alle 10 cm erfasst. Da der Fokus nicht auf den SM-1 Daten lag, und diese nur teilweise plausibel waren, sind die betreffenden Abbildungen der Vollständigkeit halber in Anhang E zu finden. Exemplarisch wird an dieser Stelle der Verlauf für die Parzelle des Auslegerstativs diskutiert.

Kapazitive Rohrsonden tendieren dazu den Wassergehalt zu überschätzen. Liegt im Bereich der elektromagnetischen Wellen (EM) ein inhomogener Boden vor, der feuchtere und damit leitfähigere sowie trockenere Bereiche aufweist, wird das elektromagnetische Feld bevorzugt in den feuchteren Bereich gezogen. Dadurch messen die Sensoren eine höheren Permittivität und überschätzen den mittleren Wassergehalt des erfassten Bodenvolumens (Evett et al. 2012, 4f). Grundsätzlich wird die kapazitive Erfassung der Wasseranteile von Evett et al. als eher schlecht geeignet angesehen. Probleme stellen sowohl strukturierte Böden als auch Über- oder Unterschätzung des Wasseranteils in Abhängigkeit vom tatsächlichen Wassergehalt des Bodens dar. Mit steigendem Wassergehalt nimmt die elektrische Leitfähigkeit ebenfalls zu. Diese hat großen Einfluss auf die Kalibrierung des Sensors. Bodentemperatur, Sorptions- und Desorptionsvorgänge, Salzgehalt sowie Tongehalt des Bodens beeinflussen die Kalibrierung bzw. das Durchdringungsmuster des EM-Feldes in Folge einer Änderung der elektrischen Leitfähigkeit ebenfalls (Evett et al. 2012, 8). Zur Steuerung von Defizitbewässerungen wird von der Verwendung von kapazitiven Rohrsonden abgeraten, da diese zu ungenau und fehleranfällig sind. Stattdessen wird die Verwendung von TDR-Sonden empfohlen (Evett et al. 2012, 8).

Die Grafiken betreffend SM-1 Bodenwasseranteilsdaten sind nach dem gleichen Prinzip wie die vorherigen aufgebaut und beinhalten dieselben Kennwerte. Bei allen Stationen ist der Verlauf der 20 cm Kurve dem der HydraProbe-Werte sehr ähnlich, obwohl in den Absolutwerten teils große Unterschiede bestehen. Die SM-1 Sonde überschätzt den Wasseranteil in 20 cm für NI und SI deutlich, während für DI und BI geringfügig kleinere Werte angegeben werden. Ab Anfang Juli, nach dem zweiten Bewässerungsereignis, nimmt der Wasseranteil der Parzelle BI in einer Tiefe von 60 cm ab (Abbildung 43). Dies würde für eine Wasseraufnahme der Maiswurzeln aus dieser Tiefe sprechen. Gleiches konnte in der Parzelle DI für eine Tiefe von 50 cm und SI für eine Tiefe von 70 cm beobachtet werden. Erwartungsgemäß weisen die oberen Schichten, in diesem Fall 20 und 30 cm, die größten Schwankungen und Reaktionen auf Niederschläge auf. Die Bewässerungsgabe von 25 mm reichte offenbar aus, um den Boden bis in eine Tiefe von 60 cm zu befeuchten, wobei der Anstieg der Bodenfeuchte nur gering erfolgte. Mitte Juli fiel die 20 cm Kurve deutlich steiler ab als die 30 cm Kurve. Demnach haben die Wurzeln besonders der oberen Schicht Wasser entzogen, bevor die Schicht in 30 cm Tiefe genutzt wurde. Ein ähnliches Muster ergab sich für die Parzelle der Tropfbewässerung. Der Grund für die deutlich höheren Wasseranteile in 30 cm im Vergleich zu 20 cm dürfte in der Kalibrierfunktion, die mehrere Berechnungsfaktoren beinhaltet, zu finden sein, da die gemessenen "Rohdaten" sehr ähnlich sind. Eine Überprüfung der Kalibrierfunktion fand im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht statt.



Abbildung 43: Bodenwasserprofil der Parzelle BI

3.5 Evaluierung der Bewässerungsstrategie

3.5.1 CropWat

Mit den Niederschlags- und Wetterdaten von 2021 wurde für eine Wurzeltiefe von 60 cm und einem Startwert von 200 kPa der notwendige Pflanzenwasserbedarf (612 mm) bestimmt sowie die durchgeführte Bewässerungsstrategie evaluiert. Gemäß CropWat wäre für die unbewässerte Parzelle mit einer Ertragsreduktion von 51,3 % zu rechnen gewesen. Unter den gegebenen Klimabedingungen hätte der Bewässerungsbedarf dem Modell zufolge 389 mm (DI), 440 mm (BI) und 400 mm (SI) betragen müssen, um Ernteverluste zu vermeiden. Zehn bzw. elf (BI) Bewässerungs-

In CropWat besteht die Möglichkeit Bewässerungspläne zu erstellen. Für das Jahr 2021 wurden die tatsächlich ausgebrachten Wassermengen (Brutto) in das Programm eingepflegt. Demnach wäre mit Ernteverlusten von 36 % bei den Regnern, 45 % beim Auslegerstativ und 43 % bei den Tropfschläuchen zu rechnen gewesen.

Zu bedenken gilt allerdings, dass die tatsächliche Wurzeltiefe des Mais im Laufe der Vegetationsperiode über 60 cm hinauswächst und sich somit weitere Wasserressourcen erschließt, die im Modell nicht berücksichtigt werden. Der Bewässerungsbedarf dürfte von CropWat deshalb überschätzt werden und der Niederschlag von 350 mm wurde hingegen mit lediglich 275 mm als effektiver Niederschlag in die Berechnung mit aufgenommen. Ein weiterer möglicher Grund für die hohen Ernteverluste könnte eine Überschätzung der anhand von Kc-Werten berechneten Pflanzenverdunstung sein. Bei Projekten in der Schweiz und in Sachsen zur Bewässerungssteuerung konnte festgestellt werden, dass die angesetzten Kc-Werte zu hoch sein können und die Pflanzenverdunstung dadurch überschätzt wird (Schütze und Barfus 2015, v; HAFL 2022, 35). Die Studien beziehen sich allerdings nicht explizit auf Mais. Möglicherweise wurde der optimale Zeitpunkt zur Bewässerung aufgrund der suboptimalen Positionierung der Sensoren schlicht verpasst.

