

Meinardi, Dominic et al.

Working Paper

Sensorgestützte Berechnung von Kartoffeln: Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen

Thünen Working Paper, No. 179

Provided in Cooperation with:

Johann Heinrich von Thünen Institute, Federal Research Institute for Rural Areas, Forestry and Fisheries

Suggested Citation: Meinardi, Dominic et al. (2021) : Sensorgestützte Berechnung von Kartoffeln: Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen, Thünen Working Paper, No. 179, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, <https://doi.org/10.3220/WP1628164998000>

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/244388>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Sensorgestützte Berechnung von Kartoffeln

Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen

Dominic Meinardi, Johanna
Schröder, Angela Riedel, Klaus
Röttcher, Martin Kraft, Jürgen
Grocholl, Klaus Dittert



Dominic Meinardi, Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Institut für nachhaltige Bewässerung und Wassermanagement im ländlichen Raum
Herbert-Meyer-Straße 7
29556 Suderburg
d.meinardi@ostfalia.de, k.roettcher@ostfalia.de

Johanna Schröder
vormals Johann Heinrich von Thünen-Institut
vormals Institut für Agrartechnologie
johanna-maria-schroeder@web.de

Angela Riedel
Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Geschäftsbereich Landwirtschaft
Angela.Riedel@lwk-niedersachsen.de

Martin Kraft
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Institut für Agrartechnologie
martin.kraft@thuenen.de

Dr. Jürgen Grocholl
Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Bezirksstelle Uelzen
Juergen.Grocholl@lwk-niedersachsen.de

Prof. Dr. Klaus Dittert
Georg-August-Universität Göttingen
Department of Crop Sciences
klaus.dittert@agr.uni-goettingen.de

Thünen Working Paper 179

Braunschweig/Germany, 2021

Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln

Eine Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen

Wissenschaftlicher Abschlussbericht

Projektlaufzeit: 18.05.2016 bis 15.02.2020



Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln (SeBeK) ist ein Projekt der Europäischen Innovationspartnerschaft „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft“ (EIP Agri).

Die Zuwendung wird gewährt aus Landesmitteln und Mitteln der Europäischen Union aus dem Europäischen Landwirtschaftsfonds für die Entwicklung des ländlichen Raums (ELER) im Rahmen des Programms zur Förderung der Entwicklung im ländlichen Raum Niedersachsen und Bremen 2014 bis 2020 (Pfeil)

Durchgeführt von der Operationellen Gruppe „Nachhaltige Bewässerung“
unter der Leitung der Ostfalia Hochschule

Registriernummer: 276 03 158 037 0257

Projektpartner Operationelle Gruppe Nachhaltige Bewässerung



Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften (Koordination)

Institut für Nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum
Herbert-Meyer-Str. 7, 29556 Suderburg



Landwirtschaftskammer Niedersachsen

Fachbereich Pflanzenbau und Bezirksstelle Uelzen
Wunstorfer Landstraße 11, 30453 Hannover



Johann Heinrich von Thünen-Institut

Thünen-Institut für Agrartechnologie
Bundesallee 47, 38116 Braunschweig



Georg-August-Universität Göttingen

Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung „Pflanzenernährung und Ertragsphysiologie“
Carl-Sprengel-Weg 1, 37075 Göttingen

Landwirt Hartmut Becker

Hof Becker
Holdenstedter Weg 1, 29559 Wrestedt

Beteiligte Personen im SeBeK Projekt

Prof. Dr.-Ing. Klaus Röttcher	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Dipl.-Ing. (FH) Dominic Meinardi M.Sc.	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Iris Dahms M.Sc.	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Christine Schröder	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Hanna Fragstein B.Sc.	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Abbas Sadeghi Azad M.Sc.	Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften
Dr. Jürgen Grocholl	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Ekkehard Fricke	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Angela Riedel	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Andreas Meyer	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Caroline Remmert	Landwirtschaftskammer Niedersachsen
Eckhard Späth	LWK Niedersachsen, Versuchsfeld Hamerstorf
Rainer Wegmeyer	LWK Niedersachsen, Versuchsfeld Hamerstorf
Dennis Bockelmann	LWK Niedersachsen, Versuchsfeld Hamerstorf
Dipl.-Inform. Martin Kraft	Johann Heinrich von Thünen-Institut
Dipl.-Ing. (FH) Jano Anter M.Sc.	Johann Heinrich von Thünen-Institut
Johanna Schröder M.Sc.	Johann Heinrich von Thünen-Institut
Prof. Dr. Klaus Dittert	Universität Göttingen
Hartmut Becker	Hof Becker

Zusammenfassung

Die Beregnungssteuerung ist ein wichtiges Instrument für eine effiziente Wassernutzung bei der Feldbewässerung. Die Ermittlung des Wasserbedarfs der Pflanzen in einem Bestand kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Neben Beregnungsempfehlungen von offiziellen Stellen können unter anderem Berechnungen der Wasserbilanz angestellt werden, eine Inaugenscheinnahme des Bodens erfolgen, oder Messwerte von Sensoren, z.B. zur Bodenfeuchte genutzt werden. Das im Rahmen von EIP-Agri geförderte Projekt „Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln (SeBeK)“ befasste sich mit der Entwicklung einer innovativen Methode, den Bewässerungsbedarf in Kartoffeln anhand des Crop Water Stress Index (CWSI) zu ermitteln. Dazu wurden an mehreren Kartoffelschlägen Sensormessnetze installiert, die neben der Blattemperatur der Kartoffelpflanzen auch Wetterdaten aufgezeichnet haben. Neben den Feldversuchen mit einem regionalen Landwirtschaftsbetrieb wurden auf den Versuchsflächen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen Exaktversuche durchgeführt, die verschiedene Beregnungswassermengen zur Entwicklung, Kalibrierung und Prüfung des CWSI, aber auch die Wechselwirkungen zwischen der Wasserversorgung und der Kalidüngung untersucht haben. Für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden weitere Ansätze zur Beregnungssteuerung betrachtet. Um den Einfluss der Variabilität lokaler Wetterbedingungen auf die Wasserversorgung der Bestände zu untersuchen, wurden im Projektgebiet Wetteraufzeichnungen an verschiedenen Standorten betrachtet. Die mit Hilfe des CWSI ermittelten Beregnungsempfehlungen decken sich mit den Ergebnissen auf Basis der gravimetrisch ermittelten nutzbaren Feldkapazität. Die Untersuchungen zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, anhand einer Sensorüberwachung aussagekräftige Beregnungsempfehlungen zu ermitteln. Das erforderliche Sensormessnetz ist allerdings zu diesem Zeitpunkt nicht praxistauglich. Eine Vereinfachung der Messung und Auswertung zur Bestimmung des CWSI muss das Ziel weiterer Untersuchungen sein. Denkbar sind unter anderem Messungen mit Temperatursensoren, die an landwirtschaftlichen Fahrzeugen (Schlepper) oder an Drohnen montiert sind.

Schlagwörter: Kartoffel, Feldberegnung, Beregnungssteuerung, Crop Water Stress Index, CWSI, Bestandstemperatur, Blattemperatur, Wassernutzungseffizienz, Kalidüngung, Nordostniedersachsen.

Summary

Irrigation management is an important contribution to efficient water usage in field irrigation. Different approaches are used to determine crop water demand and the best time for irrigation, such as irrigation recommendations by official consulting services, water balance modelling, visual and physical inspection, and sensor based informations like soil moisture. The “Sensor based irrigation” research project within the EIP-Agri funding scheme by the European Commission focussed on the development of an innovative method to determine the water demand of potato plants using the Crop Water Stress Index (CWSI). Sensor networks have been installed at different potato fields to monitor not only the (plant) leaf temperature but also to record meteorological parameters. Trials have been set up at different fields of a local farmer and in the research station operated by the chamber of agriculture in the federal state of Lower Saxony to develop, calibrate and test the CWSI as well as studying the interactions between water supply and potash based fertilizers. To compare the results, different approaches to identify the water demand were considered. To study the impact of local variations of weather conditions, several monitoring stations in the region have been evaluated. The findings on the irrigation management following the CWSI approach are congruent to the results based on gravimetrically analysed water holding capacity. The results indicate, that it is possible to develop a sensor based irrigation management with reliable irrigation management information. However, the required sensor network is not practical at this time. A simplification of the monitoring and evaluation process to determine the CWSI should be the focus of further research. It is conceivable that future monitoring will be performed by sensors installed on tractors or drones.

Potato, field irrigation, irrigation management, Crop Water Stress Index, CWSI, canopy temperature, leaf temperature, water use efficiency, potash fertilization, Lower Saxony

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass und Motivation	1
2	Bewässerung von Kartoffeln	4
2.1	Hintergründe und Grundlagen zur Bewässerungspraxis in Kartoffeln	4
2.2	Bewässerungspraxis in der Projektregion	9
2.3	Meteorologie der Projektregion	11
2.3.1	Verfügbare meteorologische Daten	12
2.3.2	Auswertung und Vergleich ausgewählter meteorologischer Daten	16
2.4	Berechnungsempfehlungen	20
3	Anwendung des Crop Water Stress Index in Kartoffeln in Nordostniedersachsen	25
3.1	Historie und Entwicklung des Crop Water Stress Index	25
3.2	Grundlagen der CWSI-Berechnung und angewandte Methodik	30
3.2.1	Grundlagen: Einflussgrößen und formelrelevante Parameter	30
3.2.2	Verwendete Methodik und Messausstattung	35
3.3	Ergebnisse, Auswertung und Weiterentwicklung der Methode	37
3.3.1	Berechnung des Crop Water Stress Index	37
3.3.2	Abhängigkeit der Bestandstemperatur vom Sonnenstand	43
3.3.3	Korrelation zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und CWSI	47
3.3.4	Empirische CWSI-Ermittlung nach Idso et al. (1981)	53
3.4	Fazit	56
4	Feldversuche, Feldmessungen und Ergebnisse	60
4.1	Parzellenversuche, Standort Hamerstorf	60
4.1.1	Allgemeine Beschreibung des Standortes	60
4.1.2	Versuchsanlage	62
4.1.3	Versuchsdurchführung	65
4.1.3.1	Randbedingungen in der Anbausaison 2017	65
4.1.3.2	Randbedingungen in der Anbausaison 2018	66
4.1.3.3	Randbedingungen in der Anbausaison 2019	69
4.1.4	Ergebnisse	71
4.1.4.1	Erträge	71
4.1.4.2	Bestimmung des CWSI	75
4.1.4.3	Bedeutung der Kaliumernährung bei Kartoffeln unter Beregnung	79
4.2	Messungen auf Praxisflächen, Standort Niendorf II	82
4.2.1	Allgemeine Beschreibung des Standortes	82
4.2.2	Versuchsaufbau und Messensorik	83

4.2.3	Versuchsdurchführung	84
4.2.3.1	Randbedingungen in der Anbausaison 2017	84
4.2.3.2	Randbedingungen in der Anbausaison 2018	86
4.2.3.3	Randbedingungen in der Anbausaison 2019	87
4.2.4	Weitere Untersuchungen	89
4.2.5	Auswertung und Zusammenfassung der Messergebnisse	90
4.2.5.1	Bestimmung des CWSI	90
4.2.5.2	Auswertung der Messfahrten mit dem Schlepper	95
4.3	Beurteilung des CWSI als Instrument zur Bewässerungssteuerung	97
5	Zusammenfassung und Aspekte der Implementierung	99
5.1	Optimierung der Wassernutzungseffizienz	100
5.2	Perspektiven der Implementierung	102

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Kartoffelanbaufläche weltweit in ha. (FAOSTAT)	5
Abbildung 2-2:	Kartoffelanbauflächen in 2017. (FAOSTAT)	6
Abbildung 2-3:	Kartoffelproduktion weltweit in 2017. (FAOSTAT)	6
Abbildung 2-4:	Gegenüberstellung der Kartoffelerträge in 2017 (Datenquelle: FAOSTAT, Landwirtschaftskammer Niedersachsen)	8
Abbildung 2-5:	Bei der Befragung angegebene Möglichkeiten zur Bestimmung des Berechnungszeitpunktes (Bagdahn und Meinardi 2018)	10
Abbildung 2-6:	Anteil der verschiedenen Bewässerungssysteme in der Projektregion auf Basis der Umfrage im Rahmen des SeBeK-Projektes (Bagdahn und Meinardi 2018)	10
Abbildung 2-7:	Übersichtskarte der Standorte der meteorologischen Messstationen	14
Abbildung 2-8:	Darstellung der Niederschlagssummen der Jahre 2013 bis 2018 an den Messstationen Ostfalia, DWD und Stoecken	15
Abbildung 2-9:	Darstellung der Niederschlagssummen der Jahre 2017 und 2018 an den betrachteten Messstationen	15
Abbildung 2-10:	Niederschlagsverteilung in der Projektregion 2017	16
Abbildung 2-11:	Niederschlagsverteilung in der Projektregion 2018	17
Abbildung 2-12:	Niederschläge vom 21. bis 27.Juli 2017	18
Abbildung 2-13:	Niederschlagssummen im Monat Juli 2017	18
Abbildung 2-14:	Niederschlagssummen an den Messstationen am 25.07.2017	19
Abbildung 2-15:	Stündliche Niederschlagssummen von 00:00 Uhr bis 12:00 Uhr am 25.07.2017	19
Abbildung 3-1:	Typisches Windprofil über einem Pflanzenbestand der Höhe h . Das logarithmische Windprofil erreicht die Windgeschwindigkeit 0 in der Höhe $d + z_0$ (Oke 1987).	34
Abbildung 3-2:	Aufbau der Messstationen im SeBeK-Versuch: In Reihe aufgebaute Sensorik am Standort Hamerstorf (oben), ausgestattet mit sechs zum Bestand ausgerichteten Infrarotsensoren und meteorologischen Messgeräten. Unteres Foto: kreisförmiger Messaufbau am Standort Niendorf II, ausgestattet mit vier schräg und einem senkrecht zum Bestand ausgerichteten Infrarotsensoren sowie meteorologischen Messgeräten. Fotos: Thünen-Institut (2018; 2019).	36

Abbildung 3-3:	Errechneter CWSI für den Standort "Niendorf groß" beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 30.06 bis 07.07.2018.	38
Abbildung 3-4:	Errechneter CWSI für den Standort "Niendorf groß" beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 23. bis 27.07.2019.	39
Abbildung 3-5:	Errechneter CWSI am Standort Hamerstorf beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 20. bis 29.07.2018.	40
Abbildung 3-6:	Errechneter CWSI für den Standort Hamerstorf beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 23. bis 28.07.2019.	41
Abbildung 3-7:	Temperaturverlauf der Bestandstemperatur an allen vier Positionen (Norden, Süden, Osten, Westen) an der großen Messstation in Niendorf II, dargestellt für einen sonnigen Tag (04. Juli 2018). Zusätzlich ist die einfallende Globalstrahlung (K_{\downarrow}) dargestellt.	43
Abbildung 3-8:	Vergleich der gemessenen Bestandstemperatur mit dem korrigierten Wert für alle vier Himmelsrichtungen, beispielhaft dargestellt für den 04. Juli 2018, ein warmer Tag mit klaren Strahlungsverhältnissen.	45
Abbildung 3-9:	Korrelation zwischen dem mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt (Mittelwert aus sechs Tiefen (10 bis 60 cm)) und dem errechneten CWSI für die mit der Bodenfeuchtesonde ausgestatteten Parzelle (je eine optimal und reduziert bewässert).	47
Abbildung 3-10:	Korrelation zwischen dem mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt (Mittelwert aus sechs Tiefen (10 bis 60 cm)) und dem errechneten CWSI für die mit der Bodenfeuchtesonde ausgestatteten Parzelle (je eine optimal und reduziert bewässert).	48
Abbildung 3-11:	Die Temperaturdifferenz (ΔT) der Bestandstemperatur (TC) und der Lufttemperatur (TA) gegen das Sättigungsdampfdruckdefizit (VPD), am Standort „Niendorf groß“ zum Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke (20.06 bis 02.08.2018).	54
Abbildung 3-12:	Empirischer CWSI-Ansatz nach Idso et al. (1981), dargestellt anhand von Messungen der Temperaturdifferenz (ΔT) gegen das Sättigungsdefizit (VPD) für die Messstation „Niendorf groß“ für den Zeitraum 20.06 bis 02.08.2018 zwischen 14:30 und 16 Uhr.	55
Abbildung 4-1:	Beregnungsversuchsfeld Versuchsstation Hamerstorf, SeBeK	61
Abbildung 4-2:	Bodenprofil des Versuchsstandortes, Profilsprache LBEG Niedersachsen (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)	62
Abbildung 4-3:	Reihenartiger Aufbau der Messstation am Standort Hamerstorf mit Ausrichtung der Sensoren gen Süden. Schematisch dargestellt anhand des Messaufbaus im Versuchsjahr 2018 über der Speisekartoffel Amanda (Foto: Thünen-Institut).	64

Abbildung 4-4:	Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2017	65
Abbildung 4-5:	Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2018	66
Abbildung 4-6:	Versuchsbesichtigung am 27.6.2018. Der Düsenwagen fährt mittig in Längsrichtung über das Versuchsfeld (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)	68
Abbildung 4-7:	Versuchsbesichtigung am 27.6.2018. Mitglieder des SEBEK-Teams vor der Beregnungsmaschine (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)	68
Abbildung 4-8:	Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2019	69
Abbildung 4-9	Gehalte des reduzierenden Zuckers Fruktose in Kartoffelknollen des Sebek-Feldversuchs in Hamerstorf für das Untersuchungsjahr 2019 (ungedüngt: ohne Kaliumdüngung, gedüngt: 240 kg K ₂ O ha ⁻¹ . Quelle: Bachelorarbeit Dina Schärfe, Universität Göttingen 2020).	81
Abbildung 4-10:	Position der Messstandorte im Gebiet Niendorf II in den drei Versuchsjahren 2017 (gelb), 2018 (blau) und 2019 (grün)	83
Abbildung 4-11:	Kreisförmiger Messaufbau der Messstation auf den Praxisflächen in Niendorf II. Schematisch dargestellt für den Messaufbau über der Speisekartoffel Belana im Versuchsjahr 2019 (Foto: Thünen-Institut).	84
Abbildung 4-12:	Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2017 (28.07 bis 18.08.2017) an der großen Messstation am Standort Niendorf II.	85
Abbildung 4-13	Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2018 (24.05 bis 18.09.2018) an der großen Messstation am Standort Niendorf II.	87
Abbildung 4-14:	Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2019 (17.05 bis 21.08.2019) an der großen Messstation in Niendorf II.	88
Abbildung 4-15:	Schlepper mit installierten Sensoren bei einer Überfahrt im Sommer 2018 (Foto: INBW, Ostfalia)	89
Abbildung 4-16:	Interpolation der CWSI-Werte auf die gesamte Ackerfläche im Bereich der Befahrung, dargestellt für die Messfahrt am 29. Juni 2018 zwischen 11:46 und 12:04 Uhr am Standort „Niendorf groß“.	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Gegenüberstellung der Berechnungszeitpunkte und der Berechnungswassermengen im Jahr 2018 und 2019.	23
Tabelle 3-1:	Gemittelter Korrekturwert, berechnet für die Speisekartoffeln für die Jahre 2018 und 2019.	46
Tabelle 3-2:	CWSI, Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$) und der mittlere volumetrische Bodenwassergehalt (Vol.%), beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 16. bis 22.07.2018.	50
Tabelle 3-3:	CWSI, Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$) und der mittlere volumetrische Bodenwassergehalt (Vol.%), beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 04. bis 05.07.2019.	50
Tabelle 4-1:	Kenndaten zum Versuchsstandort Hamerstorf	61
Tabelle 4-2:	Versuchsvarianten am Standort Hamerstorf	63
Tabelle 4-3:	Versuchsvarianten zur Prüfung des Einflusses der Kalidüngung	63
Tabelle 4-4:	Berechnungsgaben der Vegetationsperiode 2017	66
Tabelle 4-5:	Berechnungsgaben in der Vegetationsperiode 2018	67
Tabelle 4-6:	Berechnungsgaben in der Vegetationsperiode 2019	70
Tabelle 4-7:	Auswertung der Knollenerträge 2017 - 2019	73
Tabelle 4-8:	Auswertung der Untergrößen 2017 - 2019	74
Tabelle 4-9:	Auswertung der Übergrößen 2017 – 2019	74
Tabelle 4-10:	Auswertung des Stärkegehalts 2017 – 2019	74
Tabelle 4-11:	Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2018 für die beiden Berechnungsvarianten (reduziert/optimal) zwischen 14 und 16 Uhr am Standort „Hamerstorf“.	77
Tabelle 4-12:	Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2019 für die beiden Berechnungsvarianten (reduziert/optimal) zwischen 14 und 16 Uhr am Standort „Hamerstorf“.	78
Tabelle 4-13:	Kenndaten zum Versuchsstandort Niendorf II (Wrestedt)	82
Tabelle 4-14:	Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2017.	85
Tabelle 4-15:	Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2018.	86

Tabelle 4-16:	Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2019.	88
Tabelle 4-17:	Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2018 zwischen 14 und 16 Uhr am Standort "Niendorf groß".	91
Tabelle 4-18	Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2019 zwischen 14 und 16 Uhr am Standort "Niendorf groß".	94

1 Anlass und Motivation

Der Kartoffelanbau ist ein wichtiges Standbein der Landwirtschaft in der Region Nordostniedersachsen. Nahezu 50% der gesamten deutschen Kartoffelproduktion werden in Niedersachsen erzeugt und ungefähr 25% der gesamtdeutschen Speisekartoffelproduktion kommt aus der Region Nordostniedersachsen (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2018). Die Kartoffel wird überwiegend auf leichten Böden angebaut, die eine geringe Wasserspeicherkapazität aufweisen. Bei erhöhten Niederschlägen minimiert sich so das Risiko von Staunässe, und die Kartoffeln lassen sich bei der Ernte gut vom Boden trennen. Allerdings weisen sie eine geringe Wasserspeicherkapazität auf, bei trockenen Wetterlagen entwickelt sich schnell ein Trockenstress für die Pflanze. Kartoffeln bilden ihren Hauptwurzelbereich bis ca. 40 cm Bodentiefe und versorgen sich hauptsächlich aus dieser Tiefe mit Wasser (Lüttger et al., 2005). Die Kombination aus einem durch die Wurzeltiefe eingeschränktem Wasserangebot und Böden, die eine geringe nutzbare Feldkapazität (nFK) aufweisen, führt zu einem hohen Beregnungsbedarf für Kartoffeln. Laut Fricke (2008) ist die Beregnung für Betriebe, die auf leichten Böden wirtschaften ein unverzichtbares Betriebsmittel für die Absicherung ausreichender Erträge und die Einhaltung geforderter Qualitäten. Eine gute Wasserversorgung der Kartoffel in bestimmten Entwicklungsstadien der Pflanzenentwicklung hat große Auswirkung auf die Qualität. So können neben dem Knollenertrag auch die Knollengröße und der Stärkegehalt positiv beeinflusst werden, auch eine Reduzierung des Schorfbefalls ist möglich (Wölfel et al., 2010).

Nordostniedersachsen zählt zu den beregnungsintensivsten Regionen in Deutschland, weil die Beregnung auf Grund ihrer Relevanz für den landwirtschaftlichen Sektor seit mehreren Jahrzehnten intensiv ausgebaut wurde. Die Region Uelzen ist die beregnungsintensivste Region in Deutschland.

Das Projektgebiet des EIP Innovationsprojektes „Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln“ umfasst den Großraum Nordostniedersachsen, konzentriert sich in der Projektabwicklung aber auf den Landkreis Uelzen, der der bewässerungsintensivste Landkreis in Deutschland ist. Während laut der statistischen Ämter des Bundes und der Länder der Anteil der bewässerten Flächen in der Landwirtschaft für Deutschland bei 2,2 % liegt, ist der Anteil im Landkreis Uelzen mit 72,5 % sehr viel höher (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, 2011) und übersteigt auch die weltweit insgesamt bewässerte landwirtschaftliche Fläche von 21 % fast um das Dreifache (AQUASTAT, 2014). Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen (2008) gibt in Ihrem Abschlussbericht zum „No Regret“- Projekt an, dass die Beregnungsinfrastruktur in den Landkreisen Lüneburg, Uelzen, Lüchow-Dannenberg und Gifhorn in etwa 90 % der landwirtschaftlichen Nutzflächen umfasst.

In Zukunft ist ein Anstieg der landwirtschaftlichen Bewässerung zu erwarten. Dies ist zum einen durch eine Erhöhung der Landnutzungsintensität begründet, bei der ein hohes Ertragsniveau an

Wettbewerbskraft gewinnt, zum anderen durch ein sich veränderndes Klima (UBA, 2015, p. 120). Die Zunahme von Starkregenereignissen, die nicht im vollen Umfang pflanzenverfügbar sind, sowie die Erhöhung der Evaporation aufgrund steigender Temperaturen, reduzieren die für Pflanzen verfügbare Wassermenge. Müller et al. (2012) schildern einen klimawandelbedingten Anstieg der potentiellen Beregnungsbedürftigkeit in Niedersachsen auf Basis des regionalen Klimamodells WETTREG2010. Für den Referenzzeitraum 1961-1990 ergibt sich eine mittlere Beregnungsmenge von 79 mm/a für den Landkreis Uelzen, was sich mit den durchschnittlich genehmigten Entnahmemengen von 80 mm/a im gleitenden Mittel sehr gut deckt (Mersch et al., 2011). Ausgehend von einer konstanten Beregnungsfläche berechnet das Modell für den Zeitraum 2011-2040 einen klimabedingten Anstieg auf 89 mm/a, für den Zeitraum 2041-2070 einen Anstieg auf bis zu 102 mm/a und 110 mm/a für den Zeitraum 2071-2100. Durch den Klimawandel vergrößert sich der Beregnungswasserbedarf daher nicht nur durch die Erschließung neuer Flächen für Beregnung, sondern auch durch einen erhöhten Zusatzwasserbedarf in der Anbausaison. Auch die außergewöhnlichen Dürrephasen im Jahr 2018 und im Frühsommer 2019 zeigen auf dramatische Weise einen großen Bedarf an Beregnungsinfrastruktur auf, nicht nur in den Regionen mit leichten Böden. Durch diese Faktoren in Kombination mit der steigenden Nutzungskonkurrenz um die Ressource Wasser steht die Landwirtschaft vor der wichtigen Aufgabe sich durch eine Optimierung der Feldberegnung an die herrschenden und zukünftigen Bedingungen anzupassen.

Um im Rahmen dieser Anpassung neue Möglichkeiten für eine effizientere Beregnung zu entwickeln wurde das Innovationsprojekt „Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln (SeBeK)“ angestoßen. Dafür wurde die Operationelle Gruppe „Nachhaltige Bewässerung“ gegründet, deren Mitglieder ihre spezifischen Kompetenzen in die Gruppe einbringen.

- Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Campus Suderburg
- Thünen-Institut für Agrartechnologie, Braunschweig
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Bezirksstelle Uelzen und Fachbereich Pflanzenbau
- Georg-August-Universität Göttingen, Institut für Pflanzenernährung und Ertragsphysiologie
- Landwirtschaftsbetrieb Hartmut Becker in Wrestedt/Niendorf

Das Ziel des Projektes ist es, die Bewässerung in Kartoffeln durch die Einführung einer neuen, sensorgestützten Beregnungssteuerung weiter zu optimieren. Als Ansatz hierfür wird der Crop Water Stress Index (CWSI) zugrunde gelegt, der Aufschluss über die Wasserversorgung des Pflanzenbestandes gibt. Die Theorie dahinter besagt, dass die Pflanze bei guter Wasserversorgung eine optimale Transpirationsrate aufweist, die zur Kühlung der Pflanze beiträgt. Bei unzureichendem Wasserangebot tritt eine Stresssituation ein, auf die die Pflanze mit einer Reduzierung der Stomataweite reagiert, woraus eine verringerte Transpiration folgt. Damit reduziert sich die Verdunstungskühlung der Pflanze, was zu einer höheren Bestandstemperatur führt. Bei ausreichend starkem Trockenstress und abhängig von der Wettersituation kann die Blatttemperatur von Kartoffeln um bis zu 3 °C über der Temperatur der Umgebungsluft und um bis zu 8 °C über der Blatttemperatur optimal wasserversorgter Pflanzen liegen (Stark and Wright, 1985). Der CWSI erlaubt eine Aussage zur Transpirationsrate der Pflanze unter Berücksichtigung

der Lufttemperatur und somit zur Wasserversorgung des Bestandes. Dieser Bericht wird in den folgenden Kapiteln das Verfahren und den Versuchsaufbau detailliert erläutern.

Die Entscheidung über Zeitpunkte und Mengen der Beregnung basiert heute überwiegend auf den eigenen Erfahrungen der Landwirte und agrarklimatischen Modellen und Vorhersagen (z.B. „agrowetter Beregnung“ des Deutschen Wetterdienstes; Hinweisdienst des Fachverbandes Feldberegnung e.V.). Für eine weitere Optimierung und die Berücksichtigung schlagspezifischer Daten stehen verschiedene EDV-gestützte Modelle zur Verfügung. Der Aufwand für Datenbeschaffung und -eingabe begrenzt die Anwendung in der Praxis. Während die Modelle eine gute Grundlage für die Beregnungssteuerung liefern, besteht bei den kulturartspezifischen Feinheiten noch Optimierungsbedarf (Riedel, 2014).

Der Ansatz, den Beregnungsbedarf anhand von Bodenfeuchtemessungen mit Bodenfeuchte-sensoren zu bestimmen, wird durch die erhebliche Streuung und Unsicherheit der punktuellen Bodenfeuchtemessungen erschwert. Mit den derzeit verfügbaren Hilfsmitteln verbleiben bei den Beregnungsentscheidungen Unsicherheiten, die einen optimalen Einsatz der Feldberegnung erschweren. Die für Nordostniedersachsen dargestellte Problemlage besteht in ähnlicher Form in allen Beregnungsgebieten Deutschlands und weltweit. Die für Niedersachsen erarbeiteten Lösungsansätze leisten daher neben der Optimierung der landwirtschaftlichen Urproduktion in Nordostniedersachsen einen wichtigen Beitrag zur Lösung ähnlicher Problemlagen in anderen Regionen und bieten Wettbewerbschancen für niedersächsische Unternehmen.

Ein weiteres Ziel des Projektes ist die Bildung und die Verstetigung eines Netzwerkes im Bereich der Bewässerung und der Wasserwirtschaft in ländlichen Räumen. Hierfür soll zu Ende des Projektes ein Institut für nachhaltige Bewässerung gegründet werden, dessen Aufgabe neben der Präsentation der Projektergebnisse auch die Funktion einer dauerhaften Anlaufstelle für Fragestellungen rund um das Thema Bewässerung sein wird. Als Denkfabrik (thinktank), bzw. als eingetragener Verein kann das Institut den Spagat zwischen Forschung, Entwicklung und Implementierung realisieren und als Ansprechpartner für Hochschulen/Forschungseinrichtungen, Firmen, Landwirte, Verbände und öffentliche Einrichtungen auch über die Projektlaufzeit hinaus dienen. Training, Aus- und Weiterbildung in relevanten Bereichen sollen ebenfalls im Institut thematisiert werden. Gefördert wird das Projekt im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft „Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft (EIP Agri)“ und dem Land Niedersachsen.