3.5.2 AquaCrop

Evaluiert wurde das Modell anhand des Wasseranteils in 20 cm Tiefe. Hierfür wurden die gemessenen HydraProbe-Werte in mm umgerechnet und den mit AguaCrop ermittelten gegenübergestellt. Hierbei stellte sich heraus, dass sich die in Groß-Enzersdorf Mitte Juli stattgefundenen Niederschläge nicht in den Bodendaten von Obersiebenbrunn widerspiegeln und zu großen Spitzen im AquaCrop-Modell führten. Deshalb wurden diese Niederschläge in AquaCrop nicht berücksichtigt, was im Vergleich mit den gemessenen Werten zu einem wesentlich plausibleren Verlauf der simulierten Wasseranteile führte. Gerade zu Beginn der Simulation verlaufen die beiden Kurven recht ähnlich. Im weiteren Verlauf unterscheiden sich die absoluten Werte aufgrund der zunehmenden Austrocknung teils deutlich. Der Verlauf der Kurven ähnelt sich aber dennoch. Zu bedenken gilt, dass die Sicherheit der gewählten Methode mit zunehmender Bilanzierungstiefe ansteigen würde. Der Bodenwasserstatus der oberen cm eines Bodens ist von Natur aus durch atmosphärische Einflüsse sowie die Wasseraufnahme durch Wurzeln starken Schwankungen unterworfen. Die anhand des Hydra-Probe-Sensors berechneten Werte müssten in Abbildung 44 ebenfalls volatiler sein, da für die gesamte Bodentiefe der gemessene Wert von 20 cm Tiefe angesetzt wurde, was nicht der Realität entspricht. Prinzipiell zu erkennen ist in beiden Kurven die Zunahme des Wasseranteils in Folge des zweiten Bewässerungsereignisses am 9. Juli und die Reaktion auf die August-Niederschläge.



Abbildung 44: Verifizierung des AquaCrop-Modells anhand der Parzelle BI. Gemessener und simulierter Wasseranteile in mm in 20 cm Tiefe.

Zusätzlich wurden die simulierten Erträge mit jenen des LAKO-Berichts verglichen. Als Randbedingungen wurden neben den tatsächlich ausgebrachten Wassermengen auch die anfänglichen Wasseranteile in 20, 40 und 60 cm Bodentiefe berücksichtigt. Diese werden volumetrisch in AquaCrop angegeben. Für 20 cm konnte der Wert von den HydraProbe-Sensoren übernommen, für 40 und 60 cm anhand der Watermark-Sensoren mit Hilfe der in RETC erstellten In situ pF-Kurven berechnet werden. Wie aus Tabelle 13 hervorgeht, sind die Abweichungen zwischen simulierten und offiziellen Erntedaten, zumindest für BI & SI, akzeptabel. Auf eine tiefergehende Kalibirierung wurde daher verzichtet, da dies zum einen nicht Ziel der Arbeit war. Das Modell wird als ausreichend genau betrachtet, um eine Evaluierung der Bewässerungsstrategie vorzunehmen. Zusätzlich ist in nachfolgender Tabelle 13 die Abweichung vom laut AquaCrop möglichen Ertrag angegeben. Auch in diesem Modell wird unter den gegebenen Bedingungen ein deutlicher Ernteverlust errechnet.

	LAKO-Bericht (t ha ⁻¹)	AquaCrop (t ha ⁻¹)	Abweichung (%)	Abweichung vom max. Er- trag (%)
DI	9,5	7,7	-19	-37
NI	8,2	2,9	-65	-77
SI	9,4	9	-4	-26
BI	9,1	8,2	-10	-33

Tabelle 13: Gegenüberstellung und prozentuale Abweichung der Ertragsdaten des LAKO-Berichts und der in AquaCrop simulierten.

3.6 Evaluierung des Grenzwerts

Zur Evaluierung wurde ebenfalls die reale Bodenaustrocknung der verschiedenen Parzellen als Randbedingung herangezogen. Von AquaCrop wurde ein Beregnungsplan erstellt, der bis zum 100. Tag des Wachstums angewandt wurde. Die letzten 24 Tage wurden nicht mehr bewässert. Zu den in Abschnitt 2.6.2.1 festgelegten erlaubten Austrocknungen für 60 cm Bodentiefe wurde die Differenz der FK von pF 1,8 zu 2,5 addiert, damit der volumetrische Wasseranteil, ab dem bewässert wird, gleich bleibt (Tabelle 14). Ist dieses Bodenwasser verbraucht, wird in AquaCrop eine Wassergabe von 30 mm (netto) ausgebracht.

Tabelle 14: MAD zur Bewässerungssteuerung in CropWat und AquaCrop ausgehend von der Feldkapazität pF 2,5 bei CropWat und pF 1,8 bei AquaCrop

	MAD	MAD
	CropWat	AquaCrop
	(mm)	(mm)
DI	41,3	91,6
NI	43,0	89,5
SI	43,2	90,6
BI	37,0	77,2

Mit der gewählten Bewässerungsstrategie von einer maximal zulässigen Bodenwasserspannung von 100 kPa in 20 cm Tiefe hätten sich gemäß Pflanzenwuchsmodell Erträge von über 10,5 t ha⁻¹ erzielen lassen (Tabelle 15). Der höchste Ertrag wurde unter den gegebenen Umständen mit 11,5 t ha⁻¹ für die BI-Parzellen berechnet. Für den Standort Obersiebenbrunn wurde von AquaCrop anhand der Wetterdaten 2021 eine maximal mögliche Ernte von 11,9 t ha⁻¹ simuliert. Jedoch wären für solche starken Erträge unter Berücksichtigung der herrschenden Wasseranteile zu Beginn der Saison und der hohen Referenzverdunstung im Sommer Netto-Bewässerungsmengen von über 210 mm notwendig gewesen. Im Versuchsanbau konnten mit deutlich geringeren Bewässerungshöhen und nur zwei Einsätzen, allerdings in Abhängigkeit der Bodenbearbeitung, Erträge von bis zu 11 t ha⁻¹ erzielt werden (Kombination BW4BB2 in Tabelle 9). Dabei wurden nur rund 50 mm über das Auslegerstativ ausgebracht. Sogar die komplett unbewässerten Parzellen lieferten einen Ertrag von durchschnittlich 9 t ha⁻¹. Dieser Umstand legt die Vermutung nahe, dass Mais ein effizienterer Wassernutzer ist als vom Modell angenommen bzw. dass die verwendeten Stresskoeffizienten eine eingehendere Kalibrierung benötigen. Es kann aber angezweifelt werden, ob solch hohe Bewässerungsmengen, wie von AquaCrop berechnet wurden, ökonomisch sinnvoll sind. Spezielle Sorteneigenschaften blieben in der Aqua-Crop-Berechnung unberücksichtigt.

	Ertrag	Abwei- chung vom max. Ertrag	WUE	Netto-Be- wässerung	Anzahl Bewäs- serungen
	(t ha⁻¹)	(%)	(kg m⁻³)	(mm)	
DI	10,7	-10	2,4	210	7
NI	2,9	-77	1,04	0	0
SI	10,7	-10	2,34	210	7
BI	11,5	-4	2,37	240	8

Tabelle 15: Ergebnisse der Evaluierung der MAD mit AquaCrop

3.7 Empfohlener Ψ_{m} -Wert

Grundsätzlich konnte der theoretisch festgelegte Grenzwert des Matrixpotentials in **20 cm** Bodentiefe von max. **100 kPa** durch die nachträgliche Simulation mit dem Pflanzenwuchsmodell AquaCrop bestätigt werden. Es bestehen jedoch Unsicherheiten bezüglich der Kalibrierung der verwendeten Modelle oder grundsätzlich bei der

Messung der entscheidenden Bodenwasserstatuskenngrößen. Vor allem die suboptimale Positionierung der Sensoren während der Saison 2021 erschwerte eine Anwendung in der Praxis und führte vermutlich durch zu geringe Matrixpotentialwerte zu einem verspäteten Einsatz der Bewässerung. Ferner basiert der festgelegte Grenzwert auf der Annahme, dass die unteren Bodenschichten stets höhere Wasseranteile als der Oberboden aufweisen und somit mehr zur Pflanzenversorgung mit Wasser beitragen als die beobachtete Tiefe von 20 cm. Wie den Grafiken im Ergebnisteil zu den Watermark-Sensoren zu entnehmen ist, war dies nur bis Mitte Juli der Fall. Wird also nur mit einem Sensor in "Spatentiefe" der Bodenwasserzustand überwacht, besteht die Gefahr, dass wichtige Informationen verloren gehen und zu spät bewässert wird, wenn die unteren Schichten bereits austrocknen. Soll in nur einer Tiefe überwacht werden, müsste sich der entsprechende Sensor beim Mais in dessen Hauptwurzelzone befinden, die sich circa bis 30 cm erstreckt (Henggeler, o. J., 24; Bodner und Himmelbauer 2012, 176).

Problematisch ist es ebenfalls, die Wurzeltiefe der Kulturen und damit jene relevante Bodentiefe, die Einfluss auf die Höhe der Wassergaben hat, abzuschätzen. An dieser Stelle sei auf die Forschung des Bewässerungsnetzes der Schweiz verwiesen, welche anhand von Rohrsonden die Wasseraufnahme durch Wurzeln im Bodenprofil sichtbarer macht (https://bewaesserungsnetz.ch/).

Unberücksichtigt bei der Grenzwertfestlegung blieben zudem betriebliche Faktoren wie die Schlagkraft des Betriebes und grundsätzlich die Verfügbarkeit von Wasser. Je nach Leistungsfähigkeit des Betriebes und Umlaufzeit des Bewässerungszyklus kann der Grenzwert gegebenenfalls niedriger gewählt werden, um eine ertragsmindernde Austrocknung zu vermeiden. Gegensätzlich könnte hierzu der Grenzwert höher gewählt werden, um Wasser noch sparsamer einzusetzen.

4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch höhere Temperaturen und sich verändernde Niederschlagsverteilungen wird in Zukunft der Bewässerungsbedarf im trockenen Osten Österreichs steigen. Besonders während der Vegetationsphase ist mit häufigeren Trockenperioden und zunehmendem Hitze- und Trockenstress der Pflanzen zu rechnen. Dieser muss zur Ertragssicherung und im Sinne der Ernährungssicherheit bei bereits bewässerten Kulturen durch zusätzliche Wassergaben ausgeglichen werden, während manche heute noch nicht bewässerte Kulturen in Zukunft bewässerungsdürftig werden und so den Nutzungsdruck auf sich verringernde Wasserressourcen zusätzlich erhöhen. Bis 2050 wird mit einer Verdopplung des Wasserbedarfs und einer Ausbreitung der Bewässerungsgebiete in Richtung Westen gerechnet. Diesem steigenden Bedarf muss bei einem abnehmenden Wasserdargebot mit einer Steigerung der Wassernutzungseffizienz entgegengetreten werden. Eine Möglichkeit zu Steigerung der Wasserproduktivität ist, neben der Bewässerungstechnik, die bedarfsorientierte Bewässerungsteuerung. Bisher verlassen sich Landwirte meist auf ihre Erfahrung und Intuition. Es bestehen Entscheidungshilfesysteme, wie Bilanzmodelle oder Messungen an Boden und Pflanze, um den tatsächlichen Bewässerungsbedarf festzustellen. Bisher finden diese aber nur in sehr begrenztem Umfang Anwendung.

Diese Arbeit soll einen Beitrag zur Steigerung der Wasserproduktivität darstellen. Gewählt wurde mit der Festlegung eines Schwellenwerts für das Matrixpotential eine Methode der Bewässerungssteuerung, die von vielen Autoren, vor allem in US-amerikanischen Literatur, gut erforscht und in der Praxis erprobt ist. Allerdings fehlen Daten und Feldversuche mit Bezug zu Österreich und im speziellen zum Marchfeld. Zumindest wurden diese, falls stattgefunden, mit einer Ausnahme nicht publiziert. Bisherige Methoden erfassen das Matrixpotential in mehreren Tiefen. Da dies aber viele Sensoren und Arbeitszeit benötigt, soll geklärt werden, ob eine Messung in ca. 20 cm "Spatentiefe" ausreicht. Das Matrixpotential beschreibt die Energieverhältnisse im Boden und wird als negativer Druck ausgedrückt (kPa), wobei das Minuszeichen meist vernachlässigt wird. Durch Adhäsions- und Kapillarkräfte wird das Wasser im Korngerüst des Bodens gehalten. Um nun Wasser aus dieser Matrix zu lösen und aufzunehmen, muss die Pflanze ein negativeres Potential entwickeln und dadurch das Matrixpotential des Bodens überwinden. Für einige Kulturpflanzen bestehen publizierte, eindeutige Werte zu Messtiefe, ertragssensiblen Wachstumsphasen und optimalem Feuchtebereich ausgedrückt als Matrixpotential. Diese sind allerdings sehr niedrig und bewegen sich, je nach Definition, im Bereich der Feldkapazität, was die Gefahr von Tiefensickerung birgt.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurde für den Standort Obersiebenbrunn ein solcher Schwellenwert in 20 cm Bodentiefe unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen und dem vorzufindenden Boden ermittelt. Anhand von pF-Kurven, die den Zusammenhang zwischen Matrixpotential und volumetrischem Wasseranteil beschreiben, wurden verschiedene Bodenaustrocknungen berechnet. Mit diesen erlaubten Austrocknungen management allowabel depletion (MAD) und verschiedenen Klimaszenarien wurde mit dem Pflanzenwuchsmodell CropWat eine erste Einschätzung vorgenommen, welche MAD zulässig ist, um Ertragsverluste zu vermeiden. Mit Hilfe des Programms Hydrus 1D, welches den Transport von Wasser im Boden simulieren kann, wurden jene Matrixpotentiale im Bodenprofil berechnet, die sich bei bestimmten Austrocknungen einstellen. Daraus ergab sich, dass ein Matrixpotential von 100 kPa in 20 cm Bodentiefe nicht überschritten werden sollte. Anhand von Bodenwasserstatussensoren, die auf den Feldern der landwirtschaftlichen Fachschule installiert wurden, sollte der Zeitpunkt der Bewässerung identifiziert werden. Ausschlaggebend waren die Sensoren der Firma Watermark in 20 cm Tiefe. Die höchsten Erträge konnten auf Parzellen erreicht werden, die mit einem Auslegerstativ bewässert wurden. Dahinter reihen sich in absteigender Ertragshöhe die Rohrnetzberegnung, die Tropfbewässerung und die unbewässerten Kontrollparzellen. Abschließend folgte eine Evaluierung des festgelegten Schwellenwerts mit dem Pflanzenwuchsmodell AquaCrop, wodurch dieser bestätigt werden konnte.