2 Bewässerung von Kartoffeln

Dominic Meinardi, Klaus Röttcher

Institut für nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften

2.1 Hintergründe und Grundlagen zur Bewässerungspraxis in Kartoffeln

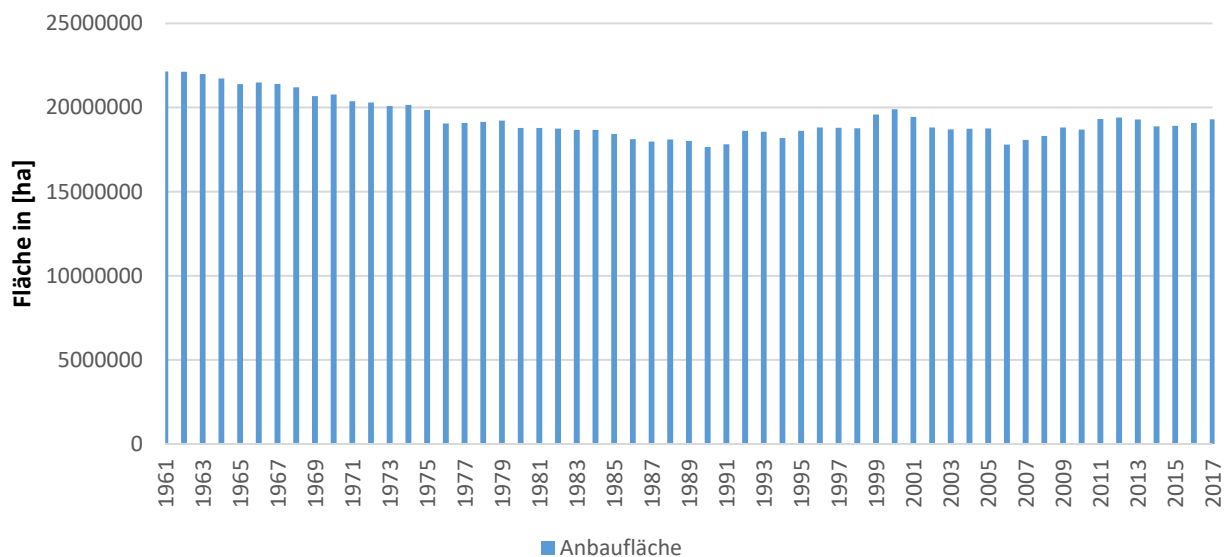
Die Bewässerung ist eine der ältesten bekannten Bewirtschaftungsmethoden in der Landwirtschaft, erste Nachweise können bis zu über 7.500 Jahre in Mesopotamien zurückverfolgt werden. Sie kann eingesetzt werden um Erträge zu steigern bzw. zu sichern, oder um den Anbau von landwirtschaftlichen Erzeugnissen überhaupt erst zu ermöglichen. Heute werden etwa 21 % aller landwirtschaftlichen Flächen weltweit bewässert. Grundsätzlich kann zwischen den drei folgenden Bewässerungstechniken unterschieden werden: Der Überstaubewässerung, bei der eine Fläche mit Wasser für eine bestimmte Zeitspanne überstaut wird. Das Bewässerungswasser versickert, bzw. verdunstet nach einiger Zeit, bei Bedarf wird die Bewässerung dann wiederholt. Die Überstaubewässerung ist die älteste Methode und heutzutage werden etwa 86 % aller bewässerten Flächen weltweit auf diese Weise bewässert. Das System ist das kostengünstigste, aber auch das am wenigsten effizienteste. Eine weitere Methode ist die Sprinklerbewässerung, bei der das Wasser über Schläuche zu Düsen transportiert wird, durch die es anschließend versprüht wird. Diese Systeme sind bereits kostenintensiver, da neben Kosten für die Beregnungstechnik auch laufende Kosten für z.B. den Transport der Systeme oder Pumpen anfallen. Weltweit kommen diese Systeme auf ungefähr 11 % aller bewässerten Flächen zum Einsatz. Mit in etwa 9 % Anteil an der weltweiten Bewässerung ist die Mikrobewässerung am geringsten vertreten, nicht zuletzt aufgrund ihrer hohen Investitionskosten, der hohen laufenden Kosten und dem Installations- und Wartungsaufwand. Dafür bietet eine Mikrobewässerung die höchste Effizienz, da das Bewässerungswasser exakt am erforderlichen Punkt aufgebracht und die benötigte Menge genau dosiert werden kann. Hierdurch wird auch die Verdunstung des Wassers reduziert, was wiederum zur hohen Effizienz dieser Technik beiträgt. Weiterhin können Düngemittel mit dem Bewässerungswasser aufgebracht werden, wodurch diese genau dosiert und exakt aufgebracht werden können. (FAO, 2014)

Für das Innovationsprojekt ist die Überstaubewässerung, bzw. die Oberflächenbewässerung nicht weiter relevant, da diese in Deutschland nicht mehr angewandt wird. Sourell (2014) beschreibt die Bewässerungsverfahren detailliert und unterteilt diese in weitere Kategorien. Die Mikrobewässerung kann in oberirdische und unterirdische Verfahren eingeteilt werden und unterscheidet die Verfahren der Tropfbewässerung, der Sprühbewässerung und der Unterflurbewässerung. Die Sprinklerbewässerung wird in mobile und teilmobile Systeme, sowie in

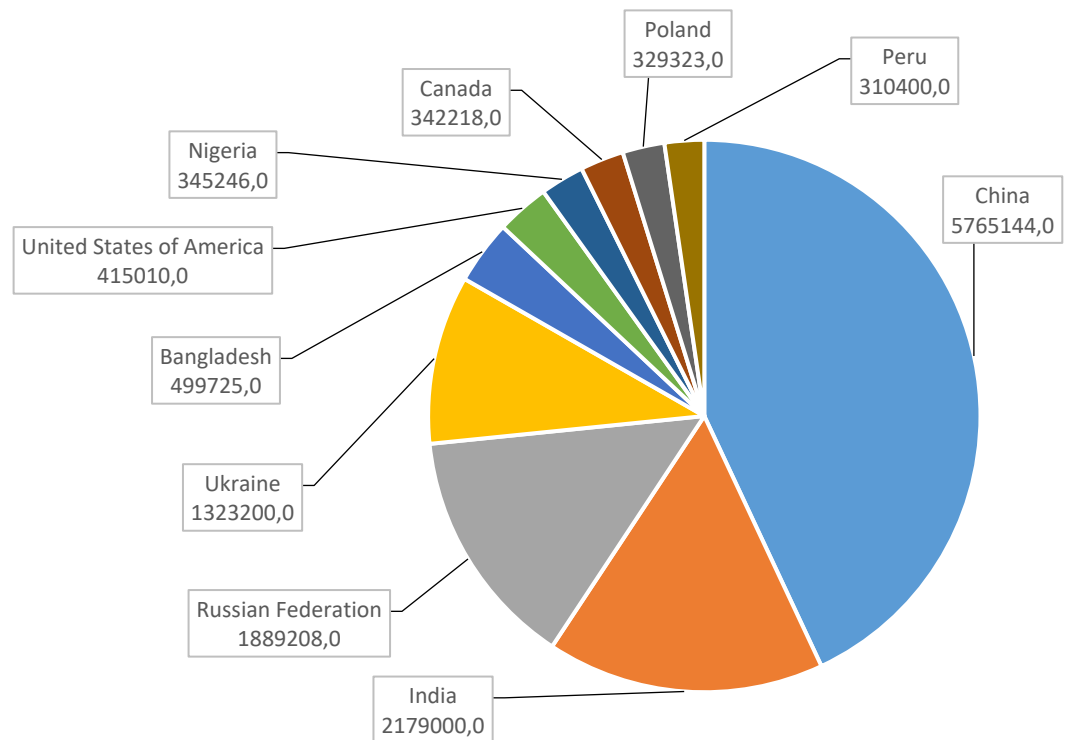
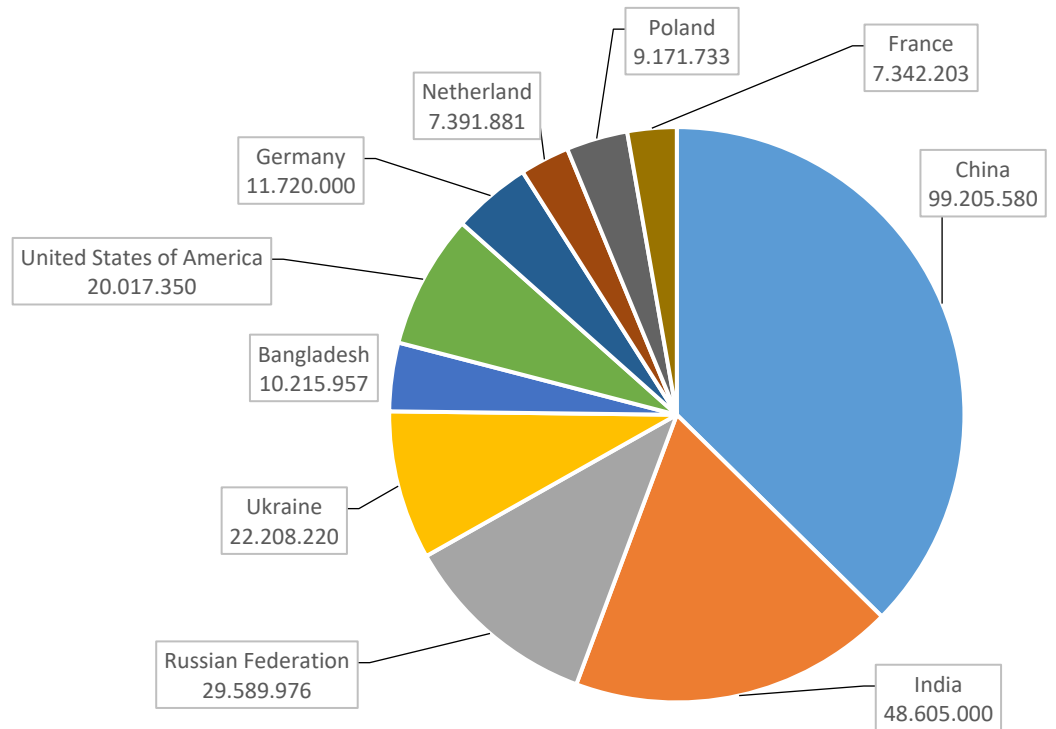
Reihenregner unterteilt. Das Reihenregnerverfahren beinhaltet mehrere Regner, die entweder direkt auf die Regnerleitung aufgesetzt werden, oder über Seitenschläuche verbunden werden. Teilmobile Beregnungsmaschinen sind Linear- oder Kreisberegnungsmaschinen, die an ihren Einsatzort beweglich sind, aber zumindest während der Beregnungssaison an einem Schlag fest aufgebaut werden. Mobile Beregnungsmaschinen werden nach Regnereinzug oder Maschinenvorschub unterschieden. (Sourell, 2014)

Die Kartoffel ist eines der wichtigsten Grundnahrungsmittel neben Reis, Weizen und Mais, sie wird weltweit auf fast 20 Mio. ha landwirtschaftlicher Fläche angebaut. Der Anbau ist in den letzten Dekaden in den Industriestaaten etwas zurückgegangen, doch insbesondere in Asien ist ein Anstieg der Kartoffelproduktion zu beobachten. Die weltweite Anbaufläche hat sich seit den 1960er Jahren kaum verändert (siehe Abbildung 2-1).

Abbildung 2-1: Kartoffelanbaufläche weltweit in ha. (FAOSTAT)



Die größten Anbauflächen für Kartoffeln wurden seit Aufzeichnungsbeginn der statistischen Daten bei der Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1961 bis Anfang der 1990er Jahre im Gebiet der ehemaligen Sowjetunion erfasst, mit Flächen weit über 8 Mio. ha in den 1960er Jahren. Mit dem Ende der Sowjetunion wurde China das Land mit den größten Anbauflächen für Kartoffeln, Indien hat Russland im Jahr 2015 vom zweiten auf den dritten Platz verdrängt (siehe Abbildung 2-2). Im Jahr 2017 wurden ca. 30 % aller Kartoffeln weltweit in China angebaut, ca. 11 % aller Kartoffeln entfallen auf die Anbauflächen von Indien (siehe Abbildung 2-3). Zusammen wurden 2017 also etwa 41 % aller Kartoffeln in Indien und China angebaut, diese beiden Länder stellen auch die weltweit größten Bewässerungsflächen mit 69,4 Mio. ha in China und 66,7 Mio. ha in Indien (FAO, 2014). In beiden Ländern liegt der Anteil der Überstaubewässerung bei über 90 %. Somit kann davon ausgegangen werden, dass für die Bewässerung von Kartoffeln große Wassermengen verwendet werden und ein hohes Potential für Einsparungen des Bewässerungswassers vorhanden ist (FAOSTAT).

Abbildung 2-2: Kartoffelanbauflächen in 2017. (FAOSTAT)**Abbildung 2-3:** Kartoffelproduktion weltweit in 2017. (FAOSTAT)

Obgleich in Deutschland Kartoffeln nur auf ca. 250.000 ha Fläche angebaut werden, so ist die Ertragsmenge pro ha eine der höchsten weltweit. Im Jahr 2017 wurden in China über 99 Mio. Tonnen Kartoffeln produziert und in Deutschland über 11,7 Mio. Tonnen. Der Ertrag pro Hektar lag im Jahr 2017 in China lediglich bei 172 dt/ha und in Indien bei 223 dt/ha, während in Deutschland ein Ertrag von 468 dt/ha erreicht wurde.

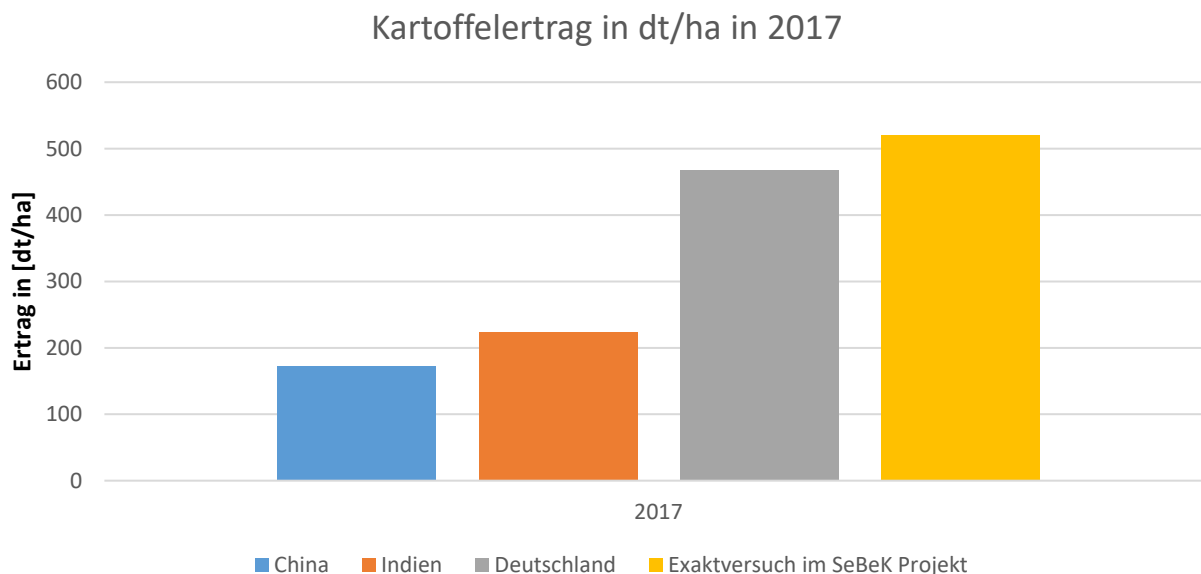
Die, insbesondere in China und Indien, großflächig angewandte Überstaubewässerung bietet nur eingeschränkte Steuerungsmöglichkeiten für eine optimale Wasserversorgung. Qin et al. (2018) untersuchten Unterschiede zwischen Tropfbewässerung und Furchenbewässerung mit teils Austrocknung des Wurzelbereichs in semiariden Kartoffelanbauregionen in China und belegten eine starke Erhöhung der Bewässerungseffizienz durch die neuen Beregnungsansätze. Auch Zhang and Guo (2016) sehen einen hohen Bedarf an wassersparenden Maßnahmen in der Landwirtschaft in China, auch durch eine ökonomische Wertsteigerung des eingesetzten Wassers. In Neuseeland hingegen werden effizientere Beregnungssysteme wie Bewässerungsmaschinen und Kreisregner eingesetzt und die Wassermengen und Beregnungszeitpunkte werden, wie in Deutschland auch, möglichst genau ermittelt (Rajanayaka *et al.*, 2016). Auf diese Weise wurden im Jahr 2017 Erträge von 493 dt/ha erreicht (FAOSTAT). Auf den Versuchsflächen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Hamerstorf, wurden im Rahmen der Versuche im SeBeK Projekt folgende Erträge erzielt.

- Kartoffelernte 2017, 521 dt/ha
- Kartoffelernte 2018, 618 dt/ha
- Kartoffelernte 2019, 640 dt/ha

Der Kartoffelanbau im SeBeK Projekt erfolgte unter optimalen Rahmenbedingungen bezüglich Nährstoff- und Wasserversorgung. Die Bodenverhältnisse am Versuchsstandort in Hamerstorf, inmitten der Hauptanbauregion Deutschlands im Nordosten Niedersachsens, weisen zudem gute Eigenschaften für den Kartoffelanbau auf. Der leichte Boden mit einem hohen Sandanteil hat eine schlechte Wasserhaltefähigkeit und verhindert aufgrund seiner Drainageeigenschaften das Auftreten von Staunässe. Die Kartoffelproduktion erfordert auf diesen Böden einen hohen Zusatzwassereinsatz, in Abhängigkeit von den klimatischen Verhältnissen der jeweiligen Anbausaison. In Kapitel 4 werden die Ergebnisse der Landwirtschaftskammer Niedersachsen näher betrachtet, wo unter anderem auch die Unterschiede zwischen den Beregnungs- und Düngestrategien aufgeführt werden. Hier ist die Signifikanz der Beregnung, auch in Abhängigkeit zur Kaliversorgung, detailliert aufgeführt. In Abbildung 2-4 ist der Ertrag von den Versuchsflächen des Projektes den mittleren Landeserträgen gegenübergestellt, um die Auswirkungen eines auf die Rahmenbedingungen abgestimmten Dünge- und Bewässerungsmanagements zu verdeutlichen. Die Parzellenerträge der Versuchsflächen sind aufgrund von Randeffekten immer etwas höher als die Erträge der Praxisschläge. Davon ausgehend, dass die Erträge aus den Anbauversuchen des SeBeK Projektes die optimalen Ertragsmengen darstellen, wird in Deutschland im Durchschnitt der optimale Ertrag zu 89 % erreicht. In China und Indien, den Ländern mit der höchsten Kartoffelproduktion, werden nur 33 %, bzw. 43 % der optimalen Ertragsmenge erreicht. Mit einer

Ertragsoptimierung des Kartoffelanbaus in China im Rahmen der in diesem Projekt ermittelten optimalen Erträge, würde dies eine Verdreifachung der tatsächlichen Erträge mit einer Gesamtproduktion von ca. 300 Millionen Tonnen bedeuten. Dies entspräche ca. 77 % der weltweiten Kartoffelproduktion von 388 Millionen Tonnen im Jahr 2017 (FAOSTAT).

Abbildung 2-4: Gegenüberstellung der Kartoffelerträge in 2017 (Datenquelle: FAOSTAT, Landwirtschaftskammer Niedersachsen)



Bei gleichbleibender Produktionsmenge könnte demnach unter optimalen Erträgen die Anbaufläche um ca. 3,5 Mio. ha reduziert werden. Ähnlich hohe Zahlen werden auch in anderen Studien erreicht. Im Jahr 2016 haben Jägermeyr et al. die Auswirkungen einer Optimierung in der Bewässerung modelliert und ein globales Produktionspotential von 41 % identifiziert, während durch eine effiziente Beregnung bis zu 48 % des Beregnungswassers eingespart und Ertragseinbußen um 62 % reduziert werden können.

Durch die Betrachtung der international erzielten Erträge und den Rahmenbedingungen in den Anbauregionen lässt sich der Bedarf an einer höheren Effizienz in der Bewässerung bei der Kartoffelproduktion ableiten. Insbesondere in Hinsicht auf steigende Bevölkerungszahlen und die sich ändernden klimatischen Verhältnisse ist ein effizienter und verantwortungsvoller Umgang mit Wasser in der Nahrungsmittelproduktion notwendig, um nicht nur Nahrungsmittel in ausreichender Quantität und Qualität zu produzieren, sondern auch in Zukunft den Bedarf an sauberen und ausreichend vorhandenem Wasser decken zu können.

Am Ende ist die Wasserverfügbarkeit der Pflanze der begrenzende Faktor. Um diese Wasserverfügbarkeit zu ermitteln gibt es verschiedenen Ansätze, die einen bestimmten Datenumfang benötigen. Einige Modelle betrachten die Wasserbilanz und benötigen umfangreiche meteorologische Daten, andere Methoden erfassen physikalisch die Menge an

Wasser im Wurzelbereich der Pflanzen. Auch für die sensorunterstützte Ermittlung des Beregnungszeitpunktes mit dem Crop Water Stress Index sind meteorologische Daten erforderlich, die in dem dahinterstehenden Modell zum Einsatz kommen.

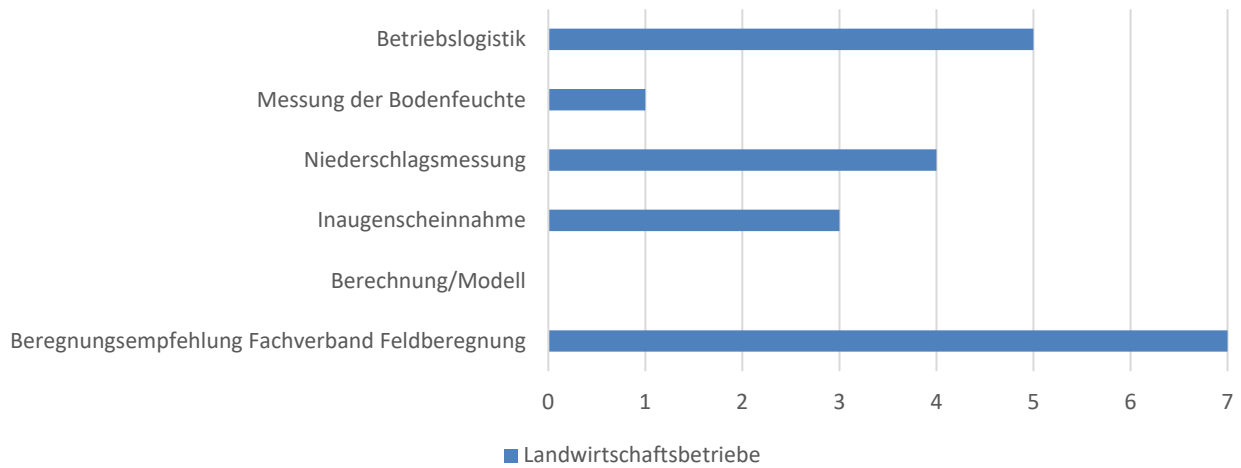
2.2 Bewässerungspraxis in der Projektregion

Deutschlands Hauptanbauregion für Kartoffeln liegt in Niedersachsen, wo 48 % der in Deutschland produzierten Kartoffeln erzeugt werden. Die vorhandene Beregnungsinfrastruktur und die eher leichten Böden der niedersächsischen Anbauflächen sorgen für eine stabile Ertragslage (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2018). Die Beregnungssteuerung hat einen großen Einfluss auf eine ressourcenschonende Verwendung des Bewässerungswassers, da der Bewässerungszeitpunkt und die Höhe der Bewässerungsgabe hier vorgegeben werden. Die Beregnungssteuerung ist abhängig von ihrem Ermittlungsansatz und den dafür verwendeten Daten. Die Bestimmung der Bewässerungswassermengen und der Beregnungszeitpunkte kann auf verschiedenen Wegen erfolgen. Michel und Günther (2014) führen auf, dass die Einschätzung, ob eine Beregnung erforderlich ist, sowie die Höhe der Beregnungswassermenge, in den meisten Fällen auf den Erfahrungen des Landwirtes basiert. Auch Riedel (2014) beschreibt, dass die Beregnung oftmals auf Basis von Erfahrungen, unter Einbeziehung von Informationen wie der Wettervorhersage und dem Wissens- und Erfahrungsstand über den bewirtschafteten Boden und die angebauten Kulturen, gesteuert wird. Informationen von Beratungsinstitutionen und eigene Messungen meteorologischer Einzelparameter wie Niederschlag oder Temperatur werden ebenfalls häufig in die Planung der Beregnung einbezogen.

Im Rahmen des SeBeK Projektes wurde eine Umfrage zur Bewässerungspraxis bei Landwirtschaftsbetrieben aus der Projektregion durchgeführt. In 2017 wurde eine erste Befragung durchgeführt und in 2018 mit einem überarbeiteten Fragebogen wiederholt. Bei der ersten Umfrage wurden fünf Landwirtschaftsbetriebe in Form eines persönlichen Interviews befragt, bei der Wiederholung wurde ausschließlich mit Fragebögen gearbeitet und Informationen von sieben Landwirtschaftsbetrieben eingeholt. Die Fragen konzentrierten sich auf Basisdaten der Betriebe, wie z.B. die bewirtschaftete Fläche, die Fläche für den Anbau von Kartoffeln und Informationen rund um die Bewässerungspraxis. Die Ergebnisse der Umfrage sind in den folgenden Abschnitten in die Betrachtung und Beurteilung eingeflossen.

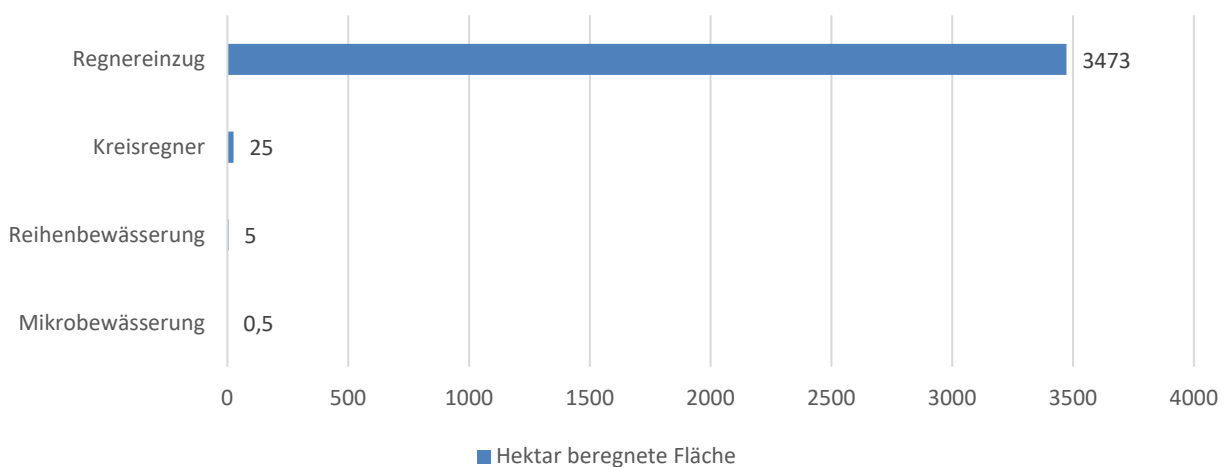
Die Umfrage 2018 ergab, dass sieben von sieben Landwirten die Beregnungsempfehlung des Fachverband Feldberegnung zur Bestimmung des Beregnungszeitpunktes nutzen, und auch die Messung der Niederschläge, sowie die Inaugenscheinnahme der Flächen wird von mehr als 50 % der Landwirte genutzt. Jedoch ist der Beregnungszeitpunkt in den meisten Fällen von der Betriebslogistik (Einsatz der Beregnungstechnik) abhängig (siehe Abbildung 2-5).

Abbildung 2-5: Bei der Befragung angegebene Möglichkeiten zur Bestimmung des Beregnungszeitpunktes (Bagdahn und Meinardi 2018)



Auf über 99 % der berechneten landwirtschaftlichen Flächen der befragten Betriebe werden mobile Beregnungsmaschinen mit Regnereinzug eingesetzt (siehe Abbildung 2-6) (Bagdahn und Meinardi 2018). Das bedeutet, dass auch im Falle einer exakten Bestimmung des Bewässerungszeitpunktes die Durchführung der Beregnung durch die logistische Leistungsfähigkeit der Bewässerungsbetriebe eingeschränkt ist, wenn die vorhandene Anzahl an Beregnungsmaschinen bzw. die erforderlichen Kapazitäten zur Aufstellung oder Umsetzung der Maschinen nicht ausreichend ist. Dies wurde ebenfalls im Rahmen der Umfrage bestätigt, bei der fünf von sieben Landwirten angaben, dass die Betriebslogistik einen Einfluss auf den Beregnungszeitpunkt hat.

Abbildung 2-6: Anteil der verschiedenen Bewässerungssysteme in der Projektregion auf Basis der Umfrage im Rahmen des SeBeK-Projektes (Bagdahn und Meinardi 2018)



Die Möglichkeit, den Bewässerungszeitpunkt unabhängig von der Maschinenverfügbarkeit zu wählen, kann zwei Effekte hervorrufen. Zum einen kann durch den optimierten Bewässerungszeitpunkt die Ertragsmenge gesteigert werden, sodass mit dem gleichen Wassereinsatz ein höherer Ertrag erzielt werden kann, zum anderen kann der Ertrag, bei der Reduzierung des Wassereinsatzes, ohne Qualitätseinbußen, auf dem bisherigen Niveau verbleiben. Insbesondere im Rahmen der aktuellen Diskussionen um die Bewässerung und der überdurchschnittlichen Trockenperioden 2018 und 2019 ist die Gewährleistung der Erträge, selbst bei einem reduzierten Wasserdargebot für die Bewässerung, für die Landwirte erforderlich.

Bei der Bestimmung des Wasserbedarfs müssen neben den Klima- und Bodendaten auch pflanzenspezifische Aspekte wie die Vegetationsperiode und die Durchwurzelungstiefe betrachtet werden. Der Zusatzwasserbedarf kann über Messungen bestimmter Parameter ermittelt werden, die Aufschluss über z.B. die Bodenfeuchte oder den Wasserversorgungsstatus der Pflanzen geben. Weiterhin stehen verschiedene Modelle zur Ermittlung des Wasserbedarfs der Pflanzen zur Auswahl, die auf Berechnungsmodellen und der Erhebung von bestimmten Messwerten basieren. Die Umfrage zeigt, dass Monitoringsysteme z.B. zum Erfassen der Bodenfeuchte und Berechnungsmodelle (z.B. Geisenheimer Modell, Irrigama, etc.) gar nicht, oder kaum zur Bestimmung des Bewässerungszeitpunktes zum Einsatz kommen. In erster Linie werden die Empfehlungen des Fachverbandes Feldberegnung genutzt, teilweise in Kombination mit eigenen Niederschlagsmessungen und der Inaugenscheinnahme der Fläche.

Die aktuelle Witterungs- und Wettersituation entscheidet zunächst grundlegend, welche Feldarbeiten durchgeführt werden können. Die landwirtschaftlichen Betriebe müssen anhand der vorhandenen Daten zu der aktuellen Witterungs- und Wettersituation kontinuierlich schlagspezifische Entscheidungen im Hinblick auf die erforderlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen treffen. Im Rahmen der Bewässerung und deren Steuerung sind neben den Parametern wie z.B. Niederschlag, Windgeschwindigkeit und Lufttemperatur auch Mess- bzw. Beobachtungsgrößen wie die Bodenfeuchte und Verdunstung erforderlich. (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2017)

2.3 Meteorologie der Projektregion

Die erforderlichen Zusatzwassermengen stehen im direkten Zusammenhang mit den meteorologischen Verhältnissen in der Projektregion. Neben den Niederschlagsmengen spielt die Evaporation eine elementare Rolle, da diese Größen die Menge an pflanzenverfügbarem Wasser beeinflusst. Die klimatische Wasserbilanz (*KWB*) ist die Differenz aus Niederschlag (*P*) und der potentiellen Evapotranspiration (*ET_p*) (nach DIN 4049-3) und beschreibt die Randbedingungen des Wasserangebotes in einem Gebiet.

$$KWB = P - ET_p \quad (2-1)$$

Die verfügbare Wassermenge und die Eigenschaften des Bodens, das Wasser in der pflanzenverfügbaren Zone halten zu können, sind die maßgeblichen Größen zur Bestimmung der standortspezifischen Verhältnisse. Michel (2014) beschreibt die Randbedingungen des Wasserhaushaltes von einem mit Pflanzen bewachsenen lokalen Standort. Die Wasserhaushaltsgleichung lautet hier:

$$P - ETR + Kap - GWN - \Delta S = 0 \quad (2-2)$$

Der Wasserhaushalt innerhalb eines Systems ist ausgeglichen. Der Freilandniederschlag (P) und die aktuelle Evapotranspiration (ETR), die sich aus der Pflanzentranspiration (TR), der Evaporation (ER) und aus der Interzeptionsverdunstung (IR) zusammensetzt, aus der klimatischen Wasserbilanz werden hier durch den kapillaren Wasseraufstieg in die Bodenzone (Kap), die Grundwasserneubildung (GWN) und die Änderung des Bodenwasservorrates (ΔS) ergänzt. Die Bewässerung (Bew) stellt eine zusätzliche Komponente des Wasserhaushaltes dar und fließt wie folgt in die Gleichung ein.

$$P + Bew - ETR + Kap - GWN - \Delta S = 0 \quad (2-3)$$

Die zusätzlichen Bewässerungsgaben (Bew) sorgen in erster Linie für eine Erhöhung der Pflanzentranspiration (TR) und in geringen Teilen zu einer höheren Interzeptionsverdunstung (IR) und einer erhöhten Grundwasserneubildung (GWN). Verbleibende Überschüsse finden sich letztendlich in einem erhöhten Bodenwasservorrat (ΔS). (Michel 2014)

Die Berechnung des CWSI erfordert einen hohen Parameterumfang wie in Kapitel 3 detailliert dargestellt wird. Anhand der Betrachtung verschiedener Messstationen im Projektgebiet soll ermittelt werden, ob die Messwerte einzelner Stationen die tatsächlichen Gegebenheiten auf den Anbauflächen in verschiedenen Entfernungen zu der Messstation wiedergeben.