Das grundlegende Ziel dieser Arbeit einen Schwellenwert zu bestimmen, ab dem Mais bewässert werden sollte, konnte zumindest theoretisch erreicht werden. Dennoch besteht, gerade mit Hinblick auf die Anwendung, weiterer Forschungs- bzw. Überprüfungsbedarf. Grundsätzlich ist der auf diesem Wege theoretisch festgestellte Grenzwert für verschiedenen Kulturpflanzen und Bodentypen reproduzierbar, sofern ausreichend Daten zu Boden- und Pflanzenparametern vorliegen. Dennoch bestehen Unsicherheiten, die nur durch einen Feldversuch ausgeschlossen werden können. Aussagen zur Robustheit von Matrixpotentialwerten zur Bewässerungssteuerung im Marchfeld lassen sich nur durch Überprüfung im Feld treffen, da durch die praktische Anwendung Fehlerquellen bezüglich Modellierungen und getroffener Annahmen eliminiert werden. Als Beispiel für eine potentielle Fehlerquelle sei die gängige Berechnung der Pflanzenverdunstung anhand von Kc-Werten genannt, die sich in anderen durchgeführten Projekten als teilweise zu hoch angesetzt erwiesen haben. Aber auch die nicht optimale Position der Sensoren erschwerte eine Überprüfung während der Saison 2021. Wünschenswert wäre es in einem mehrjährigen Versuchsanbau verschiedene Grenzwerte, aber auch Messmethoden, Anzahl der Sensoren und deren Messtiefen, unter sich ändernden Witterungsverhältnissen zu überprüfen und die nach festzulegenden Kriterien beste Kombination daraus zu identifizieren. Pringel et al. (2017) berücksichtigen bei der Grenzwertfestlegung beispielsweise auch ökonomische Aspekte.

Abschließend kann festgehalten werden, dass bedarfsorientierte Bewässerungssteuerung für Mais anhand von lediglich einem Sensor in 20 cm Bodentiefe möglich scheint. Bevorzugt sollte dieser aber tiefer installiert oder, wenn möglich, doch mehrere Bodenprofiltiefen beobachtet werden, da mit nur einer Messung der effektive Wurzelraum nur unzureichend abgebildet wird. In Maisanbaugebieten in den USA wurde die Bewässerungssteuerung anhand von Schwellenwerten des Matrixpotentials, mit drei Sensoren erfasst, intensiv erforscht und erfolgreich angewandt.

Literaturverzeichnis

- Allen, Richard G., Luis Pereira, Dirk Raes, und Martin Smith (1998): Crop evapotranspiration - Guidlines for computing crop water requirements - FAO Irrigation an drainage paper 56. 1998. https://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm.
- Amelung, Wulf, Hans-Peter Blume, Heiner Fleige, Rainer Horn, Ellen Kandeler, Ingrid Kögel-Knabner, Ruben Kretzschmar, Karl Stahr, und Berndt-Michael Wilke (2018): Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3.
- BayWa AG (o. J.): Varible Rain. Zugegriffen 11. Juli 2022. https://www.baywa.de/de/i/entdecken/bewaesserung/variable-rain/.
- Beck, Michael, Tobias Troidl, Florian Hageneder, und Stefan Kirchner (2021): Bewässerungsforum Bayern - Bodensensoren und Datenaufzeichnung, Nr. 1:
 20.
- BFW (Bundeforschungszentrum für Wald) (o. J.): *eBOD2*. Zugegriffen 28. Februar 2022. https://bodenkarte.at/#/center/16.6961,48.2661/zoom/16.
- BMLRT (o. J.): *Marchfeld Gemüse*. Zugegriffen 3. März 2022. https://info.bmlrt.gv.at/themen/lebensmittel/trad-lebensmittel/feldfruechte/marchfeld_gemuese.html.
- Bodner, Gernot (o. J.): Management des Bodenwasserhaushaltes.
- Bodner, Gernot, und Margarita Himmelbauer (2012): *Wurzel- und Wassermanagement bei Mais.* Mais, 39 (4): 174–77.
- Decagon Devices Inc., Pullman, Hrsg. (2017): MPS-2 & MPS-6 Dielectir Water Potential Sensors Operator's Manual.
- Degen, Martin, und Karl Schrader (2014): *Grundwissen für Gärtner: 121 Tabellen.* 3., Aktual. Aufl. Der Gärtner 1. Stuttgart: Ulmer.

- Dey, Prithwiraj, Prerna Sundriyal, und Sanjib Kumar Sahoo (2017): Science of Lagging Behind- Hysteresis in Soil Moisture Characteristic Curve - A Review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 6 (10): 151– 56. https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.610.019.
- Diepenbrock, Wulf, Frank Ellmer, und Jens Léon (2016): *Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*. 4., Überarbeitete Auflage. UTB Agrarwissenschaften 2629. Stuttgart: Ulmer.
- Disse, Markus, und Günter Hartmann (1997): *Experimentelle Bestimmung der Hysterese der pF-Kurve und ihr Einfluss auf die Bodenwassermodellierung*. Wasser & Boden 49: 31–36.
- Doorenbos, Kassam, Bentvelsen, Branscheid, Plusje, Smith, Uittenbogaard, und Van der Wal (1979): *Yield response to water - FAO irrigation and drainage paper* 33.
- DWD (Deutscher Wetterdienst) (2021): Dokumentation Bodenfeuchte.
- Eitzinger, Josef (2007): Einfluss des Klimawandels auf die Produktionsrisiken in der österreichischen Landwirtschaft und mögliche Anpassungsstrategien. Ländlicher Raum. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- Evett, Steven R., Robert C. Schwartz, Joaquin J. Casanova, und Lee K. Heng (2012): Soil Water Sensing for Water Balance, ET and WUE. Agricultural Water Management 104 (Februar): 1–9. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.12.002.