2.3.1 Verfügbare meteorologische Daten

Die Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften in Suderburg betreibt zwei meteorologische Messstationen (Meteo 1 und Meteo 2), die durch den Betrieb mit Solarstrom standortunabhängig aufgestellt werden können. Die Messstationen sind mit einem kompakten Wettersensor (WS 501 UMB) der Firma Lufft ausgestattet. Die Niederschlagsmessung erfolgt mit unbeheizten Regenmessern (WTB 100) nach dem Kippwaagenprinzip, die 2019 durch wiegende Niederschlagssensoren der Firma Lambrecht (rain[e]LP) ersetzt wurden. Eine der Stationen steht an den Versuchsflächen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen in Suderburg/Hamerstorf und die andere Station steht auf den landwirtschaftlichen Flächen des Landwirtes Hartmut Becker, der als Projektpartner im Innovationsprojekt beteiligt ist, in Wrestedt/Niendorf II (siehe Abbildung 2-7). Beide Stationen wurden im Herbst 2016 installiert und messen somit über einen Großteil der

Projektlaufzeit die meteorologischen Daten an den Flächen, an denen auch die Versuche zum Crop Water Stress Index durchgeführt werden. Die Stationen sind mit einer solaren Stromversorgung ausgestattet und senden die Daten über eine LTE Verbindung zu einem Server, von dem sie weiter verteilt werden. Auf einer Internetseite lassen sich die Messwerte visualisieren und sind öffentlich zugänglich (www.suderburger-wetter.de).

Beide Stationen sind während der Projektlaufzeit mehrfach ausgefallen, wodurch auch teilweise in der Anbausaison nicht durchgehend Daten erfasst werden konnten. Der Betrieb der Messstationen mit solarer Energieversorgung erlaubt eine standortunabhängige Aufstellung, die dafür notwendigen elektrischen Bauteile zeigten sich während der Projektlaufzeit fehleranfällig und insgesamt war die Performance der Systeme nicht zufriedenstellend. Mehrere elektrische Bauteile mussten nach Sturmschäden und Blitzeinschlag ausgetauscht werden, die Fehleranalyse war langwierig und resultierte in längeren Perioden, in denen keine Daten erfasst werden konnten. Auch kam es zu Störungen aufgrund altersbedingter Ausfälle der Batterien, die daraufhin ersetzt werden mussten. Die Messstationen sind mit einem Minicomputer (Pokini) ausgestattet, auf denen das Windows 7 Betriebssystem installiert ist, Firmware Updates und Probleme mit der LTE Internetverbindung sorgten hier für weitere Ausfälle.

Die Landwirtschaftskammer Niedersachsen betreibt an den Versuchsfeldern in Suderburg/Hamerstorf eine meteorologische Messstation (LWK), deren Daten allerdings ebenfalls nicht vollständig vorliegen. Die Ostfalia Hochschule betreibt auf dem Hochschulgelände in Suderburg eine meteorologische Messstation (Ostfalia), deren Werte ohne nennenswerte Ausfälle seit 2013 vorliegen. Als Referenzdaten werden die Messwerte der meteorologischen Messstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in Uelzen genommen. Allerdings gibt es auch an dieser Station Messausfälle für die Niederschlagsdaten im Mai 2018, wodurch der DWD keine Jahressumme für die Station in Uelzen ausgibt. In der Ortschaft Stoecken, nordöstlich von Uelzen, befindet sich ebenfalls eine meteorologische Messstation, deren Daten für den betrachteten Zeitraum vollständig vorliegen und trotz der höheren Entfernung zu den Versuchsflächen mit betrachtet werden.

Es ergibt sich somit ein Netzwerk aus sechs meteorologischen Messstationen, deren Werte hier betrachtet werden sollen, um die Heterogenität der meteorologischen Gegebenheiten darzustellen. Die Messwerte zur Entwicklung des CWSI wurden separat im Sensornetzwerk des Thünen-Institutes erfasst. In Abbildung 2-7 sind die Standorte der Messstationen abgebildet.

Zum Füllen der Datenlücken wurde das Verfahren der linearen Regression verwendet. Als Bezugsdaten für die Datenlücken aller betrachteten Stationen wurden die Daten der Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes ausgewählt, da die Informationen des DWD auch als Grundlage wetterabhängiger Entscheidungen in der Landwirtschaft genutzt werden (z.B. Berechnungsempfehlung des Fachverband Feldberechnung e.V.). Die Datenlücken der Station des DWD wurden mit den Daten der Wetterstation an der Ostfalia geschlossen. Diese Daten zur Schließung der Lücken der Wetterstation des DWD wurden nicht für die lineare Regression mit

anderen Messstationen verwendet. Die für die projektrelevanten Auswertungen erforderlichen Parameter liegen nach dem Füllen der Datenlücken an allen Standorten für die Jahre 2017 und 2018 vollständig vor. Dies sind neben den Niederschlagsdaten die Parameter zur Berechnung der Evapotranspiration für Aussagen zum Beregnungsbedarf.

Langjährige Messdaten liegen nur von der Messstation des DWD vor, die Daten der Ostfalia Hochschule, sowie der Station in Stoecken liegen seit 2013 vollständig vor. In der folgenden Grafik sind die Jahresniederschlagsmengen der Stationen von 2013 bis 2018 aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass die Niederschlagssummen an der Messstation der Ostfalia in jedem Jahr die höchsten sind. Weiterhin kann man beobachten, dass, mit Ausnahme des Jahres 2017, die Jahresniederschlagssumme von Südwestlicher Richtung nach Nordosten abnimmt. Die Stationen sind in der Luftlinie ca. 18,5 km voneinander entfernt, so muss davon ausgegangen werden, die korrekte Funktion der Messinstrumente vorausgesetzt, dass die Ursache der unterschiedlichen Niederschlagssummen in den orografischen Gegebenheiten, der Landnutzung und der vorherrschenden Windrichtung begründet liegen.

Abbildung 2-7: Übersichtskarte der Standorte der meteorologischen Messstationen

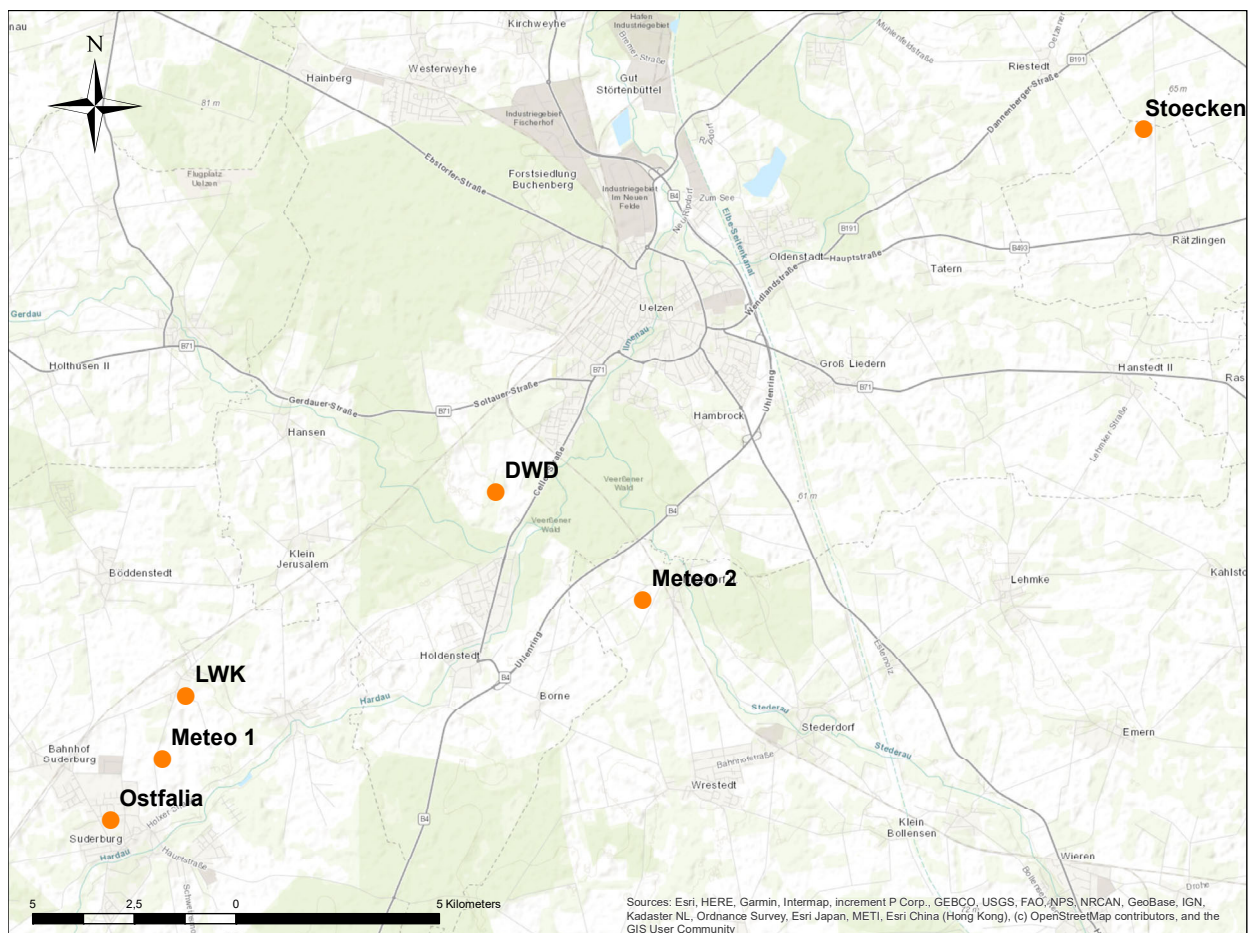
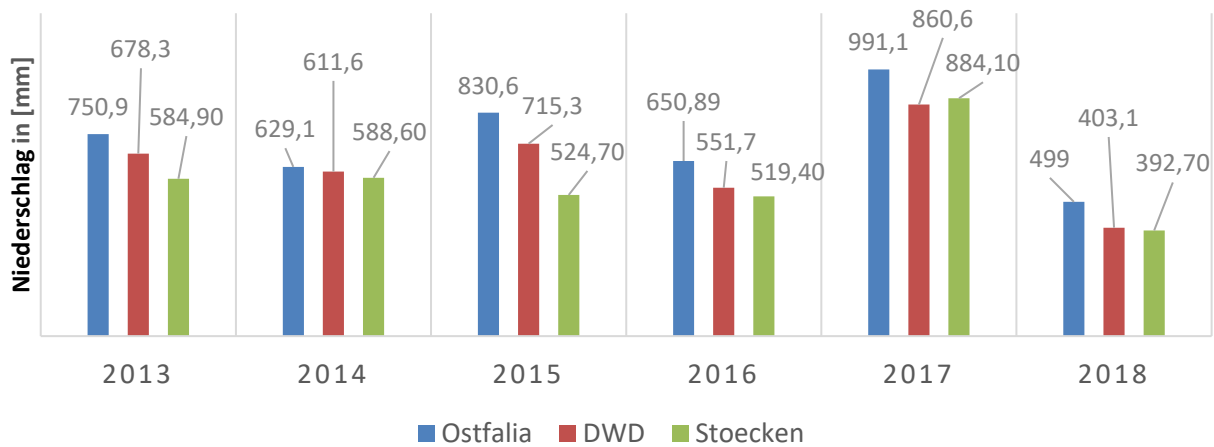
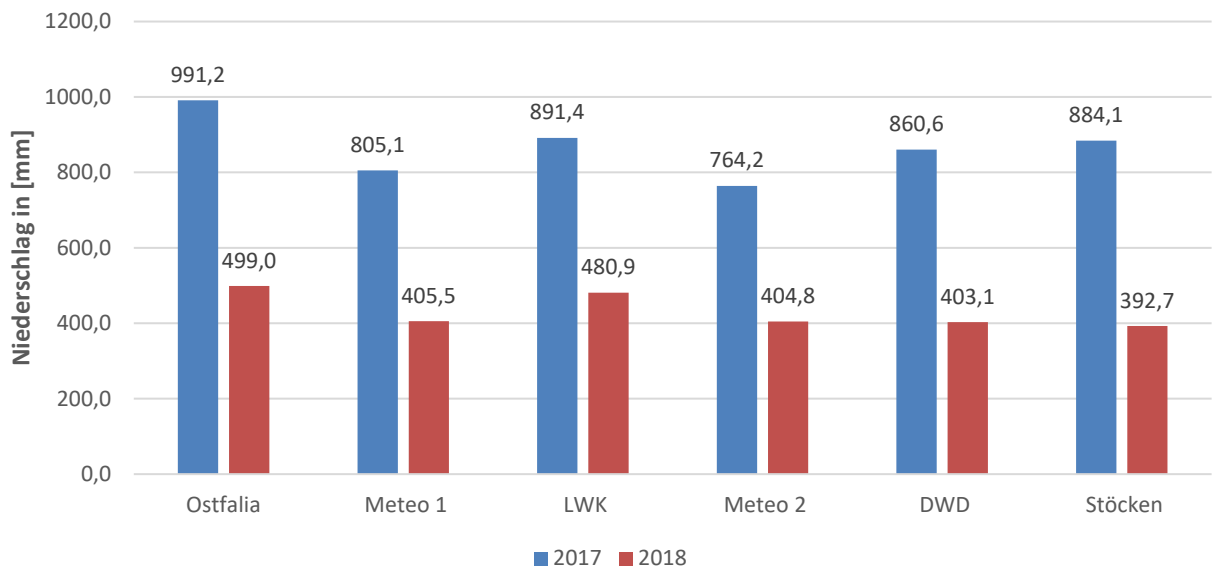


Abbildung 2-8: Darstellung der Niederschlagssummen der Jahre 2013 bis 2018 an den Messstationen Ostfalia, DWD und Stoecken



In Abbildung 2-9 sind die Niederschlagsdaten aller Stationen für das Jahr 2017 und 2018 aufgelistet. Während es im Jahr 2017 überdurchschnittlich viele Niederschläge gab (Deutscher Wetterdienst 29.12.2017), war das Jahr 2018 eines der niederschlagsärmsten Jahre seit Beginn der Aufzeichnungen (Deutscher Wetterdienst 28.12.2018).

Abbildung 2-9: Darstellung der Niederschlagssummen der Jahre 2017 und 2018 an den betrachteten Messstationen



Obgleich die Messstationen in einem eher kleinen Bereich liegen, die Distanz zwischen der Station Ostfalia und der Station Stoecken beträgt ca. 18 km, gibt es doch deutliche Abweichungen der Jahresniederschläge von über 200 mm an den verschiedenen Stationen. Im folgenden Abschnitt werden diese Abweichungen näher betrachtet und beurteilt.

2.3.2 Auswertung und Vergleich ausgewählter meteorologischer Daten

Bei genauer Betrachtung der Jahresniederschlagssummen lässt sich erkennen, dass insbesondere die beiden mobilen Messstationen geringere Niederschlagsmengen aufgezeichnet haben als die fest installierten Messstationen. Die Niederschlagsverteilung in 2017 und 2018 wurde mit der IDW-Interpolation (Inverse Distance Weighted) berechnet und mittels Isohyeten in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die statistische Auswertung zeigt, dass die Abweichungen der Niederschlagssummen signifikant sind.

Abbildung 2-10: Niederschlagsverteilung in der Projektregion 2017

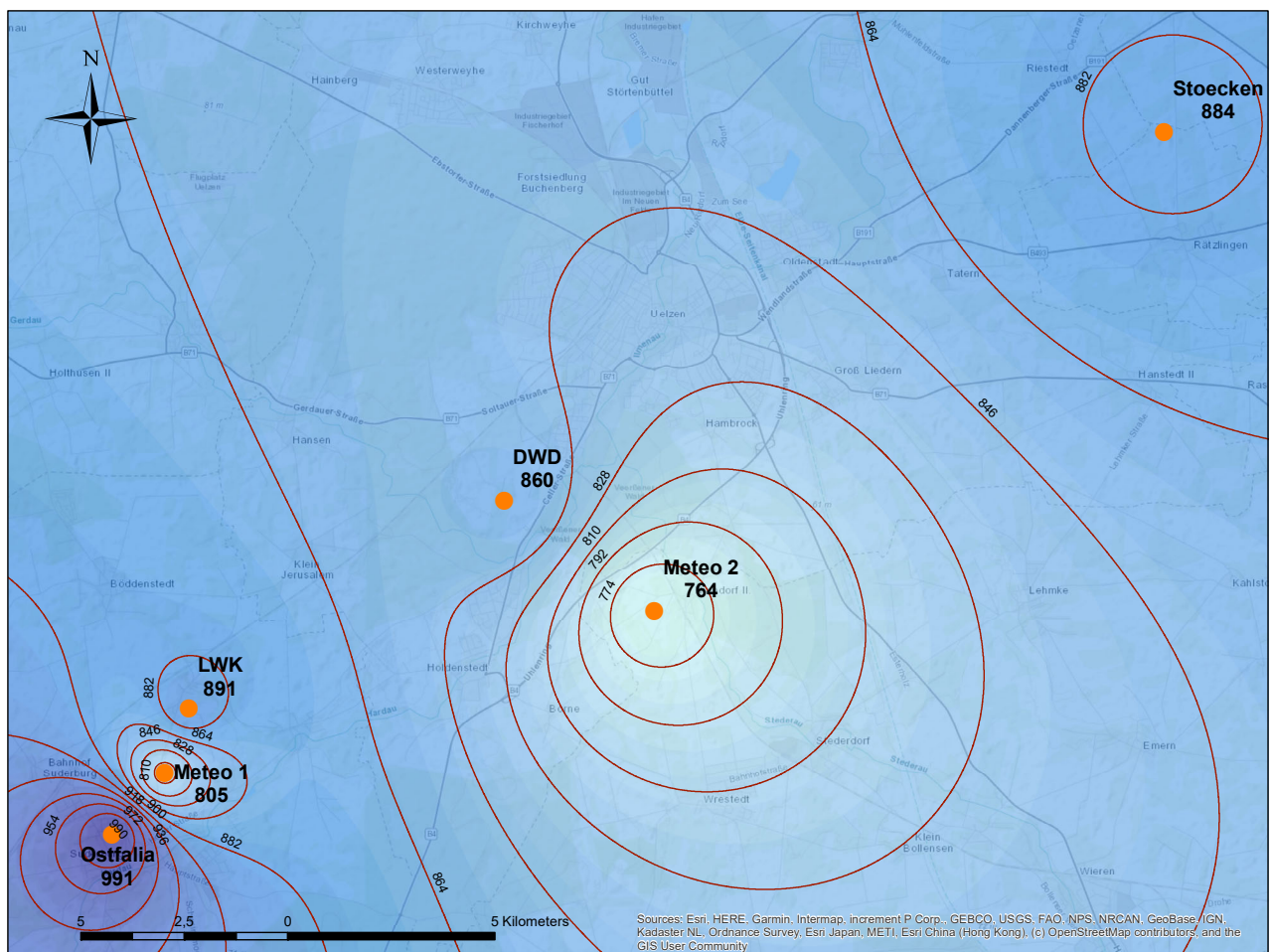
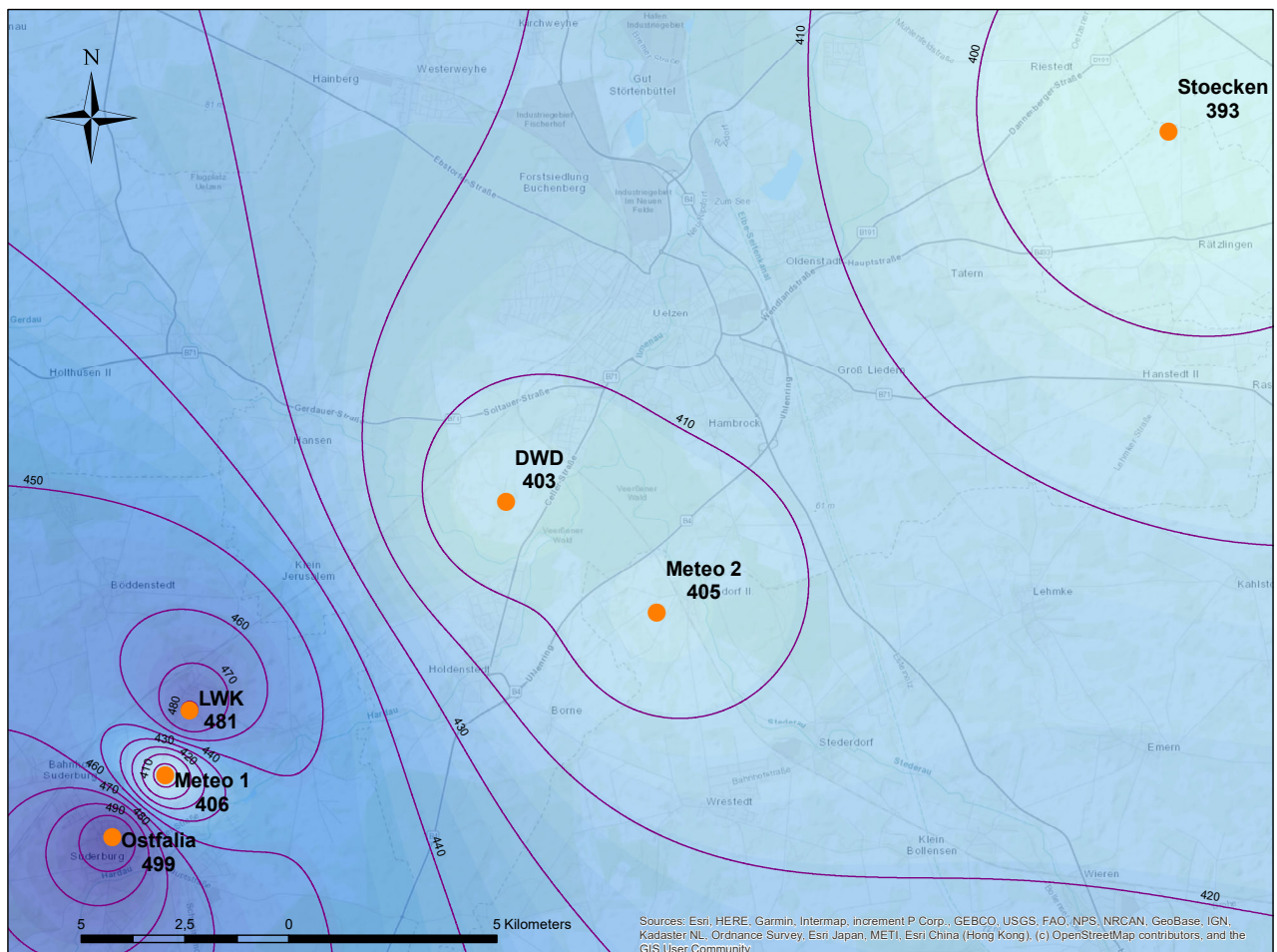
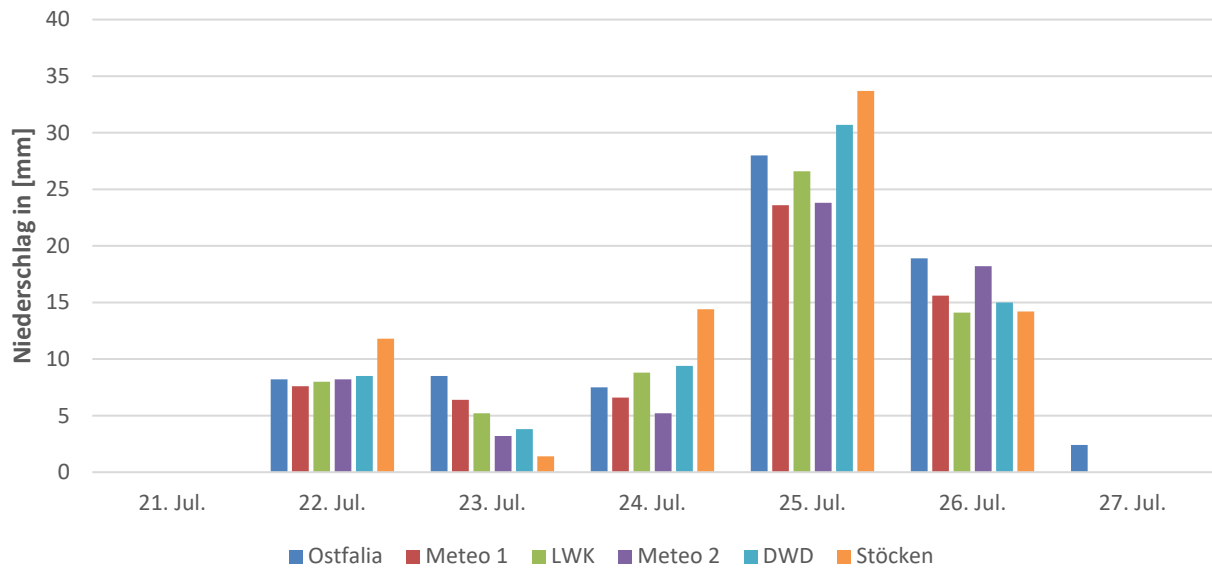
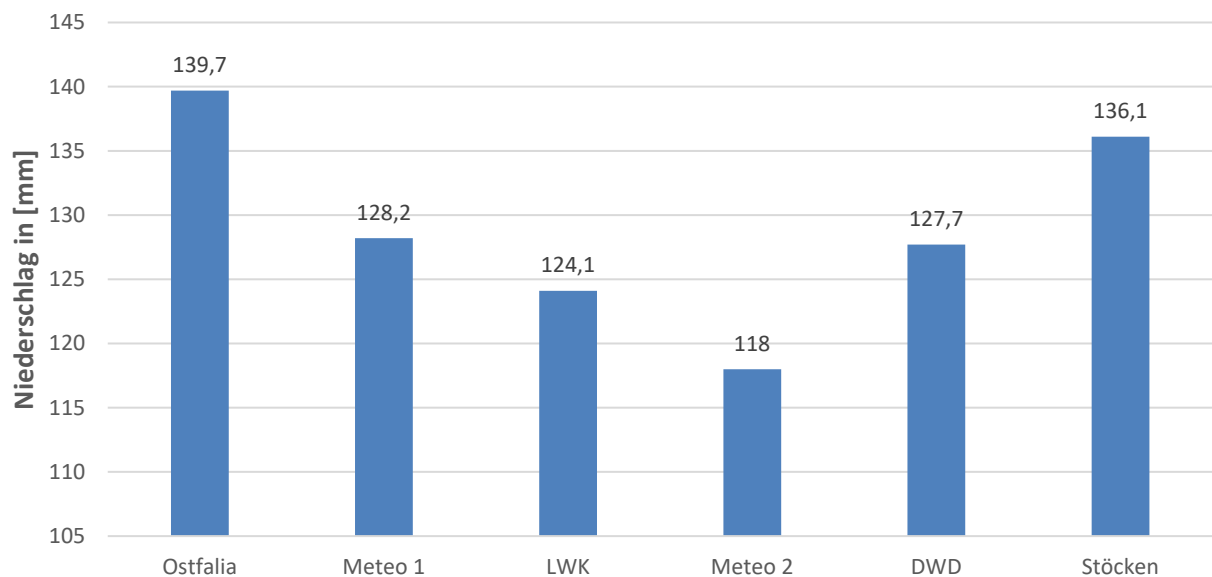


Abbildung 2-11: Niederschlagsverteilung in der Projektregion 2018

Es zeigt sich, dass die meteorologische Station an der Ostfalia Hochschule in Suderburg in beiden Jahren jeweils die höchsten Niederschlagssummen erfasst hat und im Jahr 2018 eine Abnahme der Niederschlagsmengen in nordöstliche Richtung vorliegt. Dies war auch in den Jahren 2013 bis 2016 der Fall (siehe Abbildung 2-8). Ebenfalls lässt sich erkennen, dass beide mobilen Meteorologischen Stationen die geringsten Niederschlagssummen aufgezeichnet haben. Weiterhin kann man beobachten, dass insbesondere die Station Meteo 1, auf den Versuchsflächen in Hamerstorf, geringere Niederschläge aufgezeichnet hat als die Stationen an den Standorten Ostfalia und LWK, obgleich die Stationen nur ca. 2,2 km voneinander entfernt sind. Die Station Meteo 1 befindet sich auf halber Strecke zwischen den beiden anderen Stationen. Da insbesondere bei den mobilen Messtationen mehrere Datenlücken geschlossen wurden, wird im Folgenden eine Niederschlagsserie vom 21. bis 27. Juli 2017 genauer betrachtet. Im gesamten Monat Juli 2017 haben alle betrachteten Stationen eigene Daten produziert.

Abbildung 2-12: Niederschläge vom 21. bis 27. Juli 2017**Abbildung 2-13:** Niederschlagssummen im Monat Juli 2017

In der Summe hat die Messstation Ostfalia die höchste Niederschlagssumme erfasst. Entgegen des erkennbaren Trends in der Abbildung 2-8 steigt die Niederschlagssumme in nordöstlicher Richtung wieder an. Mit Ausnahme vom 27. Juli haben alle Stationen die Niederschläge an den gleichen Tagen erfasst, das lässt darauf schließen, dass Niederschlagsereignisse in dem betrachteten Gebiet einheitlich auftreten, die Intensität der Niederschläge aber variiert. Zwischen den Stationen Ostfalia und Meteo 1, sowie zwischen den Stationen DWD und Ostfalia gibt es Unterschiede in der Summe von ca. 10 mm Niederschlag im Monat Juli 2017, obwohl beide Stationen jeweils in unmittelbarer Nachbarschaft zueinanderstehen. Die Messstation Ostfalia steht in der Ortschaft

Suderburg, während die Messstation Meteo 1 auf dem freien Feld außerhalb der Ortschaft installiert ist. Die Messstationen DWD und Meteo 2 werden von Nord nach Süd durch die Bundesstraße B4 getrennt. Inwiefern diese Merkmale zu den Unterschieden der erfassten Niederschläge beitragen kann in dieser Studie nicht abschließend geklärt werden. Es zeigt aber die deutliche Heterogenität der erfassten Daten in einem kleinen Gebiet.

Für die detaillierte Betrachtung der Messstationen werden die Niederschlagsdaten vom 25. Juli aus 2017 verwendet. Die Niederschläge werden in stündlich erfassten Summen dargestellt, in Abbildung 2-15 wird der Zeitraum von 00:00 Uhr bis 12:00 Uhr betrachtet. In diesem Zeitraum haben alle Stationen eigene Daten produziert. Die Daten der LWK-Messstation liegen allerdings nicht in der erforderlichen Auflösung vor, weshalb sie aus dieser Betrachtung ausgeschlossen sind.