FAO (2022): FAOSTAT. https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize.

FAO (o. J.): What is AquaCrop | AquaCrop | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Zugegriffen 9. April 2022. https://www.fao.org/aquacrop/overview/whatisaquacrop/en/.

Formayer, Herbert (2017): Lebensquell Wasser: Wie lange noch?. LK-Klartext.

- Genuchten, M van, F Leij, und S Yates (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils.
- Geyer, Martin, Thomas Jaksch, und Kai-Uwe Katroschan (2020): *Gemüsebau*. Herausgegeben von Hermann Laber und Gerald Lattauschke. 3., Erweiterte Auflage. Fachbibliothek Produktionsgartenbau. Stuttgart: Ulmer.

Gholson, Drew (2021): Irrometer Watermark Series: Scientific Background.

Gholson, Drew, und Dan Roach. (2021): *How to Schedule Irrigation with Watermark Sensors". Mississippi Crop Situation.* 26. Juni 2021. https://www.mississippicrops.com/2021/06/25/how-to-schedule-irrigation-with-watermark-sensors/.

HAFL. (2022): Bewässerungs-App der ALB. Bedienungsanleitung.

- Hageneder, Florian Michael, und Michael Beck (2014): Abschlussbericht Projekt "Optimierung der Bewässerung für den Freilandgemüseanbau".
- Hanson, Blaine R, und Peters Douglas (2000): Soil Type Affects Accuracy of Dielectric Moisture Sensors, California Agriculture, 3: 43–47. https://doi.org/10.1201/9780203752524-22.
- Harlfinger, Otmar (1999): Die klimatischen Eigenschaften Niederösterreichs mit besonderer Berücksichtigung des Pannonikums.
- Helmholtz Zentrum für Umweltforschung (UFZ) https://www.ufz.de/index.php?de=37937 (aufgerufen: 14.03.22)
- Henggeler, Joe (o. J.): Irrigation scheduling.
- Irmak, Suat. (2019): Soil Water Content- and Soil Matric Potential-Based Irrigation Trigger Values for Different Soil Types. CropWatch. 11. Juli 2019. https://cropwatch.unl.edu/2019/SWC-SMP-irrigation-trigger-values.
- Irmak, Suat, Jose O Payero, Brandy VanDeWalle, Jenny Rees, und Gary Zoubek (2016): Principles and Operational Characteristics of Watermark Granular Matrix Sensor to Measure Soil Water Status and Its Practical Applications for Irrigation Management in Various Soil Textures.

IrriWatch (o. J.): IrriWatch. Zugegriffen 11. Juli 2022. https://www.irriwatch.com/en/.

Kammerer, G, und W Loiskandl (2005): Skript zu Bodenphysik (Vertiefung).

- Kammerer, Gerhard, Reinhard Nolz, Marek Rodny, und Willibald Loiskandl (2014):
 Performance of Hydra Probe and MPS-1 Soil Water Sensors in Topsoil
 Tested in Lab and Field. Journal of Water Resource and Protection 06 (13):
 1207–19. https://doi.org/10.4236/jwarp.2014.613110.
- Kastelliz, Arno, und Reinhard Nolz (2022): Bodenbearbeitungs- und Bewässerungsversuch and der LFS-Obersiebenbrunn 2021.
- Klik, Andreas (2019): Wasserwirtschaftliche Aspekte bei der zukünftigen Pflanzenproduktion.
- KWS Saat SE (o. J.): Mais Anbauplaner.
- LfL (2008): *Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen*. Herausgegeben von Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LfU Bayern (o. J.): Wasserentnahmen für die Bewässerung LfU Bayern. Zugegriffen 12. April 2022. https://www.lfu.bayern.de/wasser/bewaesserung/index.htm.
- Lindinger, Helga, Johannes Grath, Heike Brielmann, Arnulf Schönbauer, Ingrid Gattringer, Christina Formanek, Martine Broer, et al. (2021): *Wasserschatz Österreichs*. Herausgegeben von Bundesministeriu für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.

MMM tech support GmbH & Co. KG, Hrsg. (2020): Messgeräte Katalog 2020.

NAANDANJAIN Ltd., Hrsg. (2017): Overhead sprinklers 233 B.

Nolz, Reinhard (2020): Präsentation VU Bewässerung - Bewässerungsverfahren.

Nultsch, Wilhelm (2012): *Allgemeine Botanik: Glossarium mit 803 Stichworten.* 12., Unveränd. Aufl. Stuttgart: Thieme.

- Orfanou, Pavlou, und Porter (2019): Maize Yield and Irrigation Applied in Conservation and Conventional Tillage at Various Plant Densities. Water 11 (8): 1726. https://doi.org/10.3390/w11081726.
- Pringel, H.C, L Falconer, D.K. Fisher, und L.J. Krut (2017): Initiation of Furrow Irrigation in Corn on a Dundee/Forestdale Silty Clay Loam Soil with and without Deep Tillage. Applied Engineering in Agriculture 33 (2): 205–16. https://doi.org/10.13031/aea.12050.
- Roach, Dan, und Drew Gholson (2016): Utilizing Moisture Sensors to Increase Irrigation Efficiency. Mississippi Crop Situation. 24. Mai 2016. https://www.mississippi-crops.com/2016/05/24/utilizing-moisture-sensors-to-increase-irrigationefficiency/.
- Roth-Kleyer, Stephan, Hrsg. (2016): *Bewässerung im Garten- und Landschaftsbau: 152 Abbildungen, 27 Tabellen*. Fachbibliothek grün. Stuttgart: Ulmer.
- Scheffer, Fritz, Paul Schachtschabel, Hans-Peter Blume, Ellen Kandeler, und Karl Stahr (2010) Lehrbuch der Bodenkunde. 16. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag.

Schulz, Karsten (2019): Modellkalibrierung - Zielfunktionen, Gütemaße.

- Schütze, Niels und Klemens Barfus (2015): SAPHIR Saxonian Platform for High Performance Irrigation.
- Simunek, J, M Sejna, H Saito, und M van Genuchten (2013): The HYDRUS-1D Software Package for Simulating the One-Dimensional Movement of Water, Heat, and Multiple Solutes in Variably-Saturated Media.

Statistik Austria (2022): Feldfrucht- und Dauerwiesenproduktion 2021.