Abbildung 2-14: Niederschlagssummen an den Messstationen am 25.07.2017

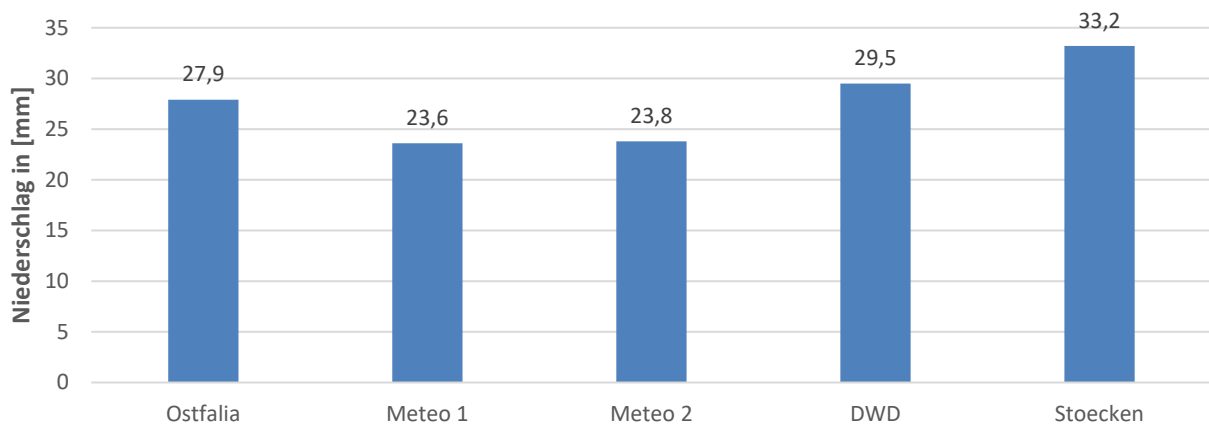
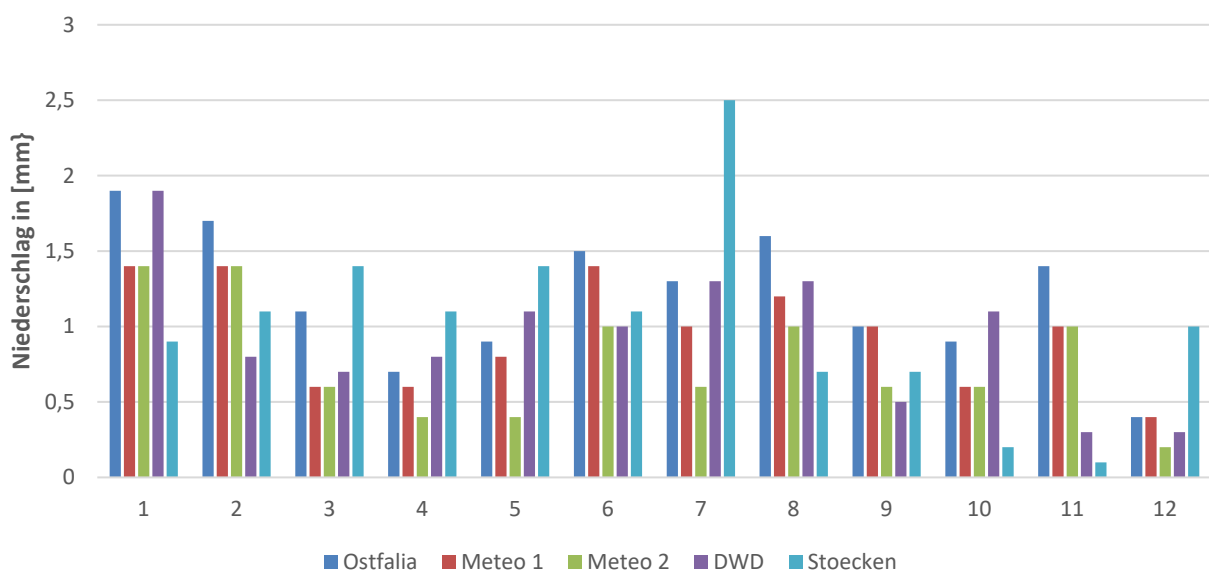


Abbildung 2-15: Stündliche Niederschlagssummen von 00:00 Uhr bis 12:00 Uhr am 25.07.2017



Die erfassten Niederschlagssummen der mobilen Messstationen sind geringer als die der fest installierten Stationen. Die Regenmesser der mobilen Stationen sind baulich bedingt in 2 Meter Höhe angebracht, die Regenmesser der festen Stationen befinden sich auf 1 Meter Höhe über Geländeoberkante. Weiterhin sind die Regenmesser der mobilen Stationen mit einer einfachen Kippwaage ausgestattet, im Gegensatz zu den fest installierten Systemen, an denen eine Doppelkippswaage verbaut ist. Es wird vermutet, dass aufgrund der eingesetzten Technik hohe Niederschlagsmengen in einem kurzen Zeitraum nicht vollständig erfasst werden, wodurch die geringeren Gesamtsummen zustande kommen können.

Werden ausschließlich die Stationen Ostfalia, DWD und Stoecken betrachtet, kann man erkennen, wie die Niederschlagsmengen variieren. Dies hebt die Inhomogenität der Wetterverhältnisse in dem betrachteten Gebiet hervor und unterstreicht den Bedarf an lokalen Messungen für standortbezogene Aussagen zum Bewässerungsbedarf auf landwirtschaftlichen Flächen.

2.4 Berechnungsempfehlungen

Die Berechnung in der Projektregion erfolgt zumeist auf Basis der Berechnungsempfehlung des Fachverband Feldberegnung e.V. und einer persönlichen Beurteilung durch den Landwirt. Beeinflusst wird der Zeitpunkt der Beregnung durch die Betriebslogistik, da in der Projektregion bis auf vereinzelte Ausnahmen die mobile Beregnungsmaschine für die Bewässerung zum Einsatz kommt. Diese mobile Beregnungslösung wird auf allen beregneten Flächen eingesetzt, die nicht anderweitig erschlossen sind (z.B. Kreisregner). Die Anzahl an Beregnungsmaschinen in Relation zur beregneten Fläche begrenzt den Einsatzzeitraum auf den einzelnen Parzellen. So kann, auch wenn der optimale Bewässerungszeitpunkt bekannt ist, die Beregnung erst erfolgen, wenn die Beregnungsmaschine für den bestimmten Schlag zur Verfügung steht. Die Beregnungsmaschine mit Starkregner wird aus ökonomischen Gründen gewählt, da durch eine vergleichsweise geringe Investitionssumme die grundsätzliche Beregnung aller landwirtschaftlichen Flächen erfolgen kann, sofern ein Zugang zu einem Brunnen oder einer Ringleitung besteht. Der logistische Aufwand für den Transport der Beregnungsmaschinen und die teilweise zu frühe, oder zu späte Beregnung, ausgehend vom idealen Bewässerungszeitpunkt werden dabei in Kauf genommen. Dies ist nicht zuletzt den Schlaggrößen geschuldet, die in der Projektregion oft 5 bis 10 ha betragen. Der Einsatz von teilmobilen Beregnungsmaschinen, wie z.B. Kreisberegnungsmaschinen, setzt Schlaggrößen ab 25 ha aufwärts voraus (Sourell 2014).

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Bestimmung des Bewässerungszeitpunktes lassen sich nicht direkt miteinander vergleichen, da sie auf verschiedenen Ansätzen beruhen. Die Hinweise für den Einsatz zur Feldberegnung des Fachverband Feldberegnung e.V. bauen auf Informationen über die klimatische Wasserbilanz an ca. 70 Stationen des DWD in Norddeutschland auf. Weiterhin enthält das Rundschreiben Wetterprognosen, Wasserbedarfsvorhersagen und Bodenfeuchteverlaufskurven. Darüber hinaus sind Ergebnisse der Bodenfeuchtemessungen auf dem Versuchsfeld der LWK am Standort Hamerstorf aufgeführt. Anhand dieser umfangreichen

Informationen werden Hinweise für den Beregnungseinsatz zu verschiedenen Ackerbaukulturen abgeleitet (Fachverband Feldberegnung e.V. 2006). Diese Informationen dienen den Landwirten als Orientierung und müssen im Zusammenhang mit den angebauten Kulturen und den vorhandenen Böden betrachtet werden. Andere Ansätze zur Bestimmung des Beregnungszeitpunktes und des Wasserbedarfs sind Messungen der Bodenfeuchte und des Niederschlages, sowie die Inaugenscheinnahme des Bodens (siehe auch Abbildung 2-5). Ein weiterer Ansatz zur Bestimmung ist die Nutzung von Beregnungssteuerungsmodellen, die allerdings nicht von den Landwirten genutzt wurden, die an der Umfrage im Rahmen des SeBeK Projektes teilgenommen haben.

Im Rahmen des Klimzug-Nord Projektes der Landwirtschaftskammer wurden vier verschiedene Beregnungssteuerungsmodelle in einem Feldversuch vergleichend geprüft und diese mit Messungen des Bodenwassergehaltes kontrolliert. Die Beregnungssteuerung der Modelle erfolgte bei den betrachteten Modellen auf Basis der Wasserbilanz, der Wasserspeicherfähigkeit des Bodens, der nutzbaren Feldkapazität in % (nFK) und unter Berücksichtigung des Entwicklungsstadiums der Pflanzen. Die betrachteten Modelle waren:

- (1) Geisenheimer Bewässerungssteuerung
- (2) Modell LBEG (BOWAB)
- (3) Modell Zephyr
- (4) Modell Irrigama

Die Versuchsergebnisse belegen, dass eine optimale Bewässerungssteuerung zu einer hohen Wassernutzungseffizienz führen kann, ohne dabei negative Auswirkungen auf die Ertragsmenge und die Qualität zu provozieren. Die optimale Anpassung der Beregnung auf die Ansprüche der jeweiligen Kultur und Sorte sind dabei relevanter als ein höherer Wassereinsatz. Eine zu starke Reduzierung der Wassermenge führte jedoch zu Ertragseinbußen. (Riedel 2014)

Um die verschiedenen Methoden zur Beregnungssteuerung abschätzen zu können, wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Beregnungsempfehlungen mit den Ermittlungsansätzen auf Basis des CWSI und auf Basis der Geisenheimer Bewässerungssteuerung mit regionalen Daten verglichen. Als Referenz dienen die gravimetrischen Bestimmungen der Bodenfeuchte der Landwirtschaftskammer Niedersachsen auf den Versuchsfeldern in Hamerstorf, auf denen auch die Beregnungsempfehlungen des Fachverband Feldberegnung basieren. Die nach diesem Ansatz „optimal“ berechnete Variante wird bei einer nutzbaren Feldkapazität (nFK) von 50 % berechnet. Die Auswertung erfolgt basierend auf Daten für das Jahr 2018 und 2019. Die Beregnung nach dem CWSI erfolgte erst im Jahr 2019.

Für die Bestimmung der Beregnung nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung wird die potentielle Verdunstung nach Haude bestimmt. Dafür wurden die Daten der DWD Wetterstation in Uelzen verwendet, da diese in den Betrachtungszeiträumen mit den geringsten Ausfällen

vorlagen. Die Bestimmung der Evapotranspiration nach Haude ist ein einfaches Verfahren auf Basis der 14:00 Uhr Werte der Lufttemperatur (t) und der relativen Luftfeuchte (rf). In der Berechnung ergibt sich die Evapotranspiration (ETp) in mm durch die Multiplikation des Sättigungsdefizites (Sättigungsdampfdruck (E) – Wasser-Dampfdruck (e)) um 14:00 Uhr in mbar mit den empirischen Monatsfaktoren (f) in mm/(d*mbar)

$$ETp = f * (E - e) \quad (2-4)$$

Der Sättigungsdampfdruck berechnet sich wie folgt:

$$E = 6,11 * 10^{(7,48 * \frac{t}{237+t})} \quad (2-5)$$

Der Dampfdruck berechnet sich wie folgt:

$$e = rf * E \quad (2-6)$$

Tabelle 2-1: Gegenüberstellung der Beregnungszeitpunkte und der Beregnungswassermengen im Jahr 2018 und 2019. (GH=Geisenheimer Bewässerungssteuerung, LWK=Landwirtschaftskammer, CWSI=Crop Water Stress Index, alle Werte in mm) (DWD Climate Data Center (CDC))

BEREGNUNGSZEITPUNKT	GH	LWK	BEREGNUNGSZEITPUNKT	GH	LWK	CWSI
21.05.2018	10		30.05.2019	10		
25.05.2018	10		04.06.2019		20	20
29.05.2018	10		06.06.2019	10		
07.06.2018	30		21.06.2019		25	25
08.06.2018		25	23.06.2019	30		
12.06.2018	30		27.06.2019	30	30	30
14.06.2018		28	02.07.2019	30		
27.06.2018		30	03.07.2019		30	30
29.06.2018	30		18.07.2019		25	25
04.07.2018	30	30	25.07.2019		30	
09.07.2018	30	25	26.07.2019	30		
19.07.2018	30	30	29.07.2019			30
24.07.2018	30		05.08.2019	30		
26.07.2018		30				
28.07.2018	30					
02.08.2018		30				
03.08.2018	30					
07.08.2018		25				
SUMME BEREGNUNGSWASSER	300	253		170	160	160
ANZAHL DER WASSERGABEN	12	9		7	6	6

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass im Vergleich zu den gravimetrisch bestimmten Beregnungsempfehlungen die Beregnungssteuerung nach der Geisenheimer Steuerung im Dürrejahr 2018 fast 50 mm mehr Wasser in 3 weiteren Gaben verregnet hätte. Im Jahr 2019 würde das Geisenheimer Model nur 10 mm mehr Wasser in einer zusätzlichen Bewässerungsgabe verregnen. Die Beregnungssteuerung nach dem CWSI ist nahezu identisch mit den Untersuchungen der Landwirtschaftskammer. Bei der Steuerung nach dem CWSI erfolgte lediglich der letzte Beregnungstermin vier Tage später. Weiterführende Auswertungen verschiedener Beregnungssteuerungsmodelle wurden im Teil 4 des Berichtes zum Klimzug-Nord Projekt der Landwirtschaftskammer Niedersachsen „Landwirtschaft im Klimawandel: Wege der Anpassung“ vorgenommen.

Literaturverzeichnis

- Bagdahn, Iris; Meinardi, Dominic (2018): Umfrage zur Bewässerungspraxis im Untersuchungsgebiet. Umfrage im Rahmen des EIP-Agri SeBeK Projektes. Interview mit Anonyme Umfrage.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2017): Agrarmeteorologie. Unter Mitarbeit von V. Bräutigam, W. Henk und R. Schretzmann. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. Bonn.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2018): Bericht zur Markt- und Versorgungslage Kartoffeln 2018. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Online verfügbar unter https://www.ble.de/SharedDocs/Downloads/DE/BZL/Daten-Berichte/Kartoffeln/2018BerichtKartoffeln.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 07.11.2019.
- Deutscher Wetterdienst (29.12.2017): Erneut ein sehr warmes Jahr, unbeständig und oft extrem. Offenbach. Kirsche, U.; Lux, G.; Friedrich, A.
- Deutscher Wetterdienst (28.12.2018): 2018 – ein außergewöhnliches Wetterjahr mit vielen Rekorden. Offenbach. Kirsche, U.; Lux, G.; Friedrich, A.
- DWD Climate Data Center (CDC): Daten extrahiert vom DWD Climate Data Center (CDC). Datenbasis Deutscher Wetterdienst, eigene Elemente ergänzt/gemittelt. Hg. v. DWD Climate Data Center (CDC). Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/cdc/cdc_node.html.
- Fachverband Feldberegnung e.V. (2006): Unsere Aufgaben. Fachverband Feldberegnung e.V. Online verfügbar unter <http://fachverband-feldberegnung.de/aufgaben.htm>, zuletzt aktualisiert am 07.02.2020, zuletzt geprüft am 03.06.2020.
- FAOSTAT: FAO Global Statistical Yearbook, FAO Regional Statistical Yearbooks. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#home>, zuletzt geprüft am 08.11.2019.
- Jägermeyr, J.; Gerten, D.; Schaphoff, S.; Heinke, J.; Lucht, W.; Rockström, J. (2016): Integrated crop water management might sustainably halve the global food gap. In: *Environ. Res. Lett.* 11 (2), S. 25002. DOI: 10.1088/1748-9326/11/2/025002.
- Mersch, I.; v. Haaren, M.; Eiben, E. (2011): GIS-gestützte Berechnungsflächenverwaltung - Handlungsempfehlung für die Beantragung einer wasserrechtlichen Erlaubnis. Landwirtschaftskammer Niedersachsen. Online verfügbar unter <https://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm?file=21147>, zuletzt geprüft am 03.02.2021
- Michel, R. (2014): Standörtliche und pflanzenökologische Grundlagen der Bewässerung. In: Rickmann Michel und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*: Erling Verlag GmbH & Co. KG (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), S. 15–26.
- Michel, R.; Günther, R. (2014): Berechnungs- und Messverfahren zur Bewässerungssteuerung. In: Rickmann Michel und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*: Erling Verlag GmbH & Co. KG (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), S. 95–109.
- Riedel, A. (2014): Wasser sparen im Ackerbau. Berechnungssteuerung. In: Landwirtschaftskammer Niedersachsen Bezirksstelle Uelzen (Hg.): *Landwirtschaft im Klimawandel: Wege zur Anpassung*. Teil 4, Wasser sparen im Ackerbau. Uelzen, S. 86–89.
- Sourell, H. (2014): Bewässerungstechniken und -technologien. In: Rickmann Michel und Heinz Sourell (Hg.): *Bewässerung in der Landwirtschaft*: Erling Verlag GmbH & Co. KG (Themenbibliothek Pflanzenproduktion), 65.

3 Anwendung des Crop Water Stress Index in Kartoffeln in Nordostniedersachsen

Johanna Schröder¹, Martin Kraft¹, Angela Riedel²

1) Thünen-Institut für Agrartechnologie, 2) Landwirtschaftskammer Niedersachsen

3.1 Historie und Entwicklung des Crop Water Stress Index

Bereits in den 1960er Jahren wurden erste Studien durchgeführt, die die Eignung von Bestandstemperaturmessungen als Indikator für Trockenstress bei Pflanzen untersuchten. So untersuchten u.a. Ehrler und van Bavel (1967) die Reaktion von *Sorghum*-Blättern auf Änderungen im Bodenwassergehalt. Dazu führten sie an zwei Tagen 24-Stunden-Messungen meteorologischer Parameter (u.a. der Lufttemperatur), der Blattdicke, der Bestandstemperatur und der Evaporation am Tag bevor und sechs Tage nach der Bewässerung durch (Ehrler und van Bavel 1967). Die Bestandstemperatur wurde mit Hilfe eines Thermoelementes in einem regelmäßigen Abstand von 15 Minuten erfasst (Ehrler und van Bavel 1967). Die Auswertung der Temperaturdifferenz zwischen der gemessenen Bestandstemperatur und der Lufttemperatur ($T_C - T_A$) zeigte, dass eine begrenzte Wasserverfügbarkeit zu einer Erhöhung der Bestandstemperatur führt. Die mangelnde Wasserverfügbarkeit bewirkt, dass sich die Stomata schließen, wodurch die Transpirationsrate abnimmt. Dies bewirkt, dass die Pflanze ihre Blätter nicht mehr ausreichend kühlen kann, wodurch eine Erhöhung der Bestandstemperatur auf ein Niveau oberhalb der Lufttemperatur verursacht wird (Ehrler und van Bavel 1967).

Im Jahr 1972 zeigten Bartholic et al. die Nutzbarkeit von Thermalmessgeräten zur Erfassung von Bestands- und Bodentemperaturen auf. Mit Hilfe eines an einem Flugzeug montieren Thermalmessgerätes wurde ein Baumwollfeld überflogen, in dem weite Teile durch Trockenstress geprägt waren. Die Ergebnisse der Thermalmessungen zeigten, dass die Bestandstemperaturen der Baumwollpflanzen im feuchten und im gestressten Bereich Differenzen um bis zu 6 °C aufwiesen (Bartholic et al. 1972). Anhand der Ergebnisse zeigten Bartholic et al. (1972) das Potential von Thermalmessungen zur Bestimmung von trockenen und feuchten Bereichen und der Bodenwasserbedingungen in einem Bestand auf. Auch Ehrler (1973) untersuchte den Zusammenhang der Temperaturdifferenz zwischen der Blatt- und Lufttemperatur ($T_C - T_A = \Delta T$) und der Bodenwasserversorgung in Baumwollbeständen in Arizona (USA). Dazu maß er die Temperatur des Bestandes mit Hilfe von Thermoelementen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die ΔT -Werte nach der Bewässerung abnahmen und ihr Minimum einige Tage später erreichten. Mit abnehmender Wasserverfügbarkeit stiegen diese Werte nach einigen Tagen wieder an (Ehrler 1973). Die gemessenen Daten ließen einen linearen Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz ΔT und der Wasserversorgung, unter Berücksichtigung des

Sättigungsdampfdruckdefizits (VPD) und unter klaren Wetterbedingungen, vermuten (Ehrler 1973). Der Zusammenhang des Temperaturdefizites zum Bewässerungszustand der Pflanze wurde 1977 in dem Konzept des „stress degree day“ (SDD) beschrieben (Jackson et al. 1977; Idso et al. 1977). Unter der Annahme, dass Umweltfaktoren wie z.B. die Strahlung, die Windgeschwindigkeit und der VPD stark in der Temperaturdifferenz manifestiert sind (Jackson et al. 1981), sollte anhand dieses Konzeptes eine Vorhersage über den Ernteertrag (Idso et al. 1977) sowie über den Wasserbedarf der Pflanze (hier: Weizen) unter Berücksichtigung der Evapotranspiration (Jackson et al. 1977) getroffen werden können. Der „stress degree day“ wird definiert als:

$$SDD = \sum_{n=i}^N (T_C - T_A)_n \quad (3-1)$$

mit T_C = Bestandstemperatur, T_A = Lufttemperatur gemessen in 1,5 m Höhe über N Tage, beginnend an Tag i (Jackson et al. 1977). Somit ergibt sich der SDD als eine Aufsummierung der gemessenen Temperaturdifferenzen zwischen der Bestandstemperatur T_C und der Lufttemperatur T_A , gemessen ein bis eineinhalb Stunden nach Sonnenhöchststand (zwischen 13:30 und 14:00 Uhr) (Jackson et al. 1977). Die zusätzlich mit Lysimetern durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Wassernutzung der Pflanzen zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen des SDD (Jackson et al. 1977). Jackson et al. schlussfolgerten, dass die Messungen des Temperaturdefizites ein praktisches Werkzeug zur Berechnung des Wasserbedarfs bei Weizen darstellen könnten (Jackson et al. 1977).

Im Jahr 1981 untersuchten Idso et al. den Zusammenhang zwischen der Temperaturdifferenz ($\Delta T = T_C - T_A$) und dem VPD anhand verschiedener Kulturpflanzen. Unter klaren (wolkenlosen) Bedingungen und für ausreichend bewässerte Pflanzen konnte ein linearer Zusammenhang von ΔT zum VPD aufgezeigt werden, wie er bereits von Ehrler (1973) vermutet wurde (Idso et al. 1981). Anhand der gemessenen Daten definierten Idso et al. (1981) eine obere und untere Grenze, zwei fiktive Größen, welche die Pflanzenzustände bei gestressten und nicht-gestressten Wasserversorgungsbedingungen beschreiben. Auf Grundlage einer linearen Regression der gemessenen Daten konnten Bereiche ermittelt werden, die diese Pflanzenzustände beschreiben. Die untere Grenze beschreibt den Zustand, in dem die Pflanze ausreichend mit Wasser versorgt ist, d.h. sie transpiriert, und in dem der Trockenstress vernachlässigbar ist (Idso et al. 1981). Mit abnehmender Wasserverfügbarkeit und dadurch zunehmendem Trockenstress verschieben sich die Werte, bis sie die obere Grenze erreichen. An der oberen Grenze kann die Pflanze aufgrund mangelnder Wasserverfügbarkeit nicht mehr transpirieren und steht unter maximalem Trockenstress. An diesem Punkt wird ΔT nur noch über die eintreffende Strahlung und den Austausch von Energie beeinflusst (Idso et al. 1981). Anhand dieses Zusammenhangs beschreiben Idso et al. erstmalig den Crop Water Stress Index (CWSI) in einem empirischen Ansatz, welcher dazu genutzt werden soll, Trockenstress bei Pflanzen zu erkennen (Idso et al. 1981). Im gleichen Jahr wurde der CWSI auf Basis der Strahlungsbilanz in einem theoretischen Ansatz von Jackson et al. (1981) parametrisiert. Der CWSI definiert sich nach Jackson et al. (1981) wie folgt:

$$CWSI = 1 - E/E_p = \frac{\gamma(1 - r_c/r_a) - \gamma^*}{\Delta + \gamma(1 + r_c/r_a)} \quad (3-2)$$

mit E = aktuelle Evapotranspiration (für alle r_c), E_p = potentielle Evapotranspiration (für $r_c = r_{cp}$), γ = Psychrometerkonstante [$\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$], r_c = Blattwiderstand [s m^{-1}], r_a = aerodynamischer Widerstand [s m^{-1}], Δ = Steigung der Sättigungsdampfdrucks-Temperatur Beziehung und $\gamma^* = \gamma(1 + r_{cp}/r_a)$. Da das Verhältnis von E zu E_p Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann, wobei ein Wert von 1 einem Zustand mit ausreichender Wasserversorgung und null Trockenstressbedingungen beschreibt, wird der CWSI ebenfalls für diesen Wertebereich definiert (Jackson et al. 1981). Die von Idso et al. (1981) erschaffenen Grenzen sind fiktive Größen, welche Jackson et al. wie folgt parametrisiert:

An der unteren Grenze wird der Blattwiderstand als $r_c = 0$ definiert, da an diesem Punkt ausreichend Wasser zu Verfügung steht. Die untere Grenze wird definiert als:

$$(T_C - T_A)_u = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{(e_A^* - e_A)}{\Delta + \gamma} \quad (3-3)$$

Mit T_C = Temperatur der Blattoberfläche [$^\circ\text{C}$], T_A = Lufttemperatur [$^\circ\text{C}$], r_a = aerodynamischer Widerstand [s m^{-1}], R_n = Strahlungsbilanz [W m^{-2}], ρ = Dichte der Luft [kg m^{-3}], c_p = spezifische Wärmekapazität der Luft [$\text{J kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$], Δ = Steigung der Sättigungsdampfdrucks-Temperatur Beziehung [$\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$], γ = Psychrometerkonstante [$\text{Pa } ^\circ\text{C}^{-1}$], e_A^* = Sättigungsdampfdruck [Pa], e_A = Dampfdruck der Luft [Pa]. Die angegebene Gleichung (3-3) gilt für die Evaporationsrate über einer freien Wasseroberfläche, welche jedoch nicht mit der potentiellen Evapotranspiration über einer Kulturpflanze verglichen werden kann (Jackson et al. 1981). Insbesondere in bewässerten Beständen kann der Boden ausreichend mit Wasser versorgt sein, ohne dass die Pflanzenoberfläche feucht ist. In diesem Zustand ist der Blattwiderstand nicht null (van Bavel und Ehler 1968), sondern kann als Blattwiderstand bei potentieller Verdunstung (r_{cp}) beschrieben werden (Jackson et al. 1981). Aus diesem Grund gilt für die untere Grenze $r_c = r_{cp}$, woraus sich folgende Abänderung der Gleichung (3-3) ergibt (Jackson et al. 1981):

$$(T_C - T_A)_u = \frac{r_a R_n}{\rho c_p} \frac{\gamma^*}{\Delta + \gamma^*} - \frac{(e_A^* - e_A)}{\Delta + \gamma^*} \quad (3-4)$$

mit

$$\gamma^* = \gamma \left(1 + r_{cp}/r_a\right) \quad (3-5)$$

Die obere Grenze beschreibt den Pflanzenzustand, wenn der Blattwiderstand gegen unendlich strebt ($r_c \rightarrow \infty$) und die Pflanze maximalen Trockenstressbedingungen ausgesetzt ist. Die untere Grenze kann wie folgt definiert werden (Jackson et al. 1981):

$$(T_c - T_A)_{ul} = r_a R_n / \rho c_p \quad (3-6)$$

Mit T_c = Temperatur der Blattoberfläche [$^{\circ}\text{C}$], T_A = Lufttemperatur [$^{\circ}\text{C}$], r_a = aerodynamischer Widerstand [s m^{-1}], R_n = Strahlungsbilanz [W m^{-2}], ρ = Dichte der Luft [kg m^{-3}], c_p = spezifische Wärmekapazität der Luft [$\text{J kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Sieben Jahre später, im Jahr 1988, publizierte Jackson et al. eine überarbeitete Formel zur Berechnung des CWSI. In seiner Publikation definiert Jackson et al. den CWSI in vereinfachter Form wie folgt:

$$CWSI = \frac{(T_c - T_A) - (T_c - T_A)_{ul}}{(T_c - T_A)_{ul} - (T_c - T_A)_{ll}} \quad (3-7)$$

Mit $(T_c - T_A)$ = aktuelle oder gemessene Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$], $(T_c - T_A)_{ll}$ = Temperaturdifferenz an der unteren Grenze [$^{\circ}\text{C}$] und $(T_c - T_A)_{ul}$ = Temperaturdifferenz an der oberen Grenze [$^{\circ}\text{C}$]. Da der theoretische Ansatz auf Grundlage der Strahlungsbilanz basiert, wird bei der Berechnung des latenten und sensiblen Wärmeflusses u.a. angenommen, dass die Quelle für die beiden Flüsse die Vegetation darstellt und die unterliegende Oberfläche (hier: Boden) diese Flüsse nicht signifikant beeinflusst (Jackson et al. 1988). Diese Annahme ist in der Theorie nicht valide und verursacht einen geringfügigen Fehler bei der Berechnung der Temperaturdifferenz unter nicht-gestressten Bedingungen und voller Vegetationsbedeckung (untere Grenze). Aus diesem Grund führt Jackson et al. (1988) einen Interzeptionskoeffizienten ein, durch welchen dieser Fehler reduziert werden kann. Nach Clothier et al. (1986) kann bei den vorliegenden Gegebenheiten an der unteren Grenze angenommen werden, dass der Bodenwärmefluss $G = 0,1 \cdot R_n$ beträgt (Jackson et al. 1988). Somit ergibt sich folgende Korrektur:

$$R_n - G = 0,9 R_n = I_c R_n \quad (3-8)$$

mit $I_c = 0,9$ als Interzeptionskoeffizient für die untere Grenze (Jackson et al. 1988). Somit kann die untere Grenze wie folgt berechnet werden:

$$(T_c - T_A)_{ul} = \frac{r_a I_{cl} R_n}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} - \frac{(e_A^* - e_A)}{\Delta + \gamma} \quad (3-9)$$

Bei der oberen Grenze liegen andere Bedingungen vor, weshalb hier der Interzeptionskoeffizient entsprechend angepasst werden muss. Die obere Grenze repräsentiert den Zustand der Pflanze

unter maximalem Trockenstress, bei dem anzunehmen ist, dass die Pflanze in vertrocknetem Zustand vorliegt und die Vegetationsdecke nicht mehr vollständig geschlossen ist. In diesem ausgetrockneten Zustand ist die Strahlungsbilanz als geringer anzunehmen, da der Anteil an reflektierter Strahlung in diesem Zustand größer ist, als unter optimal mit Wasser versorgten Bedingungen (Jackson et al. 1988). Dieser Anteil könnte die Strahlungsbilanz um etwa 10 % reduzieren, weshalb der Interzeptionskoeffizient für die obere Grenze mit $I_{cu} = 0,8$ datiert wird (Jackson et al. 1988). Unter dieser Annahme kann die obere Grenze wie folgt parametrisiert werden (Jackson et al. 1988):

$$(T_C - T_A)_{ul} = r_a I_{cu} R_n / \rho c_p \quad (3-10)$$

Da auch die aktuelle Temperaturdifferenz aus meteorologischen Größen berechnet wird, muss in die Berechnung ebenfalls der Interzeptionskoeffizient, wie bereits für die untere Grenze dargestellt, miteinbezogen werden. Somit ergibt sich für die Berechnung der aktuellen Temperaturdifferenz folgende Formel (Jackson et al. 1988):

$$(T_C - T_A) = \frac{r_a I_c R_n}{\rho c_p} \cdot \frac{\gamma (1 + r_c/r_a)}{\Delta + \gamma (1 + r_c/r_a)} - \frac{e_A^* - e_A}{\Delta + \gamma (1 + r_c/r_a)} \quad (3-11)$$

Seit der Einführung des CWSI wurde dieser in vielen Studien weltweit angewandt und auf die Eignung zur praktischen Anwendung getestet. In den 1980er und 1990er Jahren wurden Studien zum CWSI vermehrt an Baumwolle (Pinter und Reginato 1982; Wanjura et al. 1984) aber auch an Soja (Nielsen 1990) und Weizen (Yazar et al. 1999) durchgeführt. Bis dato wurden nur wenige Studien zur Berechnung des CWSI in Kartoffeln durchgeführt. Die vorhandenen Studien thematisieren verschiedenste Ansätze: Stark und Wright (1985) untersuchten in den Jahren 1982 und 1983 den Zusammenhang zwischen der gemessenen Bestandstemperatur und dem auftretenden Wasserstress in Kartoffeln anhand des CWSI. Dazu maßen sie die Temperaturdifferenz ΔT , das VPD sowie das Blattwasserpotential ψ . Die Ergebnisse zeigten einen linearen Zusammenhang zwischen dem CWSI und dem gemessenen Blattwasserpotential (Stark und Wright 1985). McCann et al. (1992) untersuchten den CWSI an ausreichend mit Wasser versorgten Kartoffeln, indem sie meteorologische Parameter im 10-Minuten-Intervall während der Tagesstunden erhoben. Auf Grundlage der Ergebnisse konnten sie die Windgeschwindigkeit als Einflussfaktor und Ursache für die Variabilität in den CWSI-Ergebnissen feststellen (McCann et al. 1992). Anhand von Kartoffeln in der Türkei untersuchten Erdem et al. (2005a; 2006) den CWSI an unterschiedlichen Bewässerungsvarianten (Tröpfchen- und Rillenbewässerung) mit Hilfe des empirischen Ansatzes nach Idso et al. (1981). Dazu kultivierten sie die Kartoffeln unter verschiedenen Beregnungsbehandlungen, wodurch sie die Bedingungen an der oberen und unteren Grenze simulieren konnten (Erdem et al. 2006; Erdem et al. 2005a). Erdem et al. (2005a; 2006) zeigten die Möglichkeit der Infrarotmessungen und des CWSI zur Messung und Erkennung des Wasserversorgungszustandes der Pflanze auf. Sie wiesen jedoch darauf hin, dass weitere

Untersuchungen notwendig seien, um den CWSI als Bewässerungssteuerung oder Komponente für ein Bewässerungssteuerungsmodell nutzen zu können (Erdem et al. 2005a). Rud et al. (2013; 2014) kalkulierten den CWSI für zwei verschiedene Bewässerungsvarianten, indem sie die Bestandstemperatur der Kartoffelpflanzen mit Hilfe von thermalen Luftbildern ermittelten. Weiterhin maßen sie die stomatäre Leitfähigkeit und den Ernteertrag und korrelierten die Ergebnisse mit den berechneten CWSI-Werten. Die Ergebnisse zeigten eine gute Korrelation zwischen der stomatären Leitfähigkeit und dem CWSI. Auch Rud et al. (2013; 2014) schlussfolgern, dass Thermalbilder als potentiell geeignet für eine Aussage über den Wasserversorgungszustand der Pflanze mittels CWSI angesehen werden können.

Im Rahmen des Projektes „Sensorgestützte Beregnungssteuerung in Kartoffeln“ (kurz: SeBeK) wurde der Crop Water Stress Index unter Zuhilfenahme meteorologischer Parameter berechnet. Ziel des Projektes war es zu untersuchen, ob der CWSI geeignet ist, um als berührungslose Beregnungssteuerung eingesetzt zu werden und schlagspezifische Beregnungsentscheidungen für Kartoffeln in Nordostniedersachsen treffen zu können. Langfristiges Ziel ist die Entwicklung einer effizienten und ressourcenschonenden Bewässerungssteuerung. Dazu wurde der CWSI aus stetig und stationär gemessenen meteorologischen Parametern berechnet. Neuartig war in diesem Ansatz die durchgängige Kalkulation des CWSI während des Messzeitraums unter diversen Wetterbedingungen. Anhand dieses Vorgehens sollte getestet werden, unter welchen Bedingungen eine Kalkulation des CWSI möglich ist und gegenüber welchen Parametern der CWSI sensitiv reagiert.

3.2 Grundlagen der CWSI-Berechnung und angewandte Methodik

3.2.1 Grundlagen: Einflussgrößen und formelrelevante Parameter

Die für die Berechnung des CWSI benötigten grundlegenden Formeln wurden bereits in Kapitel 3.1 beschrieben. Im Folgenden sollen formelrelevante Parameter und wichtige Einflussgrößen der CWSI-Berechnung dargestellt und die in diesem Projekt verwendete Methodik beschrieben werden.

Strahlung

Zu den wichtigsten Parametern der CWSI-Berechnung gehört die Strahlung. Bereits 1981 konnte diese durch Idso et al. als maßgebender Einflussfaktor auf die CWSI-Berechnung aufgefunden werden. Idso et al. (1981) beschreibt einen linearen Zusammenhang der Temperaturdifferenz ΔT und dem VPD bei unterschiedlichen Feldfrüchten, jedoch nur solange diese keine Beschattung durch Wolken erfahren (Idso et al. 1981). Im SeBeK-Projekt ist der wichtigste gemessene Strahlungsparameter die einfallende kurzwellige Strahlung, die sogenannte Globalstrahlung (K_{\downarrow} oder engl.: R_s (*global* oder *solar radiation*)), die sich aus der diffusen und direkten Strahlung zusammensetzt (Kuttler 2009). Diese ist Teil der Strahlungsbilanz (Q^* , engl.: R_n (*netradiation*))

welche sich aus der Summe aller kurz- und langwelliger Strahlungsflüsse ergibt und die Grundlage der Wärmebilanz bildet (Kuttler 2009, 68f.). Die Strahlungsbilanz kann wie folgt beschrieben werden:

$$Q^* = K \uparrow + K \downarrow + L \uparrow + L \downarrow \quad (3-12)$$

mit Q^* = Strahlungsbilanz, $K \uparrow$ = kurzwellige Reflexion, $K \downarrow$ = direkte und diffuse Globalstrahlungsflussdichte, $L \uparrow$ = langwellige Ausstrahlung, $L \downarrow$ = langwellige atmosphärische Gegenstrahlung, alle Angaben in $W m^{-2}$ (Foken 2016, S. 15; Kuttler 2009). Die Strahlungsbilanz ist in der CWSI-Berechnung für die Kalkulation der aktuellen sowie fiktiven Temperaturdifferenzen essentiell und wird in allen drei Termen verwendet (vgl. Gl. (3-9) bis (3-11)). Für den kostengünstigen Einsatz der Messtechnik in der Praxis soll die Strahlungsbilanz aus der gemessenen Globalstrahlung abgeschätzt werden. Dafür wurde die Annahme zur Abschätzung der Strahlungsbilanz aus Fritschen (1967) (entnommen aus Bockhold et al. (2011)) übernommen. Es wird angenommen, dass diese 75 % der einfallenden Globalstrahlung beträgt und kann somit definiert werden als:

$$R_n = R_s \cdot 0,75 \quad (3-13)$$

mit R_n = Strahlungsbilanz und R_s = Globalstrahlung, angegeben in $W m^{-2}$ (Bockhold et al. 2011).

Stomatärer Widerstand

Ein weiterer wichtiger Faktor zur Berechnung des CWSI ist der stomatäre Widerstand r_c (engl.: canopy oder surface resistance (Oke 1987)). Dieser ist bereits in der ersten Definition des CWSI nach Jackson et al. (1981) enthalten (vgl. Gl. (3-2)) und wird in der näheren Definition der drei Temperaturdifferenzen der aktuellen Temperaturdifferenz zugeteilt (vgl. Gl. (3-11) nach Jackson et al. (1988)). Der stomatäre Widerstand charakterisiert die physiologische Kontrolle des Blattes gegen den Wasserverlust in einer Pflanzengemeinschaft unter der Annahme, dass sich alle Blätter parallel verhalten, sodass sich der Bestand wie ein gigantisches Blatt („giant leaf“) verhält (Oke 1987; Monteith 1965). Auch auf den stomatären Widerstand hat die einfallende Strahlung und auftretender Wasserstress einen Einfluss. Mit einer höheren Einstrahlung wird der Widerstand bei den meisten Pflanzen geringer und größer mit steigendem Wasserstress (Oke 1987). Sobald die Blattoberfläche feucht ist, gilt $r_c = 0$, unter der Annahme, dass in diesem Zustand die Stomata keine regulierende Funktion mehr besitzen (Oke 1987). Wie bereits in Kapitel 3.1 beschrieben, tritt insbesondere in bewässerten Gebieten der Fall auf, dass der Boden ausreichend mit Wasser versorgt ist, die Pflanzenoberfläche jedoch nicht feucht ist, so dass die Annahme $r_c = 0$ in diesem Fall unzutreffend ist (Ehrler und van Bavel 1967). Für diesen Fall wird eine neue Variable definiert: der Blattwiderstand bei potentieller Verdunstung r_{cp} (Jackson et al. 1981), welcher bereits in Gl. (3-4) und (3-5) eingeführt wurde. Die potentielle Evapotranspiration definiert sich als „diejenige Wassermenge, die von einer ganz oder teilweise mit Vegetation bedeckten, unter optimaler Wasser- und Nährstoffversorgung stehenden Fläche bei ungehindertem Wassernachschub unter

den gegebenen meteorologischen, bodenphysikalischen, vegetationspezifischen und pflanzenbaulichen Randbedingungen pro Zeiteinheit maximal in die Atmosphäre transferierbar ist“ (Schrödter 1985, S. 18). Demnach kann ein solcher Zustand einzig unter den Bedingungen an der unteren Grenze auftreten, weshalb in der Definition der unteren Grenze r_c durch r_{cp} ersetzt wird (vgl. Gl. (3-4) und (3-5), nach Jackson et al. (1981; 1988)). Für die Berechnung des Blattwiderstandes bei potentieller Verdunstung r_{cp} wurde im SeBeK-Projekt die Formel nach Amer und Hatfield (2004) verwendet:

$$r_{cp} = 19,965 \cdot R_n^{-0,879} \quad (3-14)$$

mit r_{cp} = Blattwiderstand bei potentieller Verdunstung, angegeben in $s\ m^{-1}$ und R_n = Strahlungsbilanz, angegeben in $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$ (Amer und Hatfield 2004). Für die Verwendung der Formel in der CWSI-Berechnung wurde die gemessene Strahlung von $W\ m^{-2}$ in $MJ\ m^{-2}\ h^{-1}$ umgerechnet:

$$R_n (MJ\ m^{-2}\ h^{-1}) = \frac{R_n (W\ m^{-2})}{277,8} \quad (3-15)$$

Aerodynamischer Widerstand

In der Atmosphäre erfolgt ein vertikaler Transport von Wasserdampf, sobald horizontale Schichten mit unterschiedlichem Dampfdruck e übereinanderliegen. Der vertikale Fluss des Wasserdampfs hängt von der Dampfdruckdifferenz (Sättigungsdefizit) der beiden Schichten und dem sogenannten aerodynamischen Widerstand r_a ab, den die Luft dem Austausch entgegenstellt. Der Sättigungsdampfdruck kann beschrieben werden als:

$$VPD = e_A^* - e_A \quad (3-16)$$

Mit e_A^* = Sättigungsdruck in kPa und e_A = Dampfdruck in kPa (Allen et al. 1998).

Dies gilt in gleicher Weise für den Abtransport des verdunsteten Wassers von der Blattoberfläche in die Atmosphäre (Monteith 1965). Monteith spricht dabei vom externen Widerstand, der sich dem Abtransport des Wasserdampfs entgegen stellt und vom stomatären Widerstand zu unterscheiden ist.

Der vertikale Transport von Wasserdampf in der Atmosphäre beruht zum überwiegenden Teil auf den turbulenten Luftbewegungen. Je geringer die Luftbewegungen sind, umso langsamer kann der vertikale Austausch zwischen Schichten mit unterschiedlicher Wasserdampfkonzentration erfolgen. Im Fall einer neutralen Schichtung und eines logarithmischen Windprofils ist der aerodynamische Widerstand r_a annähernd umgekehrt proportional zur Windgeschwindigkeit. r_a

kann aus der Windgeschwindigkeit $u(z)$ in Höhe z wie folgt abgeschätzt werden (Monteith 1965; Jackson et al. 1988):

$$r_a = \frac{\left(\frac{\ln(z-d)}{z_0}\right)^2}{k^2 \cdot u(z)} \quad (3-17)$$

mit r_a = aerodynamischer Widerstand in $s \text{ m}^{-2}$, z = Referenzhöhe (Höhe der Messung) in m, d = Verschiebungshöhe in m, z_0 = Rauigkeitshöhe in m, k = Karman-Konstante, datiert mit einem Wert von 0,4 und $u(z)$ = Windgeschwindigkeit in m s^{-1} . Dabei können z_0 und d als Funktionen der Vegetationshöhe beschrieben werden (Jackson et al. 1988).

Die r_a -Berechnung nach Monteith erweist sich bei geringen Windgeschwindigkeiten als ungeeignet, da r_a bei Annäherung an $u(z) = 0$ asymptotisch ansteigt. Die Formel erweist sich darüber hinaus bei nicht neutraler Schichtung als fehlerhaft (Thom und Oliver 1977). Thom und Oliver leiten aus der Betrachtung weiterer Gesetze der oberflächennahen Grenzschicht folgende Berechnung des aerodynamischen Widerstands ab, die Jackson et al. (1988) zur Anwendung bei der Berechnung des CWSI empfehlen:

$$r_a = 4,72 \frac{\left(\frac{\ln(z-d)}{z_0}\right)^2}{1 + 0,54 u(z)} \quad (3-18)$$

Das logarithmische Windprofil

Der Luftraum unmittelbar über dem Pflanzenbestand stellt eine nicht triviale strömungsdynamische Grenzschicht dar. Würde die Luft in dieser Schicht stillstehen, könnte der vertikale Transport von sensibler und latenter Wärme ausschließlich über (langsame) molekulare Diffusionsvorgänge erfolgen (Kraus, 2008). Tatsächlich bilden sich aber über dem Bestand Turbulenzen, die in erster Linie aus dem Wind und der aerodynamischen Rauigkeit der Bestandsoberfläche, aber auch aus der Konvektion resultieren (Kraus, 2008; Monteith, 1975)

Je höher die Windgeschwindigkeit über dem Bestand und die Rauigkeit der Oberfläche sind, umso ausgeprägter sind die entstehenden Turbulenzen und umso geringer ist der aerodynamische Widerstand r_a , der sich dem vertikalen Transport der sensiblen und latenten Wärme wie auch dem O_2/CO_2 -Austausch mit der Atmosphäre entgegenstellt (Monteith, 1975). Zur Bestimmung des aerodynamischen Widerstands r_a muss zunächst die Rauigkeit der Oberfläche mit geeigneten Parametern beschrieben werden.

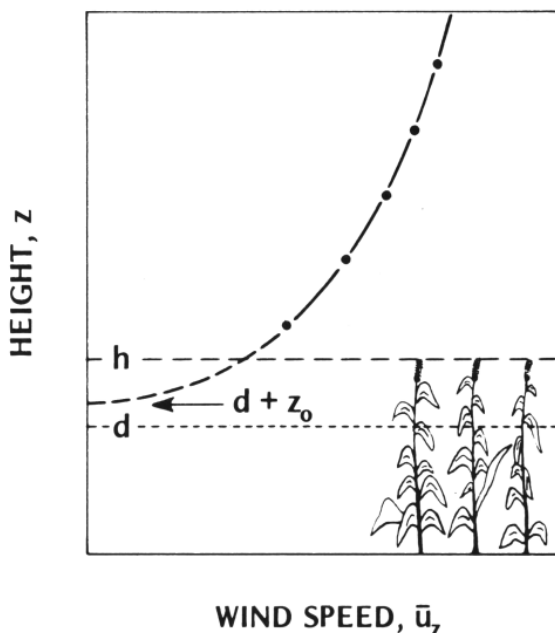
Die Windgeschwindigkeit über einer ebenen Oberfläche nimmt zu der Fläche hin ab und beträgt direkt an der Oberfläche null. Darüber hängt die Windgeschwindigkeit von der Höhe z ab und wird von der Rauigkeit der Oberfläche beeinflusst. Die bodennahe Schicht der Atmosphäre (etwa 20 m bis ca. 100 m) wird als Prandtl-Schicht bezeichnet (Oke 1987). In dieser Schicht beträgt die mittlere

vertikale Windgeschwindigkeit null und hängt die horizontale Windgeschwindigkeit u annähernd logarithmisch von der Höhe z ab. Die Rauigkeit der Oberfläche wird durch zwei Parameter beschrieben, nämlich die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die dynamische Rauigkeitslänge z_0 . Ein vorhandener Pflanzenbestand hebt den Nullpunkt der Windgeschwindigkeit um die Verdrängungshöhe d über das Bodenniveau ($z = 0$) an. Für das logarithmische Windprofil gilt (Monteith 1975, Foken 2016): Die Windgeschwindigkeit u in Höhe z beträgt:

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \cdot \ln \frac{z - d}{z_0} \quad (3-19)$$

mit $u(z)$ = Windgeschwindigkeit in der Höhe z in m s^{-1} , u_* = Schubspannungsgeschwindigkeit in m s^{-1} , k = Karman-Konstante (0,4), z = Höhe in m, d = Verschiebungshöhe in m, z_0 = Rauigkeitshöhe in m

Abbildung 3-1: Typisches Windprofil über einem Pflanzenbestand der Höhe h . Das logarithmische Windprofil erreicht die Windgeschwindigkeit 0 in der Höhe $d + z_0$ (Oke 1987).



Die dynamische Rauigkeitslänge z_0 liegt für niedriges Gras ungefähr bei 0,3 cm bis 1,0 cm und für hohes Gras bei 4 cm bis 10 cm (Oke 1987). Die Verdrängungshöhe d liegt für Vegetation der Höhe h ungefähr bei $d = 0,67 h$ (Oke 1987). Jackson et al. (1988) beziehen sich auf Monteith (1973) und geben als Faktor $d = 0,63 h$ an. Sowohl die Rauigkeitslänge z_0 als auch die Verdrängungshöhe d sind von der Windgeschwindigkeit abhängig, da die Bestandsoberfläche bei Wind ihre Gestalt

ändert (Monteith 1965; Oke 1987). Legg et al. (1981) zeigten, dass das Verhältnis von d und h während des Wachstums mit zunehmender Blattflächendichte ansteigt, und fanden mittlere Faktoren $d = 0,78 h$ und $z_0 = 0,041 h$ für Kartoffeln.

3.2.2 Verwendete Methodik und Messausstattung

Messausstattung

Die Erhebung der Messdaten im SeBeK-Projekt erfolgte in den Jahren 2017, 2018 und 2019 im Landkreis Uelzen in Nordostniedersachsen. Die Versuche fanden auf einem (2017) bzw. zwei (2018 und 2019) wechselnden Kartoffeläckern eines Landwirts in Niendorf II sowie auf den Versuchsflächen der Landwirtschaftskammer (kurz: LWK) Niedersachsen in Hamerstorf statt.

Die Messstationen auf den Praxisflächen enthielten 4 selbst entwickelte und hergestellte Infrarotthermometer auf der Basis des Sensors MLX90614 von Melexis. Sie hatten einen Öffnungswinkel von 35° und waren in 2 m Höhe mit einer Neigung von 60° zur Vertikalen auf den Bestand gerichtet. Die Sensoren waren auf einem Kreis mit einem Durchmesser von 7,50 m so verteilt und in Richtung Kreismittelpunkt ausgerichtet, dass je ein Sensor in Richtung Nord, Ost, Süd und West ausgerichtet war und alle vier Sensoren etwa denselben Bestandsausschnitt erfasst haben (Abb. 4-12). Am nördlichen Mast waren in 2 m Höhe jeweils ein Luftfeuchte- und Temperaturfühler (EE071 der Firma E+E Elektronik in einem belüfteten selbst gebauten Strahlungsschutz) und ein Luftdruckmessgerät Honeywell HSC installiert. Die Globalstrahlung wurde an einem Standort mit einem Pyranometer Hukseflux SR05 und am anderen Standort mit einem Nettoradiometer Apogee SN-500 ebenfalls in einer Höhe von 2 m gemessen. Die Windstärke wurde an einem Standort mit einem Schalenanemometer der Firma PCE-Instruments und am anderen Standort mit einem Ultraschallanemometer GILL Windsonic in 2 m Höhe gemessen.

Die Messstation in Hamerstorf beinhaltete 6 Infrarotsensoren, ebenfalls Eigenbau auf der Grundlage des Melexis MLX90614. Alle sechs Sensoren, mit einem Öffnungswinkel von 35° , waren jeweils in 2 m Höhe in Richtung Süden mit einer Neigung von 60° zur Vertikalen auf sechs verschiedene Parzellen ausgerichtet, 3 Parzellen für die Berechnungsvariante CWSI 0,5 und 3 Parzellen für CWSI 0,65. An einem Mast waren in 2 m Höhe ein Feuchte- und Temperaturfühler (EE071 der Firma E+E Elektronik in einem belüfteten selbst gebauten Strahlungsschutz) und ein Luftdruckmessgerät Honeywell HSC installiert. Die Globalstrahlung wurde mit einem Pyranometer Firma Kipp & Zonen CMP3 ebenfalls in einer Höhe von 2 m gemessen. Zur Messung der Windstärke und -richtung waren in 2 m Höhe ein Schalenanemometer und ein Windrichtungsgeber der Firma PCE-Instruments angebracht. 2018 und 2019 waren zusätzlich in je einer Parzelle jeder Bewässerungsvariante Bodenfeuchtesensoren des Modells Sentek EnviroScan mit 6 Messstellen in 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 50 cm und 60 cm Bodentiefe eingebaut. Da noch keine Erkenntnisse zum richtigen Einbauort von Bodenfeuchtesensoren in Kartoffeldämmen vorlagen, wurden diese 2018 im Tal und 2019 auf der Krone der Dämme eingebaut, was entsprechende Unterschiede der Ergebnisse zur Folge hatte.

Abbildung 3-2: Aufbau der Messstationen im SeBeK-Versuch: In Reihe aufgebaute Sensorik am Standort Hamerstorf (oben), ausgestattet mit sechs zum Bestand ausgerichteten Infrarotsensoren und meteorologischen Messgeräten. Unteres Foto: kreisförmiger Messaufbau am Standort Niendorf II, ausgestattet mit vier schräg und einem senkrecht zum Bestand ausgerichteten Infrarotsensoren sowie meteorologischen Messgeräten. Fotos: Thünen-Institut (2018; 2019).



Detaillierte Standortbeschreibungen und Details zur Messausstattung an den beiden Standorten Niendorf II und Hamerstorf sind *Kapitel 4.1 und 4.2* zu entnehmen.

Methodik der CWSI-Berechnung

Zur Berechnung des CWSI wurde Gleichung (3-7) und ausführende Gleichungen verwendet. Weitere bedeutende Einflussgrößen und deren Berechnung wurden bereits in Kapitel 3.2.1 beschrieben.

3.3 Ergebnisse, Auswertung und Weiterentwicklung der Methode

3.3.1 Berechnung des Crop Water Stress Index

Da im Versuchsjahr 2017 sehr nasse und vergleichsweise kalte Witterungsbedingungen herrschten (vgl. Kapitel 4.2) konnte kein Trockenstress bei den Pflanzen gemessen werden, weshalb der CWSI nicht erfolgreich berechnet werden konnte.

In den Versuchsjahren 2018 und 2019 lagen gute klimatische Bedingungen für die Messung von Trockenstress bei Pflanzen vor, da die Witterungsbedingungen sehr trocken und heiß waren. Der CWSI konnte für die Messdaten aus 2018 und 2019 erfolgreich berechnet werden. In den Abbildungen 3-3 bis 3-6 sind für die Standorte Niendorf und Hamerstorf die berechneten CWSI-Werte dargestellt. Für alle Standorte und Versuchsjahre wird ein Zeitraum dargestellt, in dem die Vegetationsdecke geschlossen war, heiße und trockene Witterungsbedingungen sowie klare Strahlungsverhältnisse vorlagen. Aufgrund der gegebenen Bedingungen könnten die berechneten Indexwerte für diese Zeiträume als belastbar angesehen werden.

Abbildung 3-3: Errechneter CWSI für den Standort "Niendorf groß" beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 30.06 bis 07.07.2018. Die blauen Pfeile stellen ein Beregnungsereignis dar (29.06 und 08.07.2018).

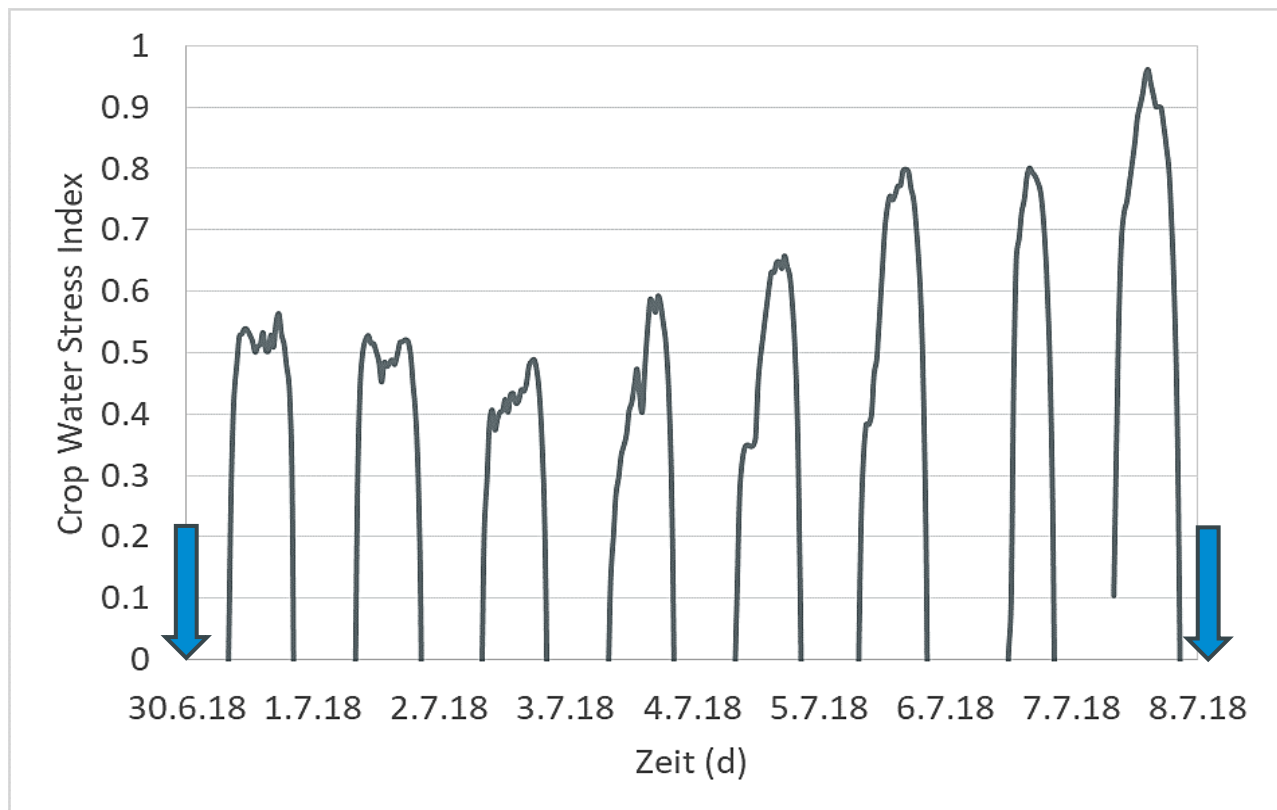
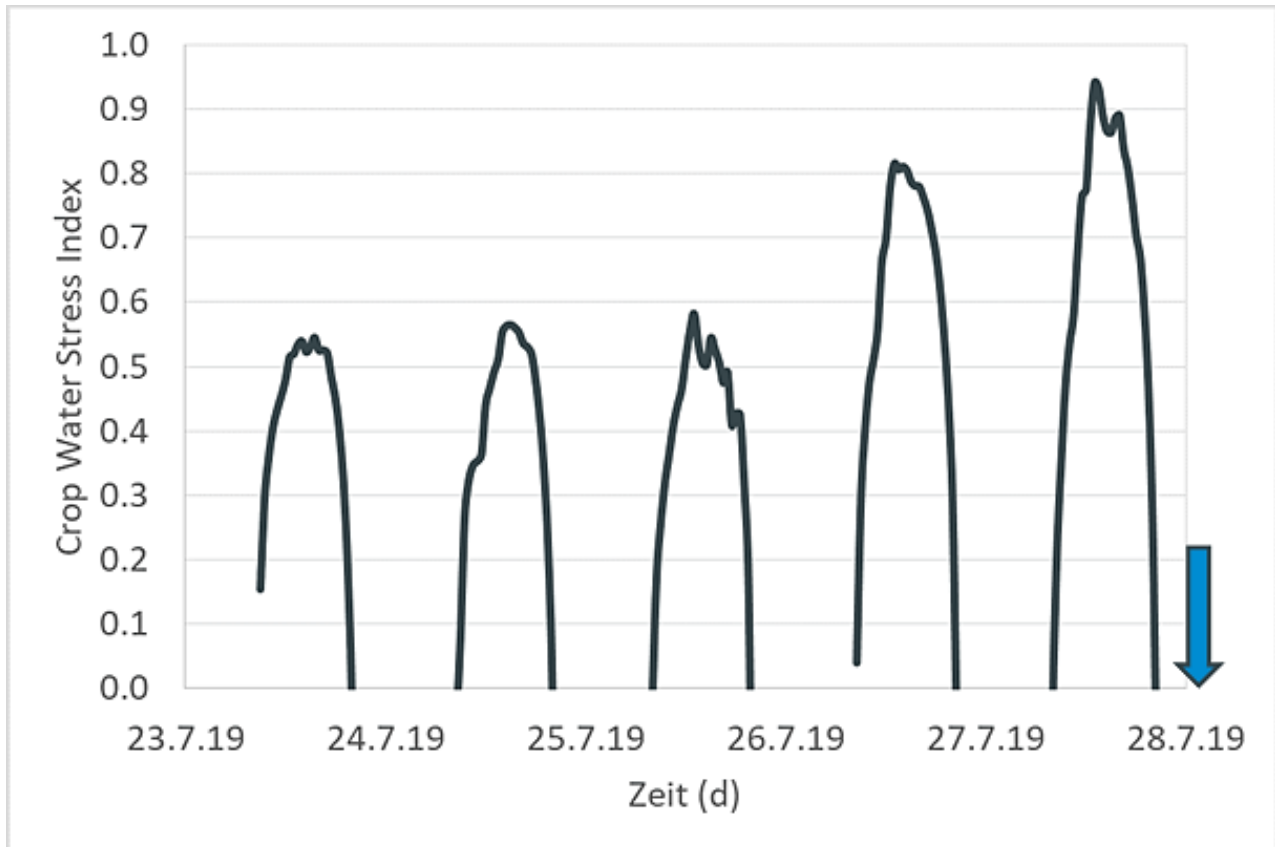


Abbildung 3-3 zeigt den CWSI für den Standort Niendorf II ab dem 30.06.2018, einen Tag nachdem die Kartoffeln mit einer Beregnungsgabe von ca. 25 mm beregnet wurden. Es wird ersichtlich, dass der CWSI über einen Zeitraum von drei Tagen weiter absank. Anschließend stieg der CWSI erneut an bis er einen Wert von nahezu 1 erreichte, woraufhin die Kartoffeln am Folgetag (08.07.2018) erneut mit einer Beregnungsgabe von ca. 25 mm beregnet wurden.

Abbildung 3-4: Errechneter CWSI für den Standort "Niendorf groß" beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 23. bis 27.07.2019. Der blaue Pfeil stellt ein Beregnungsereignis dar (28.07.2019).



Der für das Versuchsjahr 2019 am Standort Niendorf II berechnete CWSI ist in Abbildung 3-4 beispielhaft für den Zeitraum vom 23. bis zum 27.07.2019 dargestellt. Der abgebildete Zeitraum zeichnete sich durch eine kurze Periode besonders heißer und trockener Tage mit Temperaturen über 30 °C aus. Anhand der Abbildung wird ersichtlich, dass der CWSI zunächst über die ersten dargestellten Tage relativ gleichblieb und am vierten Tag sprunghaft anstieg, von einem Wert von ca. 0,6 auf 0,8. Aufgrund dieses Verlaufes ist anzunehmen, dass ab dem 26.07.2019 die Wasserverfügbarkeit aufgrund der hohen Verdunstung, verursacht durch die anhaltenden, heißen Temperaturen, stark abgenommen hatte, sodass die Transpirationsrate der Pflanze verringert wurde und die Blätter nicht mehr ausreichend gekühlt werden konnten. Am 27.07.2019 waren die Kartoffelpflanzen bereits starkem Trockenstress ausgesetzt und erreichten einen Wert von nahezu 1, weshalb die Pflanzen am Folgetag (28.07.2019) mit einer Beregnungsgabe von ca. 25 mm beregnet wurden.

Die Abbildungen 3-5 und 3-6 zeigen den errechneten CWSI-Werte für den Standort Hamerstorf für die Versuchsjahre 2018 und 2019. Abbildung 3-5 zeigt den berechneten CWSI für einen Zeitraum, in dem die reduzierte und die optimale Variante beregnet wurden und ein Niederschlagsereignis auftrat. Die optimale Variante (blaue Linie) wurde am 19.07.2018 beregnet. Aus der Abbildung wird

ersichtlich, dass der CWSI noch zwei weitere Tage nach der Beregnung auf einen Wert von ca. 0,35 absank, ab dem dritten Tag erneut anstieg und am 25.07.2018 ein Maximum von ca. 0,75 erreichte. Am Folgetag (26.07.2018) wurde die optimale Variante mit einer Beregnungsgabe von etwa 30 mm beregnet, wodurch der CWSI am Folgetag (27.07.2018) erneut absank und einen Wert von ca. 0,4 erreichte. Die reduzierte Bewässerungsvariante (grüne Linie) wurde am 23.07.2018 beregnet, nachdem der CWSI zuvor einen Wert von etwa 0,7 (22.07.2018) erreichte. Auch hier sank der CWSI über zwei weitere Tage nach der Beregnung weiter auf einen Wert von etwa 0,3 ab. Am 28.07.2018 wurde ein Niederschlagsereignis von 10 mm verzeichnet. Es ist zu erkennen, dass der CWSI der reduzierten Variante durch das Niederschlagsereignis stärker beeinflusst wurde, da der Index von ca. 0,55 (27.07.2018) auf 0,45 am Folgetag absank. Für die optimale Beregnungsvariante war der CWSI am Tag vor und nach dem Niederschlagsereignis nahezu unverändert. Dies lässt vermuten, dass die Pflanzen in der optimalen Variante durch die Beregnung am 26.07.2019 bereits ausreichend mit Wasser versorgt waren, sodass das Niederschlagsereignis von 10 mm nur einen geringen Einfluss auf die Transpiration der Pflanze und somit den CWSI hatte.