Steduto, Pasquale, Theodore C. Hsiao, Dirk Raes, und Elias Fereres (2009): Aqua-Crop—The FAO Crop Model to Simulate Yield Response to Water: I. Concepts and Underlying Principles. Agronomy Journal 101 (3): 426–37. https://doi.org/10.2134/agronj2008.0139s.

- Stenitzer, E. (2004): Anmerkungen zur praktischen Bewässerung im Marchfeld aus wasserwirtschaftlicher Sicht.
- Stenitzer, E (o. J.): Irrigation scheduling with gypsum blocks in Austria. Zugegriffen 15. April 2021. http://www.fao.org/3/w4367e/w4367e0b.htm#irrigation%20scheduling%20with%20gypsum%20blocks%20in%20austria.
- Stevens Water Monitoring System Inc. (2007): The Hydra Probe Soil Sensor Manual.
- Sulerz, Miriam (2013): Freilanduntersuchungen zur Verdunstung horizontaler und vertikaler Flächen.
- Taghvaeian, S, A A Andales, L N Allen, I Kisekka, S A O'Shaughnessy, D O Porter, R Sui, S Irmak, A Fulton, und J Aguilar (2020): IRRIGATION SCHEDULING FOR AGRICULTURE IN THE UNITED STATES: THE PROGRESS MADE AND THE PATH FORWARD. TRANSACTIONS OF THE ASABE.
- Westmeier, Peter, und Sebastian Gresset (2013): *Entwicklung trockentoleranter Maissorten*, Mais, 40 (1): 24–27.
- ZAMG (2022a): Daten und Statistiken ZAMG https://www.zamg.ac.at/cms/de/produkte/klima/daten-und-statistiken.
- ZAMG (2022b): ZAMG Download Form. https://forms.hub.zamg.ac.at/app/stationnew/4a18b105-c98e-4a4c-86aa-74fe7e021c8f/historical?anonymous=true.
- ZAMG (2022c): ZAMG Download Form. https://forms.hub.zamg.ac.at/app/stationnew/e1d81743-60f2-4fa2-be63-3fdc8a7e2822/historical?anonymous=true.

Sekundärliteratur:

Cepuder, Peter (2021): Irrigation Design. Originalquelle unbekannt.

Abkürzungsverzeichnis

BB =	Bodenbearbeitung
BI =	Boom irrigation
BW =	Bewässerung
CO ₂ =	Kohlenstoffdioxid
DI =	Drip irrigation
FAO =	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FK =	Feldkapazität
GE =	Groß-Enzersdorf
KWB =	Klimatische Wasserbilanz
LFS =	Landwirtschaftsschule
$\Psi_{\text{m}=}$	Matrixpotential
MPS =	Water Potential Sensor
nFK =	nutzbare Feldkapazität
NI =	No irrigation
o. J. =	ohne Jahr
O7B =	Obersiebenbrunn
PWP =	Permanenter Welkepunkt
RH =	Luftfeuchte in %
SI =	Sprinkler Irrigation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserbedarf ausgewählter Kulturpflanzen (zitiert nach Bodner und	
Himmelbauer, 2012)	9
Abbildung 2: Exemplarische pF-Kurve (Amelung et al. 2018, 284)	11
Abbildung 3: Hysterese von pF-Kurven (Anmelung et al. 2018, 285)	12
Abbildung 4: Versuchsaufbau 2021 für Mais in Obersiebenbrunn	17
Abbildung 5: Bodenprofil Obersiebenbrunn (BFW o. J.)	18
Abbildung 6: pF-Kurven Obersiebenbrunn (Morales, persönliche Kommunikation,	
09.04.21, verändert)	19
Abbildung 7: Vergleich der gemessenen Niederschlagsmengen Obersiebenbrunn	
und Groß-Enzersdorf	21
Abbildung 8: Klimadiagramm Groß-Enzersdorf	23
Abbildung 9: Mittlere tägliche Referenzverdunstung eines Monats	23
Abbildung 10: Klimatische Wasserbilanz Groß-Enzersdorf 1991–2020	24
Abbildung 11: Detailaufnahme der Tropfschläuche vom 01.07.2021	29
Abbildung 12: Detailaufnahme der ADCON Messstation 10950 im Bereich der	
5	
Tropfbewässerung vom 01.07.2021	29
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am	29
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021	29 30
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner	29 30 31
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21	29 30 31 31
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers	29 30 31 31 32
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21	29 30 31 31 32 32
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020	29 30 31 31 32 32 34
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020 Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020	29 30 31 31 32 32 34 35
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020 Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020	 29 30 31 31 32 32 34 35
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020 Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020 Abbildung 20: Durchschnittliche Tagesglobalstrahlung eines Monats 2021/1991–2020	 29 30 31 31 32 32 34 35 36
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020 Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020 Abbildung 20: Durchschnittliche Tagesglobalstrahlung eines Monats 2021/1991–2020	 29 30 31 31 32 32 34 35 36 37
Tropfbewässerung vom 01.07.2021 Abbildung 13: Oberflächenbedeckung in der nicht bewässerten Parzelle am 01.07.2021 Abbildung 14: Detailaufnahme Kleinregner Abbildung 15: Regnerverband während der Beregnung vom 02.07.21 Abbildung 16: Rainstar 51 zur Wasserversorgung des Auslegers Abbildung 17: Auslegerstativ während der Beregnung am 02.07.21 Abbildung 18: Monatstemperaturen 2021/1991–2020 Abbildung 19: Monatssummen des Niederschlags 2021/1991–2020 Abbildung 20: Durchschnittliche Tagesglobalstrahlung eines Monats 2021/1991–2020 Abbildung 21: Mittlere tägliche ETo eines Monats 2021/1991–2020 Abbildung 22: Klimatische Wasserbilanz Mai–September 2021	 29 30 31 31 32 32 34 35 36 37 37
Tropfbewässerung vom 01.07.2021	 29 30 31 31 32 32 34 35 36 37 37