Abbildung 3-5: Errechneter CWSI am Standort Hamerstorf beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 20. bis 29.07.2018. Der blaue Pfeil zeigt eine Bewässerung an: am 23.07.2018 wurde die reduzierte Variante beregnet, am 26.07.2018 die optimale Variante. Der dunkelgraue Pfeil zeigt ein Niederschlagsereignis (28.07.2018) an.

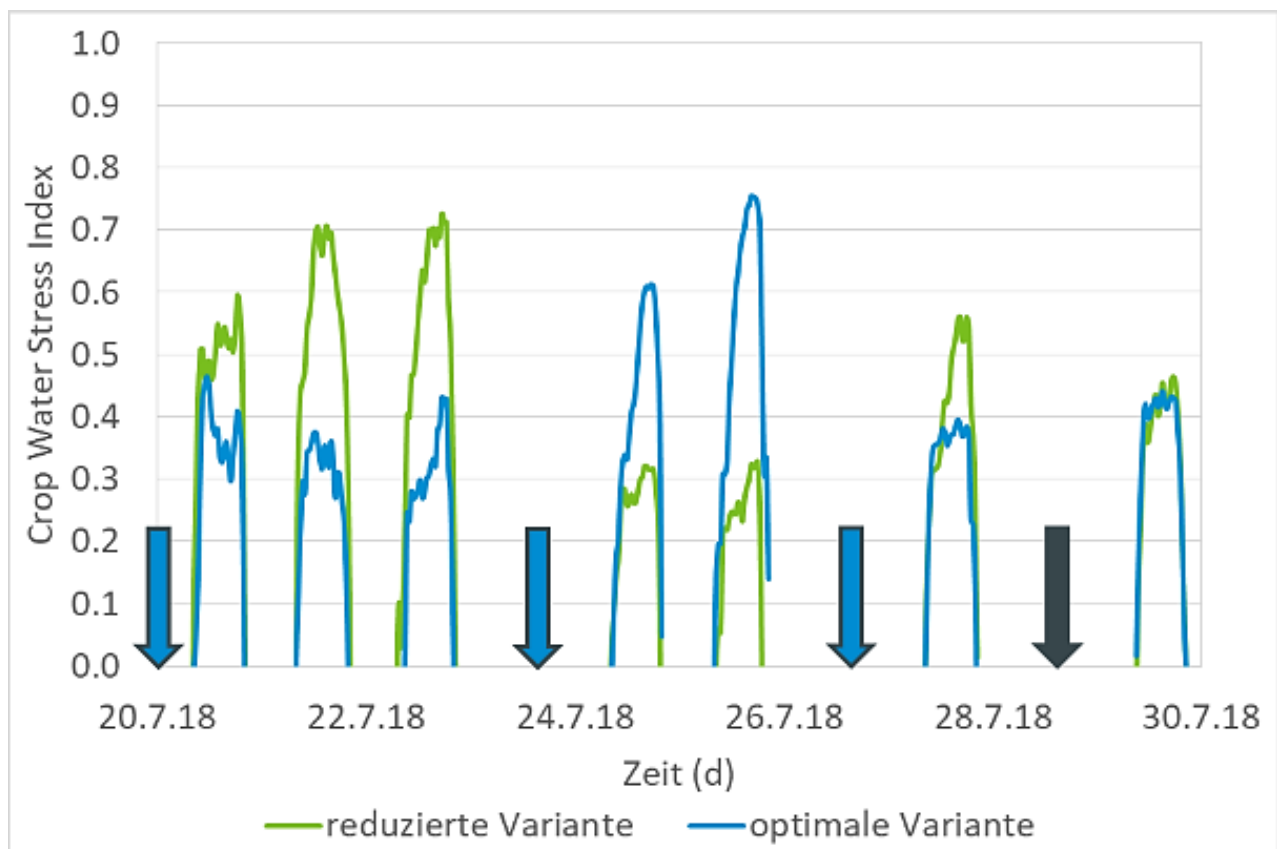


Abbildung 3-6: Errechneter CWSI für den Standort Hamerstorf beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 23. bis 28.07.2019. Die blauen Pfeile stellen ein Beregnungsereignis dar. Am 26.7.2019 wurde die reduzierte Variante im Rahmen des SeBeK-Versuches (nach CWSI) beregnet. Am 25.07.2019 wurde die optimale Variante, jedoch nicht im SeBeK-Versuch, beregnet, d.h. die Beregnung erfolgte auf anderen Parzellen. Da die Messsensorik jedoch für auch für die Beregnungen, die nicht im Rahmen dieses Versuches stattfanden, umgekippt werden musste, sind für diesen Tag keine Daten verfügbar.

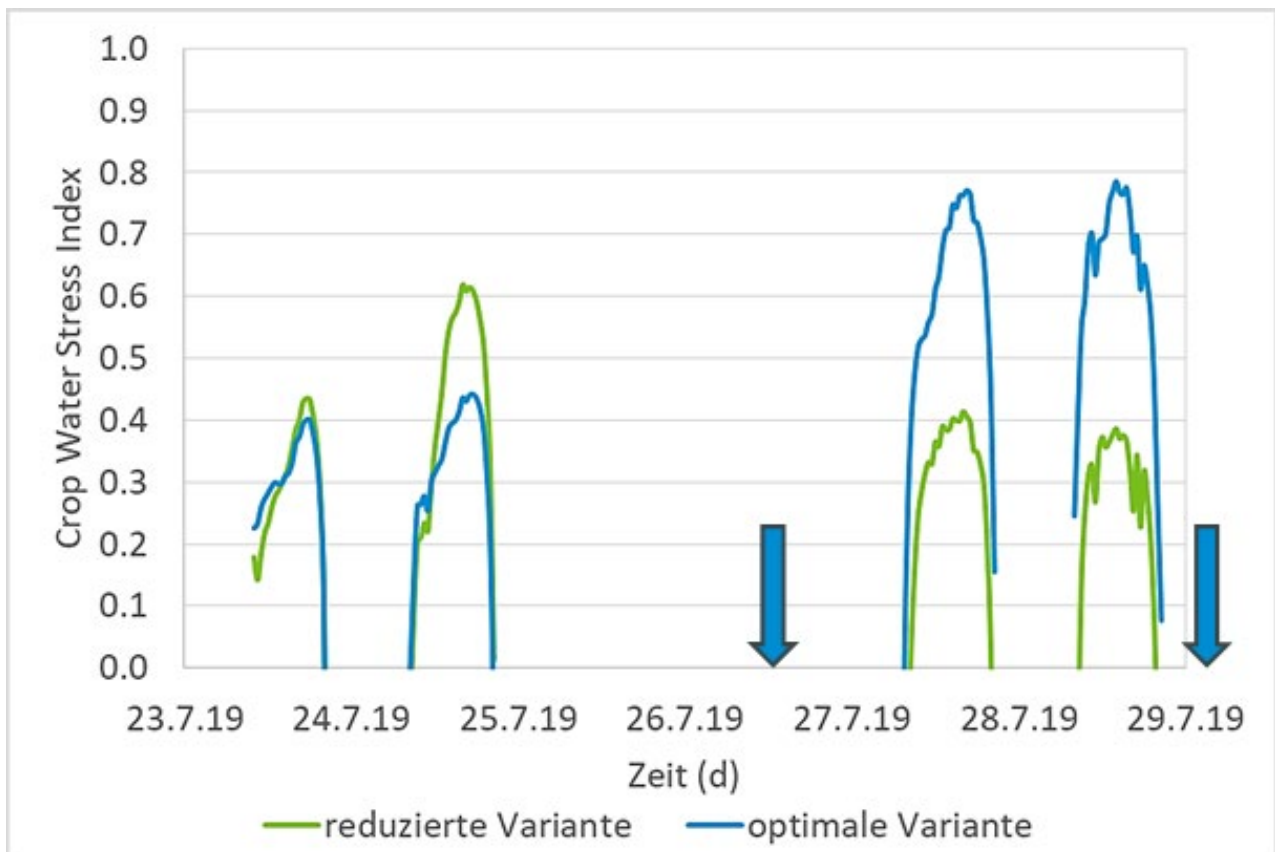


Abbildung 3-6 zeigt den CWSI für den Standort Hamerstorf im Versuchsjahr 2019. Die optimale Variante (blaue Linie) wurde zuletzt am 18.07.2019 beregnet, während die reduzierte Variante zuletzt am 01.07.2019 beregnet wurde. Weiterhin kam es am 13.07 und am 20.07.2019 zu Niederschlagsereignissen von 21,4 mm und 15,2 mm und zu weiteren kleineren Niederschlagsereignissen < 1 mm. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass die optimale Variante besser mit Wasser versorgt ist als die reduzierte Variante, da der CWSI am 24.07.2019 bei ca. 0,45 liegt, während die reduzierte Variante bei ca. 0,60 liegt. Am 26.07.2019 wurde die reduzierte Variante beregnet, wodurch der CWSI auf einen Wert von 0,4 absinkt. Aufgrund der sehr heißen Bedingungen im dargestellten Zeitraum steigt der CWSI in der optimalen Variante stark bis zum

27.07.2019 auf einen Wert von ca. 0,75 an, woraufhin die optimale Variante am Folgetag beregnet wurde.

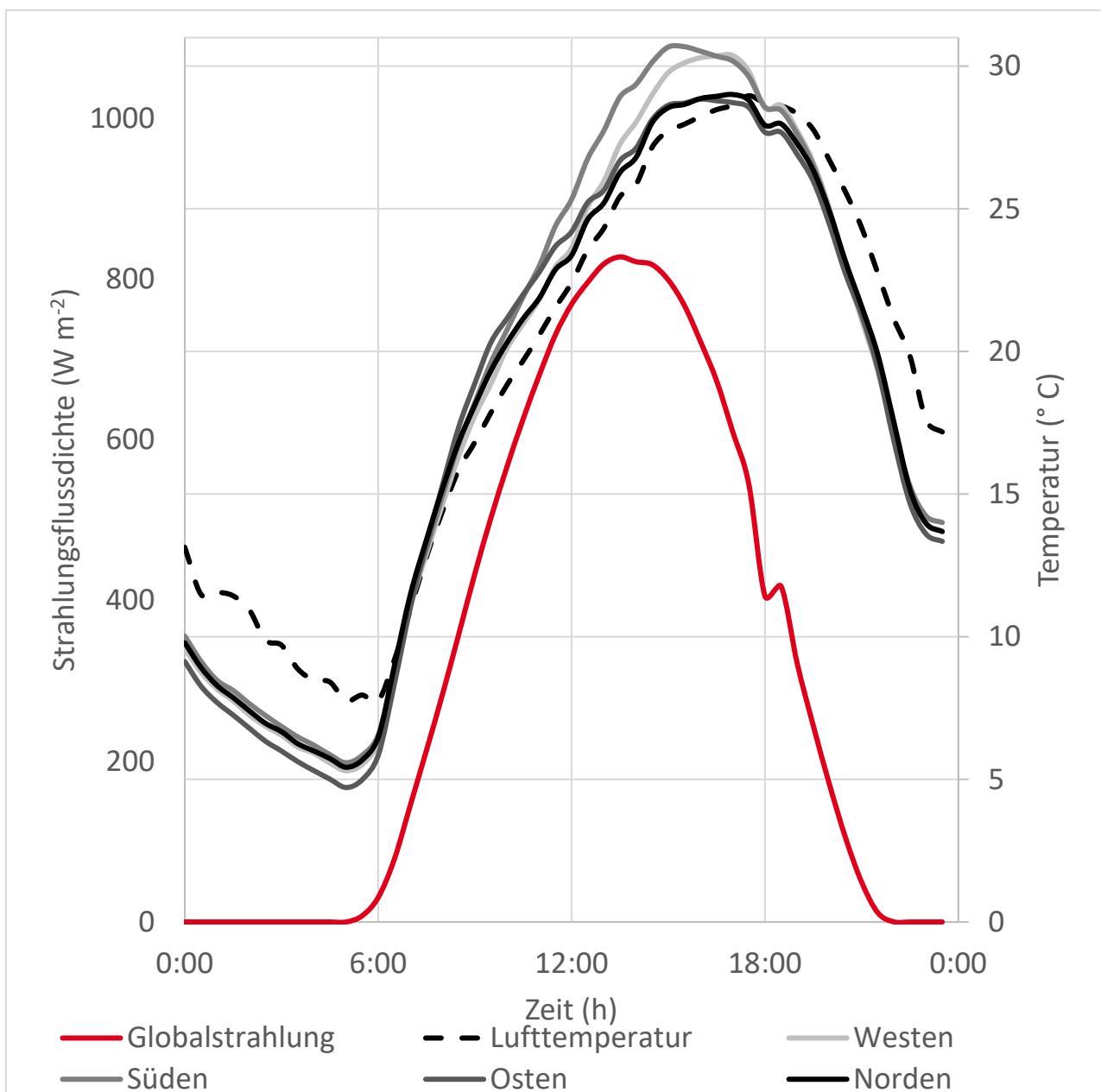
Für die Versuchsjahre 2018 und 2019 zeigt der CWSI insbesondere an Tagen mit klaren Witterungsbedingungen plausible und belastbare Ergebnisse. Angelehnt an Ergebnisse aus Erdem et al. (2005b) zur Bewässerung von Wassermelonen in der Türkei wurden zwei Berechnungsschwellen für die Beregnung der Versuchspartzellen in Hamerstorf auf einen CWSI von 0,5 bei der optimalen Variante und 0,65 bei der reduzierten Variante vor Versuchsbeginn festgelegt. Die Betrachtung des zeitlichen Verlaufes der berechneten CWSI-Ergebnisse zeigte, dass die beiden Varianten etwa zwei Tage vor der tatsächlichen Beregnung den zuvor festgelegten Beregnungsschwellen entsprachen. Aufgrund dessen können die festgelegten Beregnungsschwellen als sinnvoll erachtet werden. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass anhand der CWSI-Indexwerte ähnliche Aussagen bezüglich des Wasserversorgungszustands der Kartoffeln getroffen werden konnten wie anhand der Bodenfeuchtwerte (nFK), auf deren Basis die Beregnungsentscheidungen am Standort Hamerstorf getroffen wurden. Auch für den Praxisbetrieb (Standort „Niendorf groß“) können die berechneten Ergebnisse als belastbar angesehen werden. Für diesen Standort wurden zuvor keine Beregnungsschwellen festgelegt, allerdings konnte bei Betrachtung der zeitlichen Verläufe ein durchschnittlicher CWSI von 0,70 bis 0,75 zwei Tage vor der tatsächlichen Beregnung beobachtet werden. Anhand der Ergebnisse kann darauf geschlossen werden, dass nach Erreichen der festgelegten bzw. als sinnvoll erachteten Beregnungsschwellen die Kartoffeln innerhalb der nächsten ein bis zwei Tage beregnet werden sollten.

Dennoch muss beachtet werden, dass bei der Berechnung des CWSI nur unter bestimmten Voraussetzungen belastbare Ergebnisse erzielt werden können. Bereits vorausgegangene Studien zeigten, dass die Berechnung des CWSI unter Bewölkung und wechselhaften Bedingungen eine Herausforderung darstellt, da der CWSI stark von der einfallenden (Global-)Strahlung abhängig ist (Idso et al. 1981). Dieser Zusammenhang konnte auch in dieser Studie festgestellt werden. Ein Vergleich des zeitlichen Verlaufs der einfallenden Globalstrahlung mit dem des berechneten CWSI zeigte, dass an Tagen mit schwankender Strahlungsintensität der CWSI analog zu der Globalstrahlung verlief. Weiterhin konnte anhand der ausgewerteten Daten festgestellt werden, dass die Sichtbarkeit von blankem Boden den CWSI deutlich nach oben hin abfälschen kann. Anhand von Thermografieaufnahmen der einzelnen Parzellen im Rahmen des Versuches konnte gezeigt werden, dass der Boden sich bei starker Sonneneinstrahlung und geringer Wasserverfügbarkeit in Folge anhaltender Hitze und Trockenheit im Vergleich zu den Pflanzenblättern stark erhitzen kann. Durch diese Gegebenheit wird die Relevanz einer geschlossenen Bestandsdecke für eine belastbare CWSI-Berechnung deutlich. Weiterhin wird angenommen, dass zu Zeitpunkten, an denen die Blattoberfläche mit Wasser benetzt ist, kein CWSI berechnet werden kann, da der Effekt der Verdunstungskühlung der Pflanze über die Blattoberfläche aufgrund des Wassers vernachlässigbar ist.

3.3.2 Abhängigkeit der Bestandstemperatur vom Sonnenstand

Da die Bestandtemperatur an zwei der drei Messstationen in einem kreisförmigen Messaufbau ausgehend von vier Positionen gemessen wurde (vgl. Kapitel 3.2.2), konnte beobachtet werden, dass diese vom Stand der Sonne beeinflusst wurde. Abbildung 3-7 zeigt den Tagesverlauf der Bestandtemperatur an einem sonnigen Tag für die vier Positionen der Infrarotsensoren (Norden, Süden, Osten, Westen).

Abbildung 3-7: Temperaturverlauf der Bestandtemperatur an allen vier Positionen (Norden, Süden, Osten, Westen) an der großen Messstation in Niendorf II, dargestellt für einen sonnigen Tag (04. Juli 2018). Zusätzlich ist die einfallende Globalstrahlung ($K\downarrow$) dargestellt.



An den vier Temperaturverläufen lässt sich die Sonnenlaufbahn erkennen: Mit dem Sonnenaufgang im Osten misst der östliche Sensor am Morgen die wärmsten Temperaturen. Mit dem Sonnenhöchststand im Süden gegen Mittag steigen die Temperaturen des südlichen Sensors an und überschreiten die Temperaturen der anderen Sensoren, während die Temperatur des östlichen Sensors wieder absinkt. Gegen späten Nachmittag bis Abend wandert die Sonne gen Westen, wodurch die Temperatur des westlichen Sensors ansteigt und die höchste Bestandstemperatur erreicht. Es zeigt sich, dass durch den Stand der Sonne Temperaturdifferenzen von bis zu 2 °C zwischen den Sensoren im Tagesverlauf entstehen können. Diese Abhängigkeit der Bestandstemperatur zur Himmelsrichtung impliziert, dass die Ausrichtung des Messensors in der praktischen Anwendung eine Beeinflussung und ggf. Verfälschung des CWSI hervorrufen könnte. Da sich in der Auswertung der Daten gezeigt hat, dass bereits geringe Temperaturabweichungen von wenigen Grad Verfälschungen in der Index-Berechnung verursachen können, ist es wichtig, den Einfluss des Sonnenstandes auf die Bestandstemperatur zu evaluieren.

Dazu wurden die Abweichungen der einzelnen Positionen vom Mittelwert der vier Ausrichtungen für alle 30 Minuten berechnet unter der Annahme, dass der Mittelwert aller Sensoren annäherungsweise der unbeeinflussten Bestandstemperatur entspricht. Für Zeitpunkte an denen die einfallende Globalstrahlung $< 200 \text{ W m}^{-2}$ war und/oder die relative Luftfeuchtigkeit 85 % überschritt, wurden keine Abweichungen berechnet. Diese Eingrenzung der Daten wurde vorgenommen, da angenommen werden kann, dass bei einer einfallenden Globalstrahlung von weniger als 200 W m^{-2} die Strahlungsintensität so gering ist, dass die Bestandstemperatur nicht vom Stand der Sonne beeinflusst wird. Zeitpunkte mit einer Luftfeuchtigkeit $> 85 \%$ wurden ausgeschlossen, da angenommen wurde, dass bei einer hohen Luftfeuchtigkeit die Transpiration der Pflanze und dadurch die Kühlung beeinflusst wird, weshalb die gemessenen Bestandstemperaturdaten dadurch nicht belastbar sind. Weiterhin wurden Tage, an denen beregnet wurde oder an denen die Niederschlagssumme $> 1,0 \text{ mm}$ betrug, nicht miteinbezogen, da die nasse Oberfläche der Blätter die Temperaturmessung verfälschen kann. Aus den berechneten halbstündigen Abweichungen wurden die halbstündigen Mittelwerte über die Periode mit geschlossener Vegetationsdecke berechnet. Für die Berechnung wurde einzig der Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke verwendet, da in diesem Zeitraum weitestgehend sichergestellt werden kann, dass wenig bis gar kein Boden im Messbereich des Sensors sichtbar war, der die Messung der Bestandstemperatur verfälschen konnte. In Abbildung 3-8 ist die korrigierte Bestandstemperatur gegen die originalen Messwerte für einen Tag mit klaren Strahlungsbedingungen für alle vier Himmelsrichtungen dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die Temperaturen der Messensoren aus westlicher und südlicher Richtung nach unten korrigiert werden, während der nördliche und östliche Sensor nach oben korrigiert werden.

Abbildung 3-8: Vergleich der gemessenen Bestandstemperatur mit dem korrigierten Wert für alle vier Himmelsrichtungen, beispielhaft dargestellt für den 04. Juli 2018, ein warmer Tag mit klaren Strahlungsverhältnissen.

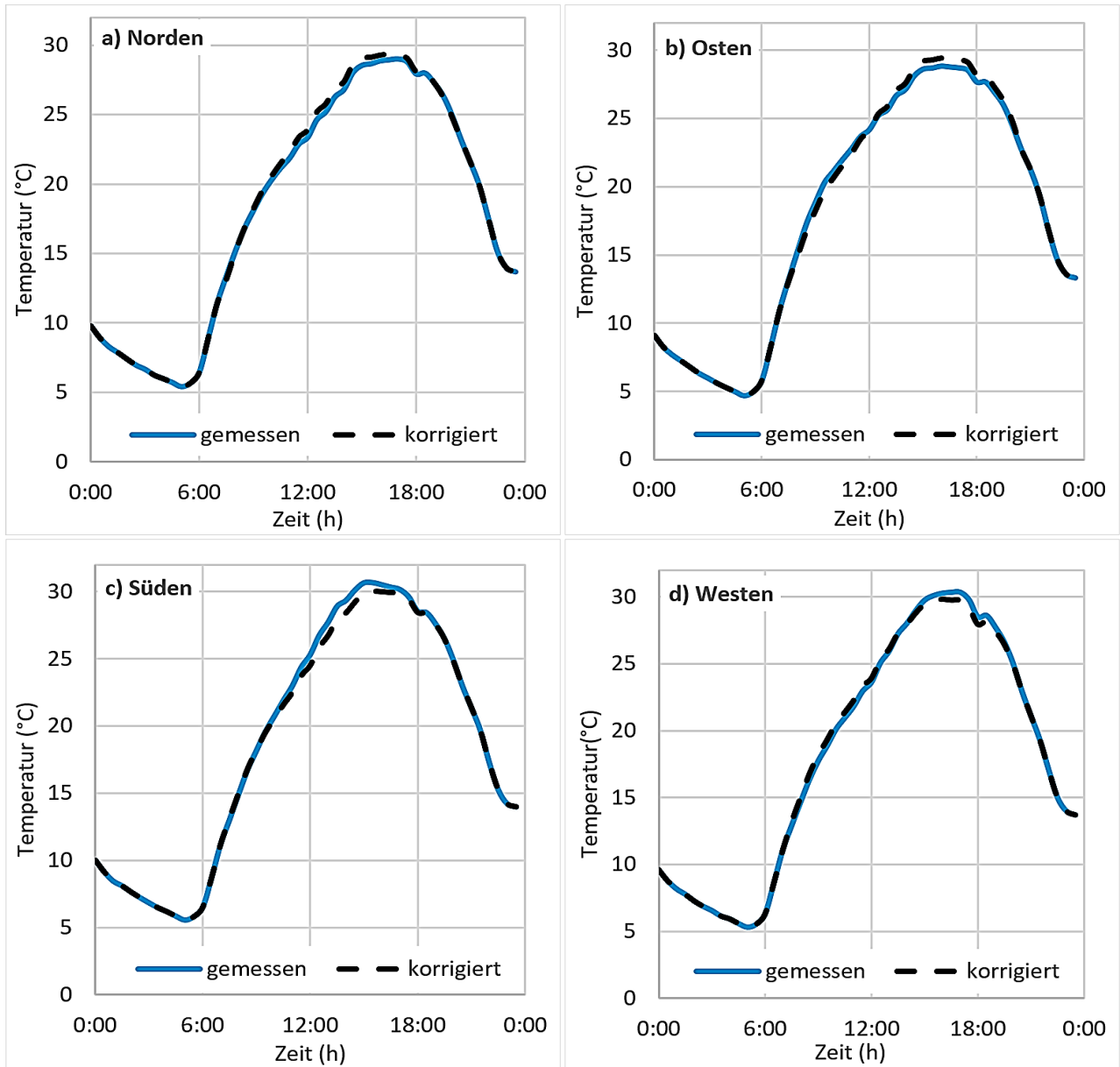


Tabelle 3-1: Gemittelter Korrekturwert, berechnet für die Speisekartoffeln für die Jahre 2018 und 2019.

Uhrzeit	2018				2019			
	Norden	Osten	Süden	Westen	Norden	Osten	Süden	Westen
07:30:00	-0.08	0.94	-0.29	-0.57			0.10	
08:00:00	-0.11	1.14	-0.30	-0.73	-0.04	0.07	-0.07	0.06
08:30:00	-0.25	1.36	-0.26	-0.85	-0.11	0.26	-0.02	-0.05
09:00:00	-0.32	1.55	-0.23	-1.00	-0.13	0.31	-0.01	-0.14
09:30:00	-0.39	1.51	-0.12	-1.00	-0.17	0.34	0.05	-0.20
10:00:00	-0.42	1.34	-0.04	-0.88	-0.25	0.41	0.12	-0.26
10:30:00	-0.49	1.28	0.07	-0.87	-0.25	0.33	0.19	-0.26
11:00:00	-0.54	1.15	0.22	-0.82	-0.27	0.28	0.27	-0.27
11:30:00	-0.58	0.92	0.34	-0.69	-0.31	0.25	0.35	-0.30
12:00:00	-0.60	0.75	0.42	-0.58	-0.32	0.11	0.44	-0.25
12:30:00	-0.61	0.60	0.48	-0.48	-0.35	0.05	0.51	-0.22
13:00:00	-0.63	0.48	0.55	-0.39	-0.38	-0.01	0.57	-0.18
13:30:00	-0.62	0.34	0.55	-0.26	-0.35	-0.07	0.50	-0.09
14:00:00	-0.60	0.23	0.53	-0.17	-0.36	-0.14	0.50	-0.01
14:30:00	-0.63	0.13	0.51	-0.02	-0.41	-0.17	0.50	0.09
15:00:00	-0.60	0.03	0.44	0.13	-0.42	-0.22	0.41	0.22
15:30:00	-0.60	-0.07	0.38	0.29	-0.35	-0.25	0.29	0.31
16:00:00	-0.53	-0.09	0.26	0.35	-0.30	-0.25	0.17	0.37
16:30:00	-0.51	-0.12	0.21	0.42	-0.30	-0.22	0.07	0.46
17:00:00	-0.45	-0.12	0.15	0.42	-0.22	-0.20	0.00	0.42
17:30:00	-0.41	-0.10	0.12	0.39	-0.15	-0.19	-0.05	0.39
18:00:00	-0.39	-0.09	0.10	0.38	-0.20	-0.18	-0.17	0.55
18:30:00	-0.33	0.00	0.10	0.23	-0.17	-0.17	-0.20	0.54
19:00:00	-0.28	0.07	0.10	0.11	-0.11	-0.14	-0.19	0.44
19:30:00	-0.23	0.17	0.15	-0.09	-0.09	-0.06	-0.22	0.37
20:00:00	-0.22	0.24	0.11	-0.13				

Da für Globalstrahlungswerte $< 200 \text{ W m}^{-2}$ keine Werte ermittelt wurden, werden keine Korrekturwerte für die Nacht- und Morgenstunden angegeben. Die Faktoren ergeben sich aus dem Mittelwert der berechneten, halbstündigen Korrekturen über die gesamte Vegetationsperiode.

3.3.3 Korrelation zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und CWSI

Die Korrelation zwischen der gemessenen Bodenfeuchte und dem errechneten CWSI für die Versuchsjahre 2018 und 2019 zeigen die Abbildung 3-9 und Abbildung 3-10. Dargestellt sind die halbstündigen Mittelwerte zwischen 14 und 16 Uhr für den Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke. Ausgeschlossen sind Tage, an denen geregnet wurde oder Niederschlag (≥ 1 mm) fiel.

Abbildung 3-9: Korrelation zwischen dem mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt (Mittelwert aus sechs Tiefen (10 bis 60 cm)) und dem errechneten CWSI für die mit der Bodenfeuchtesonde ausgestatteten Parzelle (je eine optimal und reduziert bewässert). Dargestellt sind die Mittelwerte der zwei Stunden von 14 bis 16 Uhr für den Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke (12.7. bis 08.08.2018), ausgenommen sind Tage mit Beregnungs- oder Niederschlagsereignissen (≥ 1 mm).

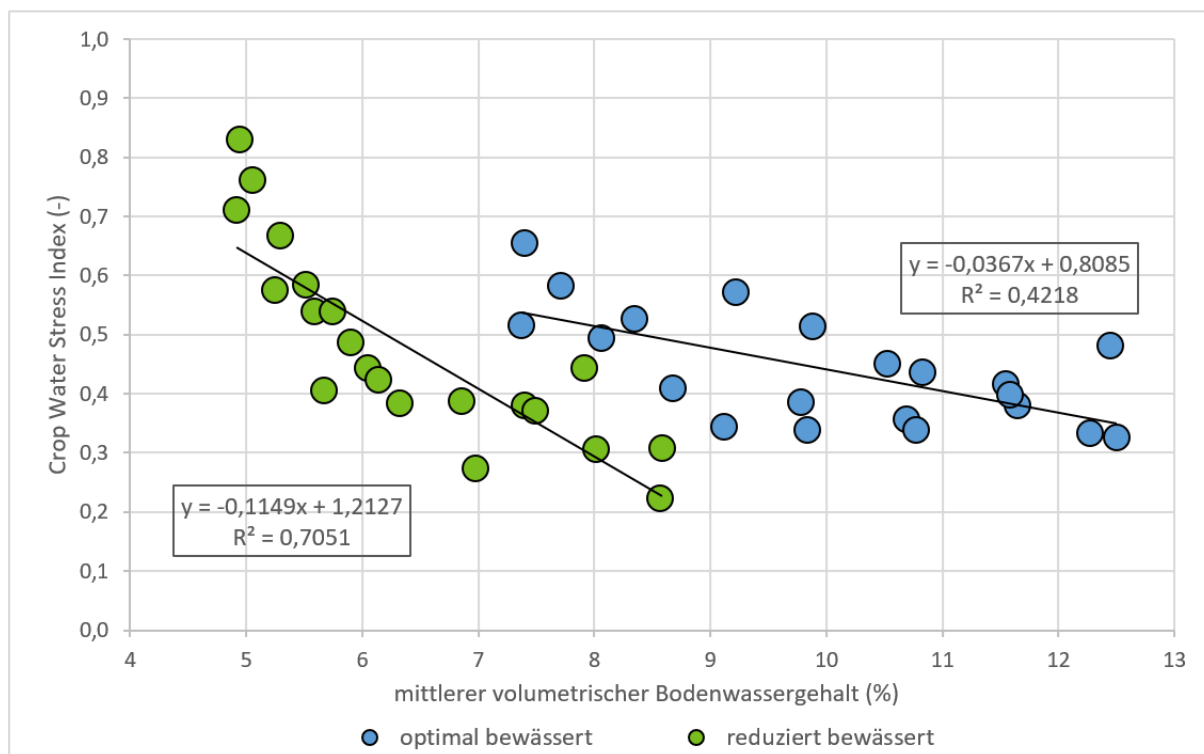
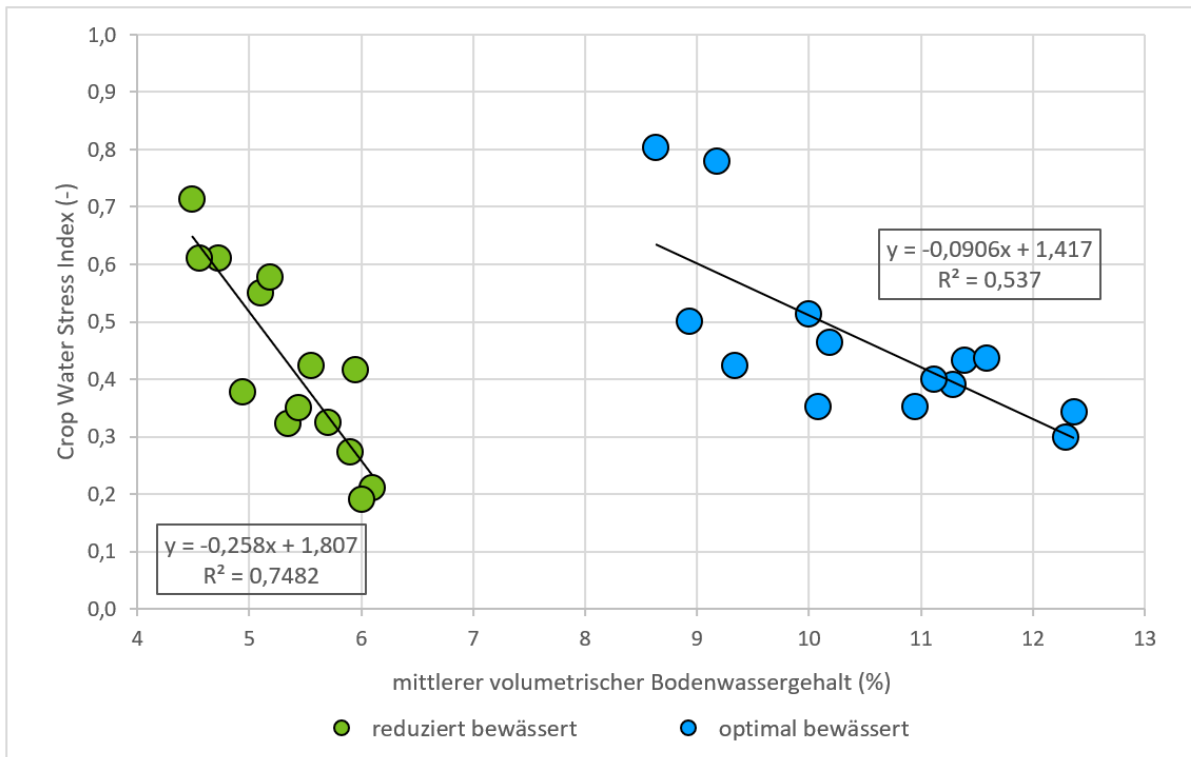


Abbildung 3-10: Korrelation zwischen dem mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt (Mittelwert aus sechs Tiefen (10 bis 60 cm)) und dem errechneten CWSI für die mit der Bodenfeuchtesonde ausgestatteten Parzelle (je eine optimal und reduziert bewässert). Dargestellt sind die Mittelwerte der zwei Stunden von 14 bis 16 Uhr für den Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke (1. bis 31.07.2019), ausgenommen sind Tage mit Beregnungs- oder Niederschlagsereignissen (≥ 1 mm).



Die einzelnen Parzellen mit unterschiedlicher Bewässerungsintensität zeigen in beiden Jahren eine relativ gute, wenn auch nicht sehr enge Korrelation zwischen dem CWSI-Wert und der volumetrischen Bodenfeuchte. Die Höhe des Bestimmtheitsmaßes liegt in der optimalen Variante bei 0,42 (2018) und 0,54 (2019) und in der reduzierten Variante bei 0,71 (2018) und 0,75 (2019). Bei zunehmender Bodenfeuchte verringert sich der CWSI, also der Trockenstress der Pflanzen. Diese negative Korrelation konnte auch Wittern (2018) in einem Experiment in Peru zeigen. Der kausale Zusammenhang zwischen den Variablen ergibt sich daraus, dass ein Kühleffekt durch Transpiration nur dann erfolgen kann, wenn die Pflanzen eine ausreichende Wassermenge aus dem Boden aufnehmen können, wenn also genug pflanzenverfügbares Wasser im Boden vorhanden ist. Der berechnete CWSI ist jedoch nicht einzig von der Bodenfeuchte abhängig, sondern wird durch weitere Faktoren, die in Kapitel 3.2 beschrieben sind, beeinflusst.

Im Vergleich mit der reduzierten Bewässerung ist der von der Bodenfeuchte unabhängige Teil der Variabilität der CWSI-Werte auf den Parzellen mit optimaler Bewässerung stärker ausgeprägt, weshalb das Bestimmtheitsmaß hier in beiden Jahren deutlich niedriger ist. Bei der optimalen

Bewässerung lag die Bodenfeuchte, bezogen auf die nutzbare Feldkapazität (nFK), meistens zwischen 50 % der nFK (8 Vol.%, bei Beginn der Beregnung) und 90 % (12,5 Vol.%, bei Beregnungsende). 2019 lagen die volumetrischen Bodenfeuchtwerte, bedingt durch eine andere Lage der Parzelle und einen anderen Messpunkt, zwischen 9 und 12,5 Vol.%. In diesem Bereich ist das Wasser für die Pflanzen leicht verfügbar, sodass die Transpiration auch bei einem hohen Verdunstungsanspruch der Atmosphäre weitgehend aufrechterhalten werden kann. Die Wasserverfügbarkeit nimmt mit zunehmender Austrocknung bis zur Bewässerungsgrenze bei 50 % der nFK nur wenig ab, was der flache Kurvenverlauf zeigt. Andere Faktoren haben daher in diesem Bereich einen stärkeren Einfluss auf den CWSI als bei geringer Bodenfeuchte. Bei niedriger Verdunstungsintensität (niedrige Werte für Temperatur, Einstrahlung, Wind und hohe Luftfeuchtigkeit) ist der Trockenstress auch bei relativ wenig pflanzenverfügbarem Wasser gering. Sobald der atmosphärische Verdunstungsanspruch zunimmt, erhöht sich die Transpiration. Nach andauernder starker Verdunstung kann der Saftfluss der Pflanze nicht aufrechterhalten werden. Insbesondere in sandigen Böden ist die kapillare Nachlieferung im wurzelnahen Bodenraum nicht mehr ausreichend. Der CWSI steigt an, obwohl der Bodenwassergehalt sich kaum messbar ändert. Erkennbar ist dieser Effekt in Tabelle 3-2 und 3-3 am 17. und 18. Juli 2018 sowie am 4. und 5. Juli 2019: hier wurde jeweils bei zweitägiger niedriger einfallender Globalstrahlung ein niedriger CWSI gemessen, obwohl kein Niederschlagsereignis auftrat oder eine Beregnung erfolgte. Dieser Effekt ist in beiden Jahren mit optimaler Bewässerung bei einer Bodenfeuchte zwischen 9 und 10 Vol.% zu sehen und zeigt sich durch eine größere Streuung der CWSI-Werte (vgl. Abb. 3.9 und 3.10). Ebenso kann ein gleichwertiger CWSI-Wert bei unterschiedlicher Bodenfeuchte auftreten, wenn der Verdunstungsanspruch der Atmosphäre bei hoher Bodenfeuchte hoch und bei mittlerer Bodenfeuchte gering ist. Auch das ist bei optimaler Bewässerung in beiden Jahren gut zu erkennen. Der Zusammenhang zwischen den berechneten CWSI-Werten und der Witterung bzw. der Globalstrahlung wird in Kapitel 4.1.4.2. beschrieben. Die einzelnen Werte sind den Tabellen 4.11. und 4.12 zu entnehmen. Weitere Einflussgrößen sind z.B. der Zustand der Blätter oder die Dichte des Pflanzenbestandes sowie die Sichtbarkeit von unbedecktem Boden, worauf in Kapitel 3.3.1. bereits hingewiesen wurde. Diese Faktoren können sich im Verlauf der Vegetationszeit verändern und wirken sich daher, ebenso wie z.B. die Globalstrahlung, negativ auf die Höhe der Korrelation aus.

Tabelle 3-2: CWSI, Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$) und der mittlere volumetrische Bodenwassergehalt (Vol.%), beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 16. bis 22.07.2018. Für den 19.07.2018 sind keine Daten zum mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt verfügbar, da diese aufgrund der durchgeführten Bewässerung verworfen wurden.

Datum	CWSI (reduzierte Variante)	CWSI (optimale Variante)	Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$)	Mittl. vol. Bodenwassergehalt (reduzierte Variante) (Vol.%)	Mittl. vol. Bodenwassergehalt (optimale Variante) (Vol.%)
16.07.2018	0.38	0.48	757.47	6.33	8.67
17.07.2018	0.47	0.65	691.88	5.90	7.71
18.07.2018	0.36	0.59	400.57	5.67	7.37
19.07.2018	-	$B_{\text{optimal } 45\ \%nFK}$	386.05	-	-
20.07.2018	0.53	0.35	687.34	5.24	12.27
21.07.2018	0.69	0.34	457.82	5.05	10.78
22.07.2018	0.68	0.32	468.69	4,92	9,83

Tabelle 3-3: CWSI, Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$) und der mittlere volumetrische Bodenwassergehalt (Vol.%), beispielhaft dargestellt für den Zeitraum vom 04. bis 05.07.2019. Für den 06., 08. und den 09.07.2019 sind keine Daten zum mittleren volumetrischen Bodenwassergehalt verfügbar, da diese aufgrund von Niederschlagsereignissen verworfen wurden.

Datum	CWSI (reduzierte Variante)	CWSI (optimale Variante)	Globalstrahlung ($W\ m^{-2}$)	Mittl. vol. Bodenwassergehalt (reduzierte Variante) (Vol.%)	Mittl. vol. Bodenwassergehalt (optimale Variante) (Vol.%)
04.07.2019	0.48	0.43	623.34	5.10	10.18
05.07.2019	0.31	0.32	262.86	4.94	10.08
06.07.2019	N (3 mm)	N (3 mm)	116.17	-	-
07.07.2019	0.53	0.46	527.07	4.72	10.00
08.07.2019	N (1.6 mm)	N (1.6 mm)	303.54	-	-
09.07.2019	N (1.2 mm)	N (1.2 mm)	348.38	-	-
10.07.2019	0.53	0.39	596.65	4.55	9.33

Je weniger Wasser im Boden verfügbar ist, desto enger wird die Beziehung zwischen Bodenfeuchte und CWSI. Die geringe Menge an verfügbarem Wasser wird dann zunehmend zum bestimmenden Faktor für den Trockenstress. Für die Parzellen mit reduzierter Bewässerung kann das höhere Bestimmtheitsmaß, also die geringere Streuung der CWSI-Werte, wie folgt erklärt werden: Bei einem geringeren Niveau der Bodenfeuchte, die meist im Bereich zwischen 35 und 75 % der nFK

lag, trat schneller Wassermangel und damit Trockenstress auf, wie es der CWSI angezeigt hat. Darauf deutet auch die stärkere Steigung der Kurven bei trockenerem Boden hin. Die sehr steile Kurve im Jahr 2019 ist jedoch auch auf die geringe Spanne der Bodenfeuchtemesswerte zurückzuführen, die dem Einbauort der Sonde auf der Dammkrone geschuldet waren. Die mit der Bodenfeuchtesonde gemessenen Wassergehalte betrug im Jahr 2018 bei reduzierter Bewässerung 5 Vol.% (35 % nFK) bis 8,5 Vol.% (75 % nFK). Im Jahr 2019, mit anderem Messpunkt und Einbauort, lagen sie in einem schmalen Bereich zwischen 4,5 Vol.% und 6 Vol.%.

Die CWSI-Werte bei der Variante mit optimaler Bewässerung erreichten in der Nachmittagszeit Höchstwerte von etwa 0,6 bei Bodenfeuchten zwischen 45 und 55 % der nFK bis 60 cm Bodentiefe, der Schwelle für den Beregnungseinsatz. Der gemessene Bodenwassergehalt lag dabei 2018 zwischen 7,5 und 9 Vol.% und 2019 zwischen 9 und 10 Vol.%. Bei Unterschreiten dieser Werte, d.h. einer Bodenfeuchte zwischen 40 % und 45 % der nFK, konnte ein CWSI ab 0,7 beobachtet werden, der einen hohen Trockenstress anzeigt. In der reduziert bewässerten Variante kamen CWSI-Werte größer 0,6 bei geringeren Bodenfeuchten unter 45 % der nFK, vor. Das entsprach 2018 ungefähr 6 Vol.% und 2019 etwa 5 Vol.%. Möglicherweise könnte das auf eine bessere Anpassung der Pflanzen an eine geringere Wasserverfügbarkeit aus dem Boden bei reduzierter Bewässerung hindeuten. Hierzu gab es im Versuch keine direkten Untersuchungen. Es ist jedoch bekannt, dass Kartoffeln physiologisch und phänologisch auf Trockenstress reagieren (Obidiegwu et al., 2015). Denkbar wäre ein dichteres und/oder tiefer reichendes Wurzelsystem der reduziert beregneten Variante, wodurch das Bodenwasser besser ausgenutzt werden könnte. Ahmadi et al. (2017) und Quandahor et al (2021) konnten derartige Anpassungen des Wurzelsystems von Kartoffeln an moderaten Trockenstress zeigen. Eine weitere mögliche Anpassung wäre auch die Ausbildung einer kleineren Blattfläche, wodurch sich der Wasserbedarf verringern würde. So konnte Jefferies (1993) einen deutlichen Anstieg des Quotienten aus Wurzelmasse und oberirdischer Pflanzenmasse (jeweils getrocknet) bei Kartoffeln unter Trockenstress nachweisen. Weitere Messungen der Bodenfeuchte im Jahr 2019 mit zusätzlichen Sonden an je drei Parzellen mit optimaler und reduzierter Bewässerung ergaben keine Unterschiede in der Entnahmetiefe des Bodenwassers aus dem Unterboden. Die Sensoren in 45 und 55 cm Tiefe zeigten durch Abnahme der Bodenfeuchte ab dem 17. Juni eine Wasserentnahme durch die Wurzeln in beiden Varianten an.

Herausforderungen bei der Bodenfeuchtemessung

Die unterschiedlichen Messbereiche der Bodenfeuchte in den einzelnen Jahren, sowie zwischen den Bewässerungsvarianten, sind nicht nur durch die unterschiedlichen Bewässerungsintensitäten und Jahreseffekte, sondern teilweise auch durch die Heterogenität der Bodenart und den hohen Steingehalt auf dem Versuchsfeld verursacht worden. Daher sind die Absolutwerte der Bodenfeuchte verschiedener Messpunkte auf dem Feld nicht direkt miteinander vergleichbar. Eine Vergleichbarkeit wird erst durch den Bezug auf die jeweilige Feldkapazität am Einbauort der Sonde gegeben. Besonders der hohe Steinanteil führte zu Problemen bei der Messung der Bodenfeuchte, da Steine in direkter Nähe eines Sensors eine deutliche Verringerung der Messwerte verursachen. Weiterhin verfälschen die Steine die Höhe der Differenzen im Wassergehalt bei Wasserentzug oder -zufuhr. Diese Schwierigkeiten traten besonders 2019 am Messpunkt der Parzelle mit reduzierter

Bewässerung auf und führten neben dem Einbauort des Sensors auf der Dammkrone zu einer sehr engen Spannweite der Messwerte und zu einem steilen Abfall der Regressionsgeraden. Die bodenbedingten Unterschiede zwischen den beiden Parzellen im Versuchsjahr 2019 konnten auch durch die Messergebnisse zweier weiterer Sonden bestätigt werden, die in den gleichen Parzellen eingebaut waren.

Aus den genannten Gründen lieferten die Bodenfeuchtesensoren geringere Bodenfeuchtwerte als nach den vorliegenden Daten für das Versuchsfeld zu erwarten gewesen wäre. Am zeitlichen Verlauf der Messreihen lässt sich die Wasserversorgung der Pflanzen dennoch gut verfolgen und auch der Zusammenhang mit den CWSI-Werten war gegeben.

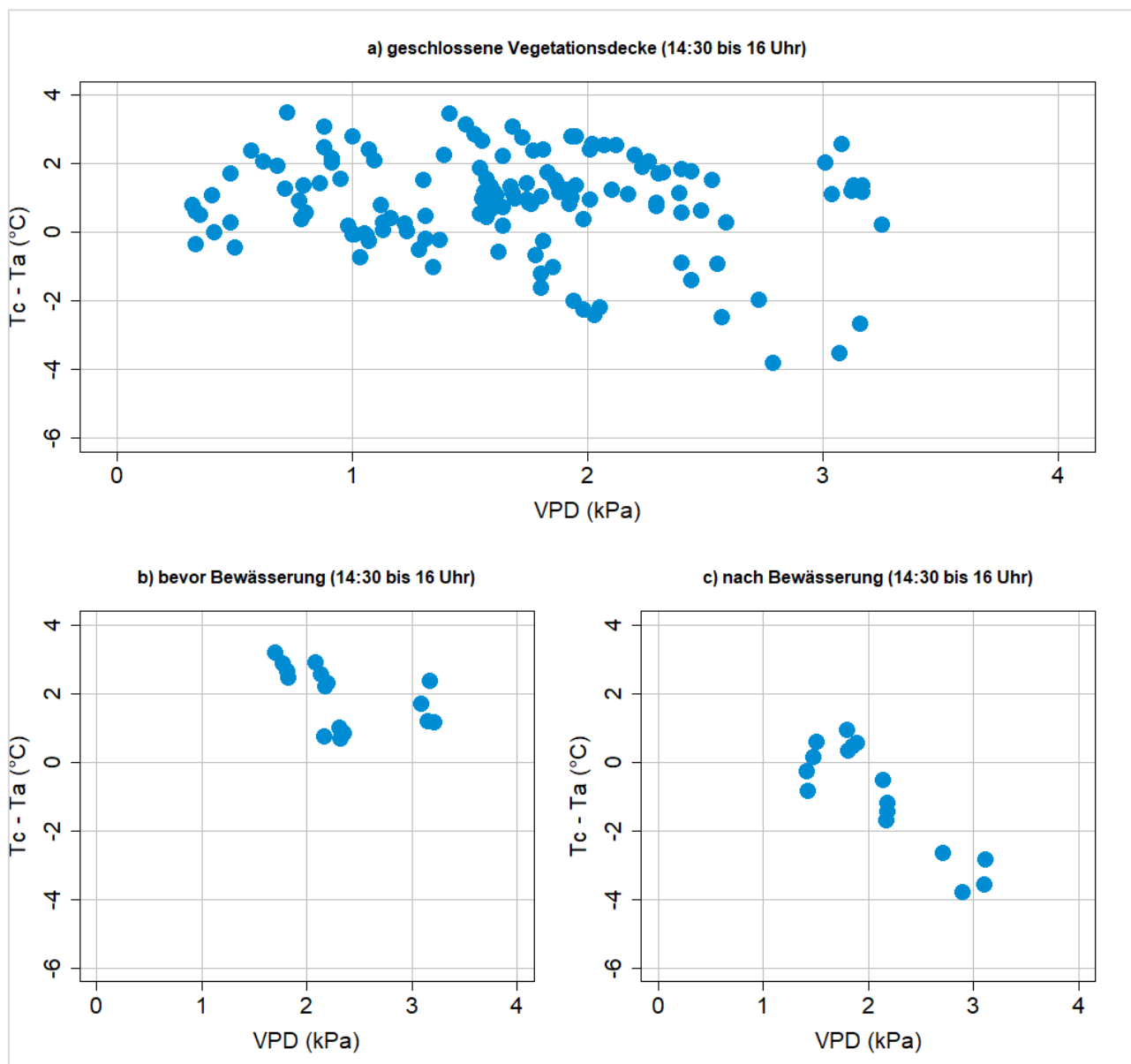
Ein weiteres Problem beim Anbau von Dammkulturen wie der Kartoffel stellt der Einbauort der Sonden im Damm dar. Wird die Sonde auf der Dammkrone, d.h. mitten im Inneren des Dammes, eingebaut, kann es zu einer Unterschätzung des Bodenwassergehalts der untersuchten Fläche kommen. Das Innere des Dammes trocknet auf Grund der hohen Durchwurzelungsintensität schnell aus. Die Wiederbefeuchtung erfolgt jedoch gerade in Sandböden mit ihrer geringen Wasserleitfähigkeit im trockenen Zustand nur sehr langsam. Dadurch fließt das zugeführte Wasser aus Niederschlägen oder der Beregnung zum großen Teil an der Dammflanke entlang in die Furchen, wodurch der Dammfuß und der Furchenbereich viel stärker durchfeuchtet werden als das Damminnere. Bei reduzierter Bewässerung trocknet der Damm besonders stark aus, wodurch dieses Phänomen hier ausgeprägter ist als bei optimaler Bewässerung. Dadurch wurde vermutlich die Bodenfeuchte bei reduzierter Bewässerung stärker unterschätzt als bei optimaler Bewässerung. Auch dadurch ist die Vergleichbarkeit der absoluten Werte beider Varianten schwierig.

Besonders auf Sandböden ist daher zu empfehlen, Bodenfeuchtesensoren im Bereich der Dammflanken zu positionieren anstatt genau in der Mitte. Unabhängig davon ist eine Beurteilung des absoluten Bodenwassergehalts einer Fläche anhand einer einzigen Messstelle aufgrund der Bodenheterogenität kritisch zu sehen (Michel und Günther, 2014). Für eine verlässliche Charakterisierung der Bodenfeuchte sollten daher mehrere Sensoren an unterschiedlichen Stellen eingebaut werden. Für die Abschätzung des Trockenstress zum Zwecke eines fachgerechten Einsatzes der Bewässerung sind aus diesem Grund flächenbezogene Messungen oder Berechnungen besser geeignet als punktuelle Messungen. Die dem CWSI zugrundeliegenden Messungen der Bestandstemperatur sind flächig in einem kleinen Ausschnitt der gesamten Parzelle erhoben worden. Sie haben daher eine höhere Aussagekraft als eine punktuelle Messung der Bodenfeuchte. Aus den erhobenen Daten auf dem Versuchsfeld Hamerstorf kann abgeleitet werden, dass ein CWSI-Wert über 0,6 recht zuverlässig Trockenstress und damit den Bewässerungsbedarf angezeigt hat.

3.3.4 Empirische CWSI-Ermittlung nach Idso et al. (1981)

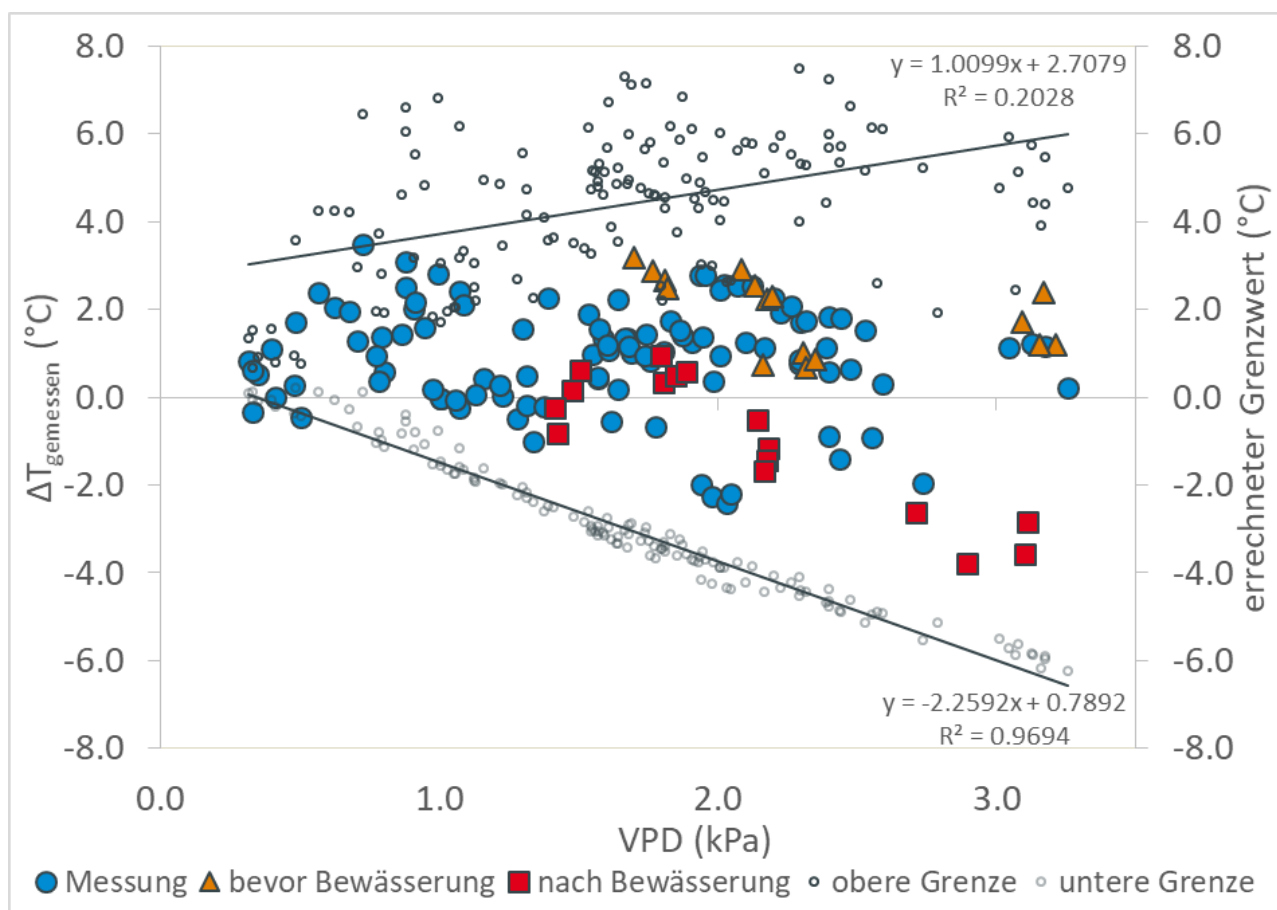
Weiterhin wurde überprüft, ob eine Bestimmung des CWSI anhand der erhobenen Temperaturdaten auch über den empirischen Ansatz nach Idso et al. (1981) möglich war. Dazu wurden die gemessenen Daten zur Temperaturdifferenz (ΔT) und zum Sättigungsdefizit (VPD) gegeneinander aufgetragen. Die Temperaturdifferenz wird positiv, sobald die Pflanze an Trockenstress leidet, und negativ, wenn die Pflanze ausreichend mit Wasser versorgt ist. Für die Ermittlung des empirischen Ansatzes wurden ausschließlich die Messdaten zwischen 14:30 und 16 Uhr verwendet, da der CWSI zu diesen Zeiten am belastbarsten zu sein scheint, wie eigene Ergebnisse zeigten. Weiterhin wurden die Daten an Beregnungstagen und Tagen mit Niederschlagsereignissen (≥ 1 mm) verworfen und nur die Daten im Zeitraum der geschlossenen Vegetationsdecke (20.06 – 02.08.2018) verwendet, da nur in diesem Zeitraum die Bestandstemperaturen belastbar sind. In Abbildung 3-11 sind die Korrelationen für den gesamten Zeitraum sowie für die Zeitpunkte unmittelbar vor und zwei Tage nach einer Bewässerung aufgezeigt.

Abbildung 3-11: Die Temperaturdifferenz (ΔT) der Bestandstemperatur (TC) und der Lufttemperatur (TA) gegen das Sättigungsdampfdruckdefizit (VPD), am Standort „Niendorf groß“ zum Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke (20.06 bis 02.08.2018). Dargestellt sind die Messwerte zwischen 14:30 und 16:00 Uhr, ausgenommen sind Tage mit Beregnungs- oder Niederschlagsereignissen (≥ 1 mm). Graphik a) zeigt alle Messdaten zum o.g. Messzeitraum. Graphik b) zeigt die Messwerte einen Tag bevor bewässert wurde (Daten: 28.6, 07./19./26.07.2018) von 14:30 bis 16:00 Uhr und soll den vermeintlich gestressten Zustand der Pflanze darstellen. Graphik c) zeigt die Messwerte für den nahen Zeitraum nach der Bewässerung (Daten: 01./09./22./31.07.2018) zwischen 14:30 und 16:00 Uhr. Dies soll den Pflanzenzustand zu ausreichend mit Wasser versorgten Bedingungen beschreiben.



Aus den Abbildungen werden zwar Tendenzen ersichtlich, dass die Temperaturdifferenz nach der Bewässerung negativ wird und unmittelbar vor der Bewässerung positiv ist. Dennoch ist es nicht möglich, anhand der vorhandenen Daten die obere und untere Grenze empirisch zu ermitteln, da die Bedingungen an den beiden fiktiven Grenzen im Rahmen dieses Versuches nicht simuliert wurden. Aus diesem Grund wurde die rechnerisch aus den meteorologischen Daten bestimmten Grenzen in einer linearen Regression gegen den VPD aufgetragen. Zusätzlich wurden die tatsächlich gemessenen Temperaturdifferenzen, welche in Abbildung 3-11 bereits dargestellt wurde, aufgetragen. Dies ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

Abbildung 3-12: Empirischer CWSI-Ansatz nach Idso et al. (1981), dargestellt anhand von Messungen der Temperaturdifferenz (ΔT) gegen das Sättigungsdefizit (VPD) für die Messstation „Niendorf groß“ für den Zeitraum 20.06 bis 02.08.2018 zwischen 14:30 und 16 Uhr. Zusätzlich eingezeichnet sind die mit Hilfe der gemessenen Parametern berechneten oberen und unteren Grenzen (theoretischer Ansatz nach Jackson et al. (1988)). Nicht dargestellt sind Messdaten an Tagen mit einem Beregnungs- oder Niederschlagsereignis (≥ 1 mm).



Es wird ersichtlich, dass die errechneten Grenzwerte an der unteren Grenze geringere Varianzen aufweisen als an der oberen Grenze ($R^2 = 0,9694$ und $R^2 = 0,2028$). Weiterhin wird deutlich, dass

die tatsächlich gemessenen Temperaturdifferenzen, mit Ausnahme weniger Punkte, im Bereich der errechneten Grenzen liegen. Dies zeigt zum einen, dass durch die durchgeführten Messungen und Berechnungen belastbare CWSI-Ergebnisse ermittelt wurden. Zum anderen zeigt es das Potenzial auf, unter einem veränderten Versuchsdesign die Grenzwerte empirisch ermitteln zu können. Bereits Erdem et al. (2006) simulierten in einem Versuch die Bedingungen an der unteren und an der oberen Grenze. Dazu setzten sie einige Kartoffelpflanzen maximalem Wasserstress aus, indem sie jegliche Bewässerung, auch in Form von Beregnung, vermieden, und einige Pflanzen setzten sie optimaler Wasserversorgung durch tägliche Bewässerung aus (Erdem et al. 2006). Anhand der in Abbildung 3-12 dargestellten Zusammenhänge kann abgeleitet werden, dass ein solches Versuchsdesign auch unter den in (Nord-)Deutschland herrschenden Wetterbedingungen möglich wäre.

3.4 Fazit

Der Crop Water Stress Index konnte im Rahmen des Projektes für die Versuchsjahre 2018 und 2019 erfolgreich berechnet werden und zeigt unter geeigneten meteorologischen Bedingungen belastbare Ergebnisse. Für das Versuchsjahr 2017 konnte aufgrund der feuchten und vergleichsweise kalten Witterungsbedingungen kein CWSI berechnet werden. Im Zuge der Auswertung konnten für die Berechnung bedeutende Parameter überprüft werden: Wie bereits in vorangegangenen Studien aufgezeigt, konnte auch im Rahmen dieses Projektes eine starke Abhängigkeit des CWSI von der einfallenden Globalstrahlung nachgewiesen werden. Weiterhin konnte aufgezeigt werden, dass der CWSI durch bereits geringe Unregelmäßigkeiten in der Bestandstemperaturmessung (z.B. die Sichtbarkeit von blankem Boden) verfälscht wird. Neben der Sichtbarkeit von Boden ist auch der Sonnenstand in Abhängigkeit der Ausrichtung des Infrarotsensors ein Faktor, der die Bestandstemperaturmessung beeinflusst. Auf Grundlage erhobener Werte zur nFK sowie zur Bodenfeuchte am Standort Hamerstorf konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe des CWSI tendenziell ähnliche Aussagen über den Wasserversorgungszustand getroffen werden können wie auf Basis von Bodenfeuchte- oder nFK-Werten.

Insgesamt ist der Crop Water Stress Index aufgrund der hohen Anzahl an Parametern, die in die Berechnung einfließen, eine komplexe Methode zur Bestimmung des Trockenstresses bei Kartoffeln, die als potentiell geeignet für das Treffen von Beregnungsentscheidungen angesehen werden kann. Die Projektergebnisse zeigen, dass belastbare Indexwerte erzielt werden können, wenn geeignete meteorologische und pflanzenphysiologische Bedingungen vorliegen. Um den CWSI aus konstanten und stationären Messungen berechnen zu können, ist es wichtig, dass der Pflanzenbestand lückenlos geschlossen ist, da die Sichtbarkeit von Boden den Index verfälscht. Weiterhin ist die Kalkulation des CWSI derzeit unter Bewölkung und wechselhaften Bedingungen nicht belastbar, da dieser stark von der Strahlungsintensität (Globalstrahlung) abhängig ist und somit nur unter klaren Strahlungsverhältnissen der tatsächliche Wasserversorgungszustand repräsentiert wird. Darüber hinaus kann der CWSI an Tagen, an denen ein Niederschlagsereignis auftrat oder der Bestand beregnet wurde, nicht kalkuliert werden. Es wird angenommen, dass

durch die nasse Blattoberfläche die Verdunstungskühlung durch Transpiration der Pflanze vernachlässigbar ist und aus diesem Grund die gemessene Bestandstemperatur nicht den tatsächlichen Wasserversorgungszustand der Pflanze repräsentiert. Als Möglichkeit, den CWSI als Berechnungsentscheidung zu etablieren, wäre ein kombiniertes Modell denkbar. Dazu könnte durch die Verwendung eines agrarmeteorologischen Modells die Tage, an denen kein belastbarer CWSI berechnet werden, die Daten anderweitig ergänzt werden. Für eine solche Umsetzung wären noch weitere Untersuchungen notwendig.