Abbildung 24: Wasseraufnahme des Mais im Laufe der Vegetationszeit,
Wurzelentwicklung und Aufnahmeverteilung (zitiert nach Cepuder,
2021)
Abbildung 25: Matrixpotentiale für 20 (schwarz), 40 (blau) und 60 (grün) cm der
Kurve NI. Berechnet in Hydrus 1D für eine gesamte Austrocknung um
43 mm
Abbildung 26: Volumetrischer Wasseranteil in 20 (schwarz), 40 (blau) und 60
(grün) cm Tiefe der Kurve NI bei einer gesamten Austrocknung um 43
mm
Abbildung 27: Gap-filling Wasseranteil DI 47
Abbildung 28: Gap-filling Wasseranteil NI 47
Abbildung 29: Gap-filling Wasseranteil SI 48
Abbildung 30: Gap-filling Wasseranteil BI 48
Abbildung 31: Angepasste Dauer der Vegetationsstufen in AquaCrop. (Smilkova,
persönliche Kommunikation, 24.01.22)
Abbildung 32: Verwendete Bodendaten in AquaCrop (Morales, persönliche
Kommunikation, 03.03.22)51
Abbildung 33: Überblick über alle drei Bewässerungstechniken während der
Beregnung vom 02.07.2166
Abbildung 34: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle DI. Gemessen mit
Watermark-Sensoren69
Abbildung 35: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle NI. Gemessen mit
Watermark-Sensoren70
Abbildung 36: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle SI. Gemessen mit
Watermark-Sensoren71
Abbildung 37: Matrixpotentialwerte im Bodenprofil der Parzelle BI. Gemessen mit
Watermark-Sensoren72
Abbildung 38: Gegenüberstellung der Watermark-Sensoren und der MPS-6 für die
Parzelle BI73
Abbildung 39: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der
Parzelle DI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen
Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten

Abbildung 40: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der
Parzelle NI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen
Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten
Abbildung 41: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der
Parzelle SI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen
Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten
Abbildung 42: Gemessene HydraProbe und vervollständigte Wasseranteile der
Parzelle BI in 20 cm Tiefe. Ergänzt durch die gängigen
Bodenwasserkennwerte und Niederschlagsdaten
Abbildung 43: Bodenwasserprofil der Parzelle BI
Abbildung 44: Verifizierung des AquaCrop-Modells anhand der Parzelle BI.
Gemessener und simulierter Wasseranteile in mm in 20 cm Tiefe 83
Abbildung 45: Punktdiagramm der Globalstrahlung. Gegenüberstellung der
Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf
Abbildung 46: Punktdiagramm der Windgeschwindigkeit in 2 m Höhe.
Gegenüberstellung der Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-
Enzersdorf104
Abbildung 47: Punktdiagramm der mittleren Luftfeuchte. Gegenüberstellung der
Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf
Abbildung 48: Punktdiagramm der mittleren Tagestemperatur. Gegenüberstellung
der Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf 105
Abbildung 49: Punkdiagramm des Niederschlags. Gegenüberstellung der Messdaten
von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf
Abbildung 50: Temperatur 2021. Tagesdaten 106
Abbildung 51: Tagesdaten des Niederschlags 2021 106
Abbildung 52: Globalstrahlung Tagesdaten 2021 107
Abbildung 53: Referenzverdunstung Tageswerte 2021 107
Abbildung 54: Mittlere Windgeschwindigkeit auf Tagesbasis 2021 108
Abbildung 55: Mittlere Luftfeuchte 2021 108
Abbildung 56: Kurvengegenüberstellung DI 109
Abbildung 57: Kurvengegenüberstellung NI 109
Abbildung 58: Kurvengegenüberstellung BI 109
Abbildung 59: Kurvengegenüberstellung SI 109
99

bbildung 60: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle DI	
	0
obildung 61: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle NI	
	1
obildung 62: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle SI	
	1
obildung 63: Bodenwasserprofil DI11	2
bildung 64: Bodenwasserprofil NI11	2
bildung 65: Bodenwasserprofil SI11	3

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Bodenwassergehaltsklassen in Proz	zent nutzbarer Feldkapazität (% nFK)
(DWD 2021, 2 verändert nach UFZ	o. J.) 15
Tabelle 2: Bodenphysikalische Parameter Obe	rsiebenbrunn20
Tabelle 3: Übersicht Bewässerungsmethoden	
Tabelle 4: Die wichtigsten klimatischen Kenng	rößen der drei betrachteten
Klimaszenarien. Ergänzt um die Da	ten des Jahres 2021 und der
Referenzperiode 1991-2020. Alle D	aten beziehen sich auf den
Vegetationszeitraum von Mai–Septe	ember
Tabelle 5: Übersicht über die Erlaubte Austroc	knung (MAD) in mm für jede Station
und die betrachteten Bodenprofieltie	efen (100, 60, 40 cm). TAW (<i>Total</i>
<i>available water</i>) gibt die nutzbare Fe	eldkapazität an. RAW (<i>Readily</i>
available water) beschreibt das leicl	nt pflanzenverfügbare Bodenwasser
(50 % nFK)	
Tabelle 6: Wesentliche Eckpunkte der Kulturfü	hrung 2021. (Kastelliz und Nolz 2022;
verändert)	
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ve	rsuchsparzellen53
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ve Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref	rsuchsparzellen53 fizienz, sortiert nach Bewässerung
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ve Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K	rsuchsparzellen53 fizienz, sortiert nach Bewässerung astelliz und Nolz 2022, 2)54
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg	rsuchsparzellen
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu	rsuchsparzellen
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20	rsuchsparzellen
Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wasseref (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20 Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereff (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereff (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senso 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereft (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senson Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2) 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereft (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senson Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2) Tabelle 12: Übersicht über die Bewässerungset 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereff (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senson Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2) Tabelle 12: Übersicht über die Bewässerungser 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereff (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senson Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2) Tabelle 12: Übersicht über die Bewässerungser Matrixpotential beziehen sich auf de 20 cm Bodentiefe. 	rsuchsparzellen
 Tabelle 7: Ernterohdaten der beobachteten Ver Tabelle 8: Durchschnittserträge und Wassereff (BW) und Bodenbearbeiten (BB) (K Tabelle 9: Detailübersicht der Erntedaten. Geg Varianten, wobei die Werte der redu markiert sind. (Kastelliz und Nolz 20) Tabelle 10: Ergebnisse der Literaturrecherche Bewässerungssteuerung für Mais Tabelle 11: Gewichtete Prozente jeden Senson Days (Orfanou, Pavlou, und Porter 2) Tabelle 12: Übersicht über die Bewässerungser Matrixpotential beziehen sich auf de 20 cm Bodentiefe. Tabelle 13: Gegenüberstellung und prozentual 	rsuchsparzellen
Tabelle 14: MAD zur Bewässerungssteuerung in CropWat und AquaCrop	
---	------
ausgehend von der Feldkapazität pF 2,5 bei CropWat und pF 1,8 bei	
AquaCrop	. 84
Tabelle 15: Ergebnisse der Evaluierung der MAD mit AquaCrop	. 85

Anhang

Anhang A



Gegenüberstellung Wetterdaten 2021 Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf









Abbildung 47: Punktdiagramm der mittleren Luftfeuchte. Gegenüberstellung der Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf.



Abbildung 48: Punktdiagramm der mittleren Tagestemperatur. Gegenüberstellung der Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf.



Abbildung 49: Punkdiagramm des Niederschlags. Gegenüberstellung der Messdaten von Obersiebenbrunn und Groß-Enzersdorf.

Anhang B



Wetterdiagramme 2021 in täglicher Auflösung

Abbildung 50: Temperatur 2021. Tagesdaten



Abbildung 51: Tagesdaten des Niederschlags 2021



Abbildung 52: Globalstrahlung Tagesdaten 2021



Abbildung 53: Referenzverdunstung Tageswerte 2021



Abbildung 54: Mittlere Windgeschwindigkeit auf Tagesbasis 2021



Abbildung 55: Mittlere Luftfeuchte 2021

Anhang C

Gegenüberstellung der Laborkurven (schwarz), der RETC-Kurven (rot) und der gemessenen Daten von HydraProbe und Watermark (blau).



Abbildung 56: Kurvengegenüberstellung DI



Abbildung 57: Kurvengegenüberstellung NI



Abbildung 59: Kurvengegenüberstellung SI



Abbildung 58: Kurvengegenüberstellung BI

Anhang D

Gegenüberstellung der Matrixpotentialwerte in 20 cm Bodentiefe, erfasst mit Watermark-Sensoren und MPS-6.



Abbildung 60: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle DI



Abbildung 61: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle NI



Abbildung 62: Gegenüberstellung Watermark-Sensoren und MPS-6 der Parzelle SI

Anhang E

Daten der SM-1 Sonde. Darstellung der Wasseranteile bis 90 cm Bodentiefe in 10 cm Schritten.



Abbildung 63: Bodenwasserprofil DI



Abbildung 64: Bodenwasserprofil NI



Abbildung 65: Bodenwasserprofil SI

Anhang F Bodenwasser

Wasser ist unter natürlichen Bedingungen stets in Böden enthalten. Durch Trocknen bei 105°C für 16 Stunden wird das Bodenwasser aus der Bodenprobe entfernt und als Wasseranteil in Massen-% oder Vol.-% definiert. Wasseranteile, die erst bei höheren Temperaturen entzogen werden, sind kein Bestandteil des Bodenwassers. Diese verbleiben in der Bodenmatrix und werden als Konstitutions- bzw. Kristallwasser der Bodenpartikel bezeichnet (Scheffer et al. 2010, 220). Das Bodenwasser speist sich aus Niederschlägen, Grundwasser und zu einem kleinen Anteil aus Kondensation aus der Atmosphäre. In Reinform tritt das Bodenwasser nicht auf, es enthält stets gelöste Salze und Gase in wechselnden Anteilen und Zusammensetzungen (Amelung et al. 2018, 275).

Das in den Poren gegen die Einwirkung der Schwerkraft gehaltene Wasser wird als Haftwasser oder auch Bodenfeuchte bezeichnet. Das Sickerwasser hingegen wird von der Schwerkraft in tiefere Zonen verlagert (Scheffer et al. 2010, 220). Ferner wird unterschieden zwischen Stauwasser, das nur zeitlich begrenzt auftritt, und dem Grundwasser, das jährlich vorhanden ist. Über der Grundwasseroberkante befindet sich die vadose Zone, die in Österreich als Kapillarsaum bezeichnet wird. In dieser Zone liegt eine Vollsättigung des Bodens, jedoch nach wie vor ein negativer Spannungszustand. Per Definition weist die Grundwasseroberfläche einen gleichen oder höheren Druck als der atmosphärische Luftdruck auf (Scheffer et al. 2010, 220; G Kammerer und Loiskandl 2005, 15).

Da, abhängig von Standort und Grundwasserspiegel, Wurzeln das Grundwasser meist nicht erreichen ist, das Haftwasser, welches sich in Adsorptionswasser und Kapillarwasser aufteilt, für die Pflanzenversorgung von großer Bedeutung. Kulturpflanzen nehmen in der Regel eben nur jenes Wasser aus Grob- und Mittelporen auf, das gegen die Schwerkraft von der Bodenmatrix gehalten werden kann oder über den Kapillarsaum aufsteigt (Amelung et al. 2018, 495).

Als Adsorptionswasser wird der Anteil bezeichnet, der unter der Wirkung von Adsorptionskräften und osmotischen Kräften steht. Zwischen Korngerüst und Wassermolekülen entstehen die Adsorptionskräfte zum einen aus den Van-der-Waals-Kräften und zum anderen aus den elektrostatischen Kräften zwischen Bodensubstanzen und Wassermolekülen. Mit abnehmender Korngröße und damit größer werdender spezifischer Oberfläche nimmt der Wasseranteil zu (Scheffer et al. 2010, 221).

Potentialtheorie

In der Bodenkunde ist es üblich, anstatt der Kräfte, die durch bzw. auf das Bodenwasser wirken, die Arbeitsfähigkeit, das sogenannte Potential, zu betrachten. Das Potential setzt sich aus mehreren Teilpotentialen zusammen und ist als diejenige Arbeit definiert, die notwendig ist, um eine Mengeneinheit Wasser auf eine bestimmte Höhe einer Pore (Kapillare) zu befördern oder diese der Bodenmatrix zu entziehen. Alle Bewegungsvorgänge im Bodenwasser wie Infiltration, Drainage und kapillarer Aufstieg verlaufen in Richtung des negativeren Potentials. Die Bewegung hält solange an, bis das Gesamtpotential den gleichen Wert aufweist (Amelung et al. 2018, 279).

Das Gesamtpotential setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Psi = \Psi_Z + \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o \tag{3.}$$

Das Gravitationspotential (Ψ_Z) entspricht der Arbeit, die notwendig ist, um eine bestimmte Menge Wasser von einem Bezugsniveau auf eine bestimmte Höhe zu befördern. Alternativ wird deshalb die Bezeichnung geodätisches Potential verwendet. Das Gravitationspotential ist mit einem positiven Vorzeichen versehen. An der Wasseroberfläche ist Ψ_Z = 0 und nimmt mit zunehmendem Abstand positive Werte an. Mit Ψ_m wird das Matrixpotential beschrieben. Es ist ein Maß für alle durch die Matrix ausgeübten Einflüsse auf das Wasser. Mit abnehmendem Wassergehalt wird dieses von den matrixbedingen Kräften stärker gehalten. Das osmotische Potential Ψ_o ist abhängig von der Menge an gelösten Salzen und daher eher in Böden arider Gegenden oder Küstengebieten von Bedeutung. Es entspricht der zu verrichtenden Arbeit, die notwendig ist, um eine bestimmte Menge Wasser durch eine semipermeable Membran aus der Bodenlösung zu ziehen. Ψ_g bezeichnet das Gaspotential, das berücksichtigt werden muss, wenn der Luftdruck im Boden nicht mit dem Bezugsniveau übereinstimmt (Amelung et al. 2018, 280).