Literaturverzeichnis

- Ahmadi, S.H.; Agharezaee, M.; Kamgar-Haghighi, A. A.; Sepaskhah, A. R. (2017): Compatibility of root growth and tuber production of potato cultivars with dynamic and static water-saving irrigation managements. *Soil Use and Management* 33 (1): 106-119.
- Allen, Richard G.; Pereira, Luis S.; Raes, Dirk; Smith, Martin (1998): FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56. Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). In: *Food and Agriculture Organization of the United Nations* 97 (56).
- Amer, Kamal H.; Hatfield, Jerry L. (2004): Canopy Resistance as Affected by Soil and Meteorological Factors in Potato. In: *Agronomy Journal* 96 (4), S. 978. DOI: 10.2134/agronj2004.0978.
- Bartholic, J. F.; Namkem, L. N.; Wiegand, C. L. (1972): Aerial Thermal Scanner to Determine Temperatures of Soils and of Crop Canopies Differing in Water Stress. In: *Agronomy Journal* 64 (5), S. 603–608.
- Bockhold, D. L.; Thompson, A. L.; Sudduth, K. A.; Henggeler, J. C. (2011): Irrigation Scheduling Based On Crop Canopy Temperature For Humid Environments. In: *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 54 (6), S. 2021–2028.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2017): Agrarmeteorologie. Unter Mitarbeit von V. Bräutigam, W. Henk und R. Schretzmann. Hg. v. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. Bonn.
- Clothier, B. E.; Clawson, K. L.; Pinter, P. J.; Moran, M. S.; Reginato, R. J.; Jackson, R. D. (1986): Estimation of soil heat flux from net radiation during the growth of alfalfa. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 37, S. 319–329.
- Ehrler, W. L.; van Bavel, C.H.M. (1967): Sorghum Foliar Responses to Changes in Soil Water Content. In: *Agronomy Journal* 59 (MAY - JUNE), S. 243–246.
- Ehrler, William L. (1973): Cotton leaf Temperatures as Related to Soil Water Depletion and Meteorological Factors. In: *Agronomy Journal* 65, S. 404–409.
- Erdem, Rolga; Orta, A. Halim, Erdem, Yesim; Okursoy, Hakan (2005a): Crop water stress index for potato under furrow and drip irrigations systems. In: *Potato Research* 48 (1-2), S. 49–58.
- Erdem, Y.; Erdem, T.; Orta, A. H.; Okursoy, H. (2006): Canopy-air temperature differential for potato under different irrigation regimes. In: *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 56 (3), S. 206–216. DOI: 10.1080/09064710510029187.
- Erdem, Yesim; Erdem, Tolga; Orta, A. Halim; Okursoy, Hakan (2005b): Irrigation scheduling for watermelon with Crop Water Stress Index (CWSI). In: *Journal of Central European Agriculture* 6 (4), S. 449–460.
- Foken, Thomas (2016): Angewandte Meteorologie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

- Fritschen, Leo J. (1967): NET AND SOLAR RADIATION RELATIONS OVER IRRIGATED FIELD CROPS. In: *Agricultural Meteorology* 4, S. 55–62.
- Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J. (1981): Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. In: *Agricultural Meteorology* 24, S. 45–55.
- Idso, Sherwood B.; Jackson, Ray D.; Reginato, Robert J. (1977): Remote-Sensing of Crop Yields. In: *Science* 196 (4285), S. 19–25.
- Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato, R. J.; Pinter, P. J. (1981): Canopy Temperature as a Crop Water Stress Index. In: *Water Resources Research* 17 (4), S. 1133–1138.
- Jackson, R. D.; Reginato, R. J.; Idso, S. B. (1977): Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. In: *Water Resources Research* 13.3 (3), S. 651–656.
- Jackson, Ray D.; Kustas, William P.; Choudhury, Bhaskar J. (1988): A reexamination of the crop water stress index. In: *Irrig Sci* 9 (4), S. 309–317. DOI: 10.1007/BF00296705.
- Jefferies, R. A. (1993): Cultivar responses to water stress in potato: effects of shoot and roots. *New Phytol.* 123 (3), 491–498.
- Kraus, H (2008): Grundlagen der Grenzschicht-Meteorologie: Einführung in die Physik der Atmosphärischen Grenzschicht und in die Mikrometeorologie. Springer.
- Kuttler, Wilhelm (2009): Klimatologie. Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh.
- LBEG (2019): NIBIS Kartenserver. Bodenübersichtskarte 1:50 000 (BUEK50). Hg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover. Online verfügbar unter <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>, zuletzt geprüft am 13.08.2019.
- Legg, B. J., Long, I. F., Zemroch, P.J. (1981): Aerodynamic properties of field bean and potato crops. *Agricultural Meteorology* 23, 21–43.
- McCann, Ian R.; Stark, J. C.; King, B. A. (1992): Evaluation and interpretation of the crop water stress index for well-watered potatoes. In: *American potato journal* 69 (12), S. 831–841.
- Monteith, J. L. (1965): Evaporation and environment. In: *Symposia of the society for experimental biology* 19, S. 205–234.
- Monteith, J. L. (1973): Principles of environmental physics. Arnold, London.
- Monteith, J. L. (1975): Vegetation and the Atmosphere. Volume 1 Principles. Academic Press London.
- Nielsen, D. C. (1990): Scheduling irrigations for soybeans with the crop water stress index (CWSI). In: *Field Crops Research* 23 (2), S. 103–116.
- Obidiegwu, J. E.; Bryan, G. J.; Jones, H. G.; Prashar, A. (2015): Coping with drought: stress and adaptive responses in potato and perspectives for improvement. *Frontiers in Plant Science* 6:542.
- Oke, T. R. (1987): Boundary layer climates: Routledge.
- Pinter, P. J.; Reginato, R. J. (1982): A Thermal Infrared Technique for Monitoring Cotton Water Stress and Scheduling Irrigations. In: *Transactions of the ASAE* 25 (6).
- Quandahor, P.; Gou, Y.; Chunyan, L.; Coulter, J. A.; Changzong, L. (2021): Comparison of root tolerance to drought and aphid (*Myzus persicae* Sulzer) resistance among different potato (*Solanum tuberosum* L.) cultivars. *Scientific Reports* 11, 628.
- Rud, R.; Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Dar, Z.; Levi, A.; Brikman, R. et al. (2013): The potential of CWSI based on thermal imagery for in-season irrigation management in potato fields. In: *Precision Agric*, S. 721–727.

- Rud, Ronit; Cohen, Y.; Alchanatis, V.; Levi, A.; Brikman, R.; Shenderey, C. et al. (2014): Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. In: *Precision Agric* 15 (3), S. 273–289. DOI: 10.1007/s11119-014-9351-z.
- Schrödter, H. (1985): Verdunstung. Anwendungsorientierte Meßverfahren und Bestimmungsmethoden: Springer-Verlag (Hochschultext).
- Stark, J. C.; Wright, J. L. (1985): Relationship between foliage temperature and water stress in potatoes. In: *American potato journal* 62 (2), S. 57–68.
- Thom, A. S.; Oliver, H. R. (1977): On Penman's equation for estimating regional evaporation. In: *Q.J Royal Met. Soc.* 103 (436), S. 345–357. DOI: 10.1002/qj.49710343610.
- van Bavel, C.H.M.; Ehler, W. L. (1968): Water Loss From a Sorghum Field and Stomatal Control. In: *Agronomy Journal* 60, S. 80–84.
- Wanjura, D. F.; Kelly, C. A.; Wendt, C. W.; Hatfield, J. L. (1984): Canopy temperature and water stress of cotton crops with complete and partial ground cover. In: *Irrig Sci* 5 (1), S. 37–46. DOI: 10.1007/BF00275036.
- Wittern, J. (2018): Untersuchung zur Ertragsfähigkeit von Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L.) unter differenziertem Wassereinsatz. Bachelor-Arbeit Humboldt-Universität zu Berlin, 88 Seiten.
- Yazar, A.; Howell, T. A.; Dusek, D. A.; Copeland, K. S. (1999): Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn. In: *Irrig Sci* 18, S. 171–180.

4 Feldversuche, Feldmessungen und Ergebnisse

Johanna Schröder¹, Caroline Remmert², Angela Riedel², Jürgen Grocholl², Klaus Dittert³

1) Thünen-Institut für Agrartechnologie, 2) Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 3) Georg-August-Universität Göttingen

Zur Entwicklung, Optimierung und Prüfung des Einsatzes des CWSI zur Berechnungssteuerung in Kartoffeln wurden in den Jahren 2017 – 2019 umfangreiche Feldversuche und –messungen durchgeführt. Die Exaktversuche an der Versuchsstation Hamerstorf der Landwirtschaftskammer Niedersachsen dienten der Kalibrierung und Validierung der Methode. Auf diesem Versuchsstandort werden bereits langjährig Berechnungsversuche mit verschiedenen Fragestellungen durchgeführt (vgl. z.B. Riedel und Fricke 2015). Die auf Kartoffelflächen des landwirtschaftlichen Betriebs am Standort Niendorf II durchgeführten Messungen dienten zum einen der Erhebung von Grundparametern für die Berechnung des CWSI-Wertes unter Praxisbedingungen, zum anderen der Erforschung von Möglichkeiten zur Implementierung des Messverfahrens in den Betriebsablauf.

4.1 Parzellenversuche, Standort Hamerstorf

4.1.1 Allgemeine Beschreibung des Standortes

Der Standort der Versuchsstation Hamerstorf der Landwirtschaftskammer Niedersachsen im Landkreis Uelzen kann für die berechneten Ackerbaustandorte im Raum Nordostniedersachsens als repräsentativ angesehen werden. Die Versuche für das Projekt wurden auf dem stationären Berechnungsversuchsfeld angelegt (Abbildung 4-1). Im südlichen Teil des Feldes (in der Abbildung grün dargestellt) werden seit 2006 Berechnungsversuche durchgeführt, die später um zusätzliche Fragestellungen erweitert wurden. Für das Projekt wurde das Versuchsfeld um weitere Flächen im Norden vergrößert. Kenndaten zum Standort sind der Tabelle 4-1 zu entnehmen, einen Einblick in den Boden gibt Abbildung 4-2. Die Speicherkapazität für das pflanzenverfügbare Bodenwasser, die nutzbare Feldkapazität (nFK), wurde über die Bodenart und den Humusgehalt (nach RENGGER et. al., 2009), ermittelt. Die maximal durchwurzelbare Tiefe für die Kultur Kartoffeln ist mit 60 cm angesetzt worden.

Tabelle 4-1: Kenndaten zum Versuchsstandort Hamerstorf

Lage	Landkreis Uelzen, Gemeinde Suderburg
GPS - Koordinaten	52°54'25.75"N, 10°27'17.48"E
Höhenlage	50-60 m ü. NN
mittlerer Jahresniederschlag	622 mm
mittlere Jahrestemperatur	8,1 °C
Bodentyp	Braunerde
Bodenart	Sand
Ackerzahl	29
Humusgehalt	schwach humos
Nährstoffversorgung 2017 / 2018 / 2019 (pH bzw. mg/100 g Boden)	pH: 5,5/6,2/6,2; P ₂ O ₅ : 5,1/5,0/4,7; K ₂ O: 8,5 / 5,0 / 4,8 ; MgO: 4,9 / 3,0 / 2,6
mittlere nutzbare Feldkapazität	70 mm

Abbildung 4-1: Beregnungsversuchsfeld Versuchsstation Hamerstorf, SeBeK

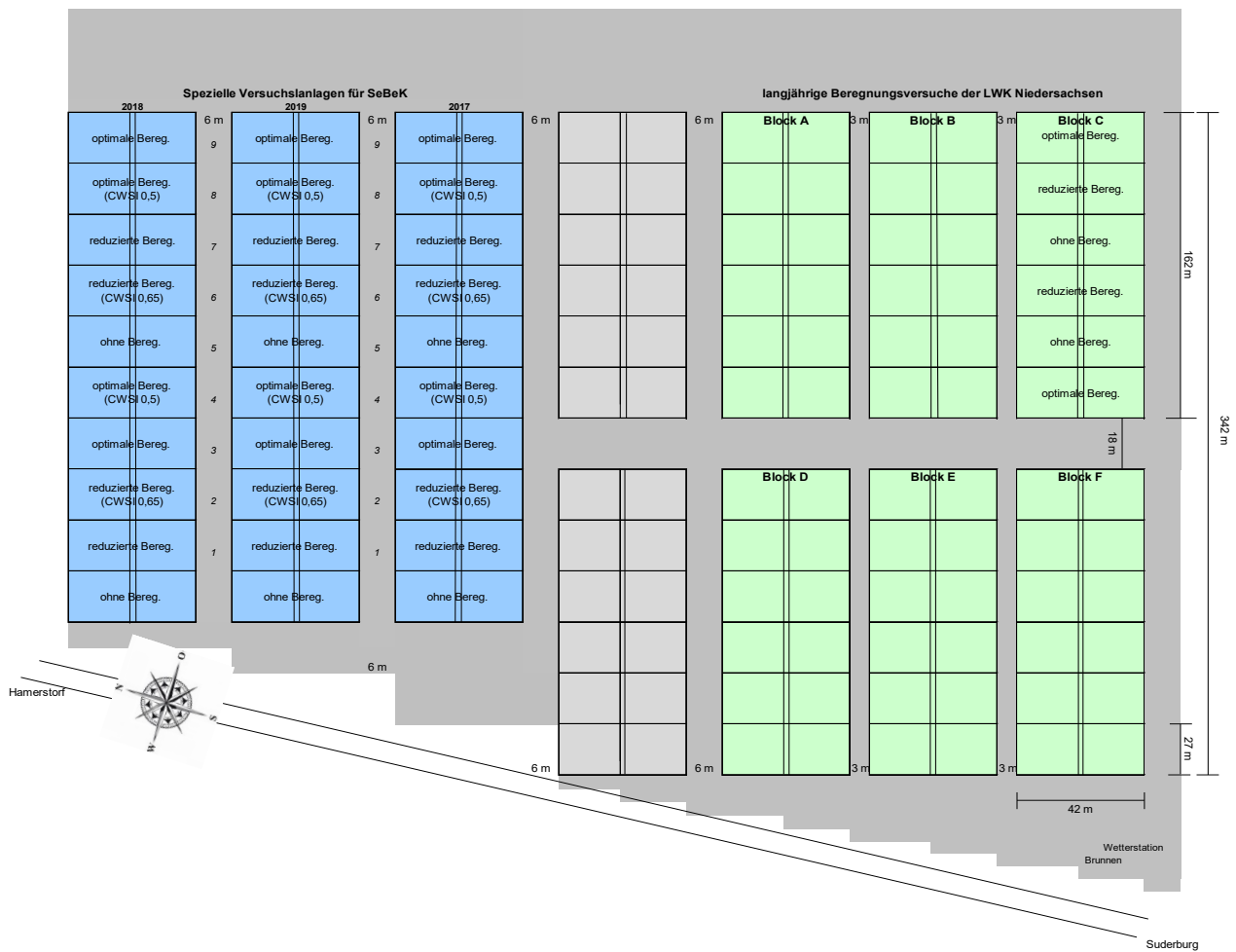


Abbildung 4-2: Bodenprofil des Versuchsstandortes, Profilansprache LBEG Niedersachsen (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)



4.1.2 Versuchsanlage

Die Exaktversuche sollen folgende Versuchsfragen beantworten:

- 1) Ermittlung von Daten zur Entwicklung, Kalibrierung und Prüfung des CWSI-Wertes zur Beregnungssteuerung
- 2) Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen der Wasserversorgung und der Kalidüngung im Hinblick auf den Knollenertrag und die Qualität von Kartoffeln

Die Versuchsanlage erfolgte als Spaltanlage (Großteilstück Beregnung, Kleinteilstück Düngung) in 4-facher Wiederholung. Auf Grund der Durchführung der Beregnung mit einem Düsenwagen, der nicht auf einer Teilbreite abgeschaltet werden kann, mussten die Großteilstücke an die Technik angepasst werden. Die Anlage mit vier unabhängigen Wiederholungen war daher nicht möglich. Zwei Wiederholungen befinden sich immer auf gleicher Höhe links und rechts von der mittigen Fahrspur des Regnerwagens. Der Düsenwagen ermöglicht eine praxisübliche Regengabe auf den Bestand und sichert gleichzeitig eine genaue Quer- und Längsverteilung des Wassers.

Angebaut wurde die Sorte Amanda (Speise/Veredlung, RG III, breite Nematodenresistenz, rel. Blattgesund). Alle nicht faktoriellen Bewirtschaftungsmaßnahmen (Düngung, Pflanzenschutz u.a.) erfolgten – standortbezogen - optimal entsprechend der jeweils aktuellen Empfehlungen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

Basis der Varianten sind die aus den langjährigen Beregnungsversuchen am gleichen Standort abgeleiteten Varianten unberechnet, optimal und reduziert berechnet. Die berechneten Varianten werden dabei nach Grenzwerten der Bodenfeuchte mit 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in der optimalen und 35 % der nFK in der reduzierten Variante gesteuert. Die Ermittlung der Bodenfeuchtegrenzwerte erfolgte durch wöchentliche gravimetrische Messungen und durch Berechnung mittels der klimatischen Wasserbilanz. Die beiden zusätzlichen CWSI- Varianten bilden ebenfalls eine reduzierte und eine optimale Bewässerungssteuerung ab, wobei die Grenzwerte für den Beregnungseinsatz mit 0,65 für die reduzierte Beregnung und 0,5 für die optimale so gewählt wurden, dass sie eine möglichst hohe Übereinstimmung mit den bewährten Grenzwerten nach der Bodenfeuchte erreichen sollten. Im Falle von Abweichungen der ermittelten Zeitpunkte für den Beregnungseinsatz von mehr als einem Tag sollte die Beregnung dementsprechend unterschiedlich erfolgen. Da die Entwicklung der Beregnungssteuerung nicht in der erwarteten Zeit zu einem anwendungsreifen Algorithmus führte, wurden die beiden CWSI-Varianten im Jahr 2017 entsprechend den nach der Bodenfeuchte berechneten Varianten behandelt. Auch 2018 war eine weitergehende Differenzierung der Beregnung auf der Versuchsfläche anhand der CWSI-Daten und Bodenfeuchtwerte nicht möglich, weil die intensive und lange anhaltende Trockenheit sehr häufige Wassergaben im wöchentlichen Turnus erforderte.

Tabelle 4-2: Versuchsvarianten am Standort Hamerstorf

Faktor 1: Beregnung	
Var.-Nr.	Variante
1	Ohne Beregnung
2	Reduzierte Beregnung (ab 35 % nFK)
3	Modell reduziert (CWSI 0,65)
4	Optimale Beregnung (ab 50 % nFK)
5	Modell optimal (CWSI 0,5)

Tabelle 4-3: Versuchsvarianten zur Prüfung des Einflusses der Kalidüngung

Faktor 2:Kali-Düngung	
Stufe-Nr.	Stufen
1	Kalidüngung nach Bedarf (als Kalisulfat)
2	Ohne Kalidüngung

Messeinrichtung für die CWSI-Berechnung:

Es waren insgesamt acht Infrarotsensoren installiert. Sechs Sensoren, mit einem Öffnungswinkel von 35° , waren jeweils in zwei Metern Höhe an einem Mast in Richtung Süden mit einer Neigung von 60° auf sechs verschiedene Parzellen ausgerichtet. Zwei weitere Sensoren hatten einen Öffnungswinkel von 90° und waren in zwei Metern Höhe senkrecht zum Bestand und senkrecht zum Himmel ausgerichtet. Insgesamt wurde die Bestandstemperatur an drei Parzellen mit reduzierter und drei Parzellen mit optimaler Bewässerung gemessen. Die Kaliumversorgung in diesen Parzellen erfolgte immer nach Stufe 1 (mit Kalidüngung). Die Versuchsstation war mit weiterer Messtechnik zur Messung meteorologischer Parameter ausgestattet: ein Feuchte- und Temperaturfühler, ein Luftdruckmessgerät, ein Pyranometer zur Messung der Globalstrahlung, ein Schalenanemometer zur Messung der Windstärke und ein Windrichtungsgeber zur Messung der Windrichtung. Alle Sensoren wurden in einer Höhe von zwei Metern installiert. Weiterhin wurden zwei Bodenfeuchtesonden (FDR-Messung) in einer optimal und einer reduziert beregneten Parzelle eingebaut. Im Versuchsjahr 2019 wurden weiterhin sechs zusätzliche Bodenfeuchtesonden am Rand der sechs beprobten Parzellen eingebaut.

Abbildung 4-3: Reihenartiger Aufbau der Messstation am Standort Hamerstorf mit Ausrichtung der Sensoren gen Süden. Schematisch dargestellt anhand des Messaufbaus im Versuchsjahr 2018 über der Speisekartoffel Amanda (Foto: Thünen-Institut).



4.1.3 Versuchsdurchführung

4.1.3.1 Randbedingungen in der Anbausaison 2017

Im Vorfeld der Pflanzung wurden Bodenproben für die N_{\min} -Werte, sowie parzellenscharf für die Grundnährstoffe entnommen. Die Pflanzung der Kartoffeln erfolgte am 10.04.2017 von Hand in einen abgetrockneten Boden. Die Kartoffeln liefen gut und relativ gleichmäßig auf, Mitte Juni waren die Reihen geschlossen. Die Kalidüngung erfolgte in 2 Teilgaben am 24.04. (150 kg/ha K_2O) und 12.06. (75 kg/ha K_2O) mit Kaliumsulfat ("Patentkali"). Der weitere Vegetationsverlauf war in weiten Teilen durch eine meist kühle Witterung und häufige Niederschläge gekennzeichnet. Insbesondere traten die für die Region typischen fröhsommerlichen Trockenperioden nicht auf (siehe Abbildung 4-4). Der Beregnungsbedarf war daher sehr gering. Lediglich die Varianten "optimale Beregnung" und "Modell optimal" erhielten am 15.06.2017 eine Wassergabe von 20 mm, die sich aber auf Grund der nachfolgenden Niederschläge nicht positiv auf den Ertrag auswirkte. Auf Grund der Witterung war der Krautfäuledruck sehr hoch und erforderte intensive Fungizidmaßnahmen. Die Ernte der Kartoffeln erfolgte am 31. August 2017 unter vergleichsweise guten Bodenbedingungen.

Abbildung 4-4: Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2017

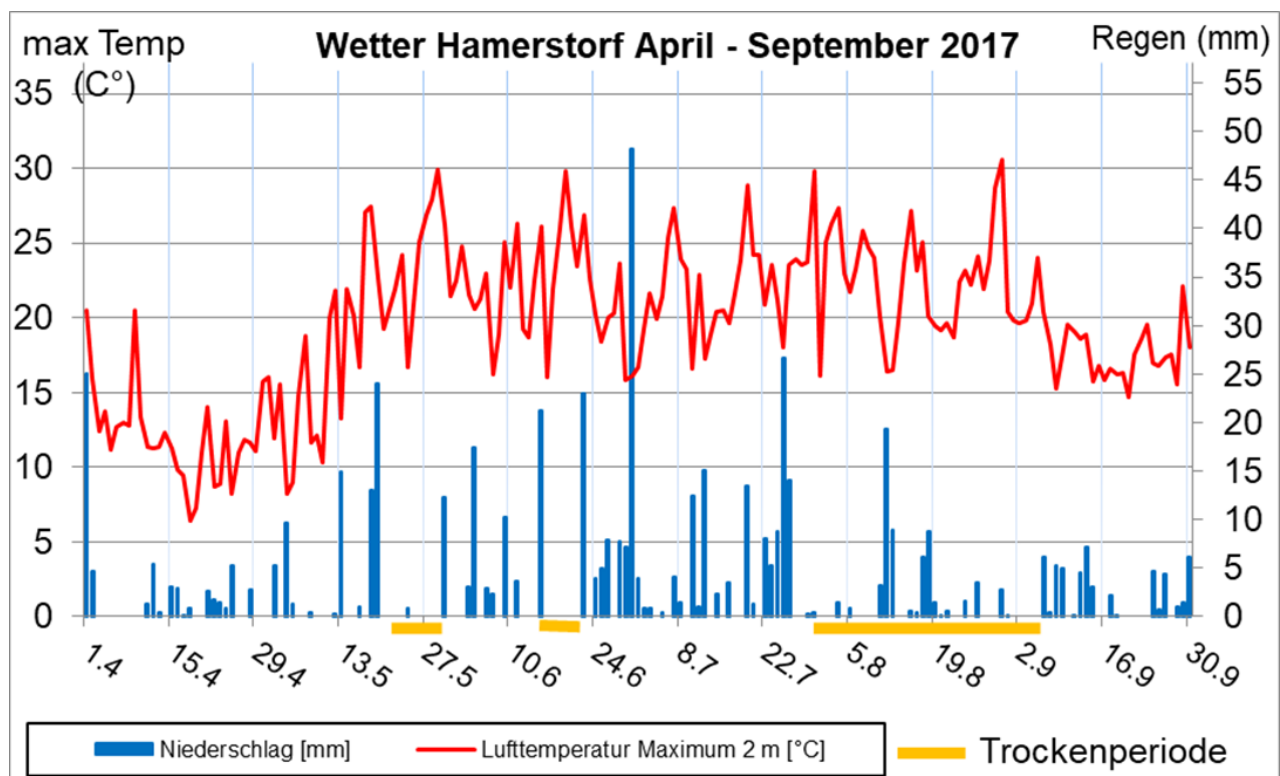
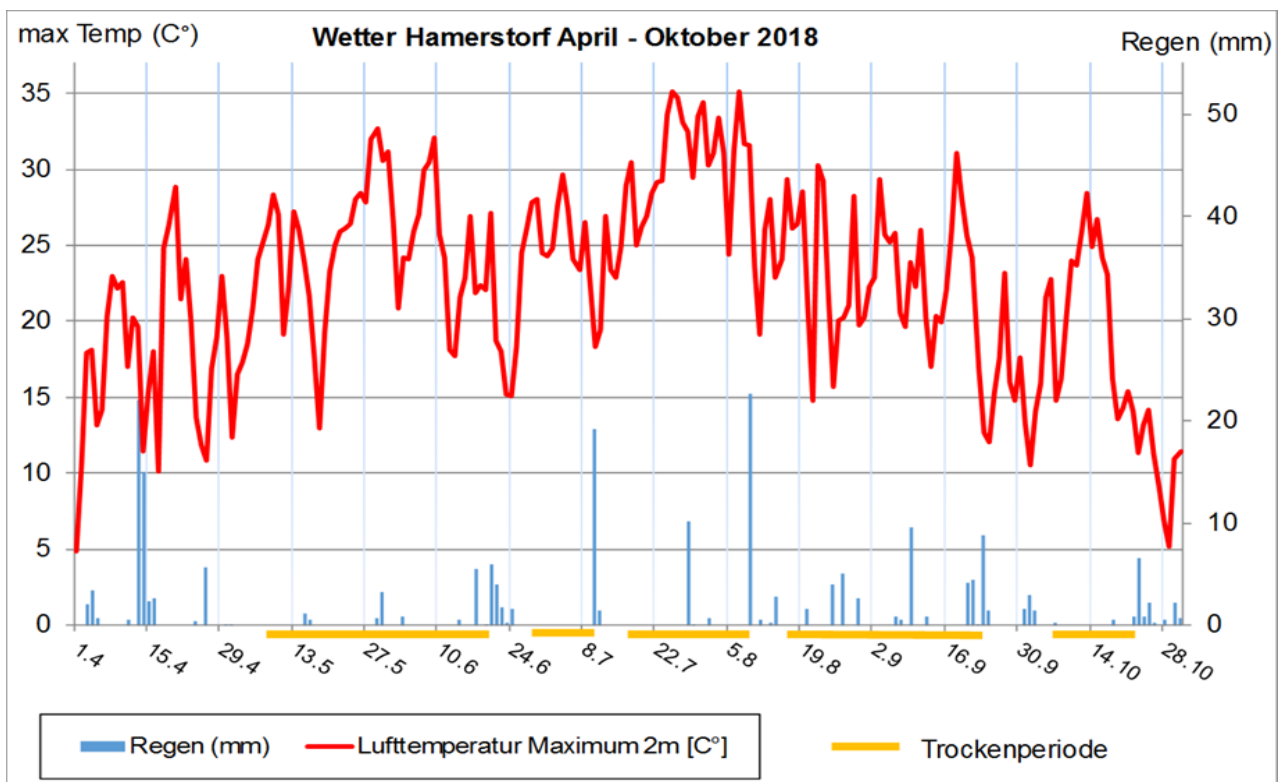


Tabelle 4-4: Berechnungsgaben der Vegetationsperiode 2017

Datum	Optimale Beregnung (mm) (50 % nFK / CWSI 0,5)	Reduzierte Beregnung (mm) (35 % nFK / CWSI 0,65)	BBCH
15.06.	20		42
Summe	20	0	
Anzahl Gaben	1	0	

4.1.3.2 Randbedingungen in der Anbausaison 2018

Die Pflanzung der Kartoffeln erfolgte am 27.04.2018 von Hand in ein optimal präpariertes Saatbett. Im Vorfeld der Pflanzung erfolgten Bodenprobennahmen für die N_{\min} -Werte, sowie parzellenscharf für die Grundnährstoffe. Die Kalidüngung erfolgte in einer Gabe am 30.04. mit Kaliumsulfat (240 kg/ha K_2O). Die Kartoffeln liefen gut und relativ gleichmäßig auf. Mitte Juni waren die Reihen in den beregneten Varianten geschlossen, ohne Beregnung jedoch nicht. Die Vegetationsperiode zeichnete sich durch sehr geringe Niederschlagsmengen und häufig hohe Temperaturen mit entsprechend hohen Verdunstungsraten aus. In den unberegneten Varianten behinderte die fortgesetzte Trockenheit von Anfang Mai bis zur Sikkation des Bestandes am 17.8. das Wachstum der Pflanzen. Auch das Knollenwachstum war ohne Beregnung sehr eingeschränkt.

Abbildung 4-5: Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2018

Beregnung

Am 8. Juni wurde mit der Beregnung in den optimal bewässerten Varianten begonnen, da die Bodenfeuchte 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) erreicht hatte. Die Varianten mit der guten Wasserversorgung (50% nFK und CWSI 0,5) bzw. der reduzierten Wasserversorgung (35% nFK und CWSI 0,65) wurden immer gemeinsam beregnet. Die Beobachtung der zeitnah im Internet zur Verfügung gestellten Verläufe der CWSI-Werte ergab eine häufige Übereinstimmung mit dem anhand der Bodenfeuchtwerte ermittelten Beregnungsbedarf im Zeitablauf. Eine weitergehende Differenzierung der Beregnung auf der Versuchsfläche anhand der CWSI-Daten und Bodenfeuchtwerte war nicht möglich, weil die intensive und lange anhaltende Trockenheit sehr häufige Wassergaben im wöchentlichen Turnus erforderte. Aufgrund der ausgeprägten Trockenheit waren in den optimal beregneten Varianten neun Regengaben mit insgesamt 253 mm erforderlich, bei reduzierter Beregnung sechs Regengaben mit insgesamt 170 mm (Tabelle 4-5).

Tabelle 4-5: Beregnungsgaben in der Vegetationsperiode 2018

Datum	Optimale Beregnung (mm) (50 % nFK / CWSI 0,5)	Reduzierte Beregnung (mm) (35 % nFK / CWSI 0,65)	BBCH
08.06.	25		55
11.06.		25	55
14.06.	28		58
18.06.		29	60
27.06.	30		66
02.07.		30	68
04.07.	30		69
09.07.	25	25	72
19.07.	30		74
23.07.		30	75
26.07.	30		76
30.07.		31	78
02.08.	30		91
07.08.	25		93
Summe	253	170	
Anzahl Gaben	9	6	

Abbildung 4-6: Versuchsbesichtigung am 27.6.2018. Der Düsenwagen fährt mittig in Längsrichtung über das Versuchsfeld (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)



Abbildung 4-7: Versuchsbesichtigung am 27.6.2018. Mitglieder des SEBEK-Teams vor der Beregnungsmaschine (Foto: Landwirtschaftskammer Niedersachsen)

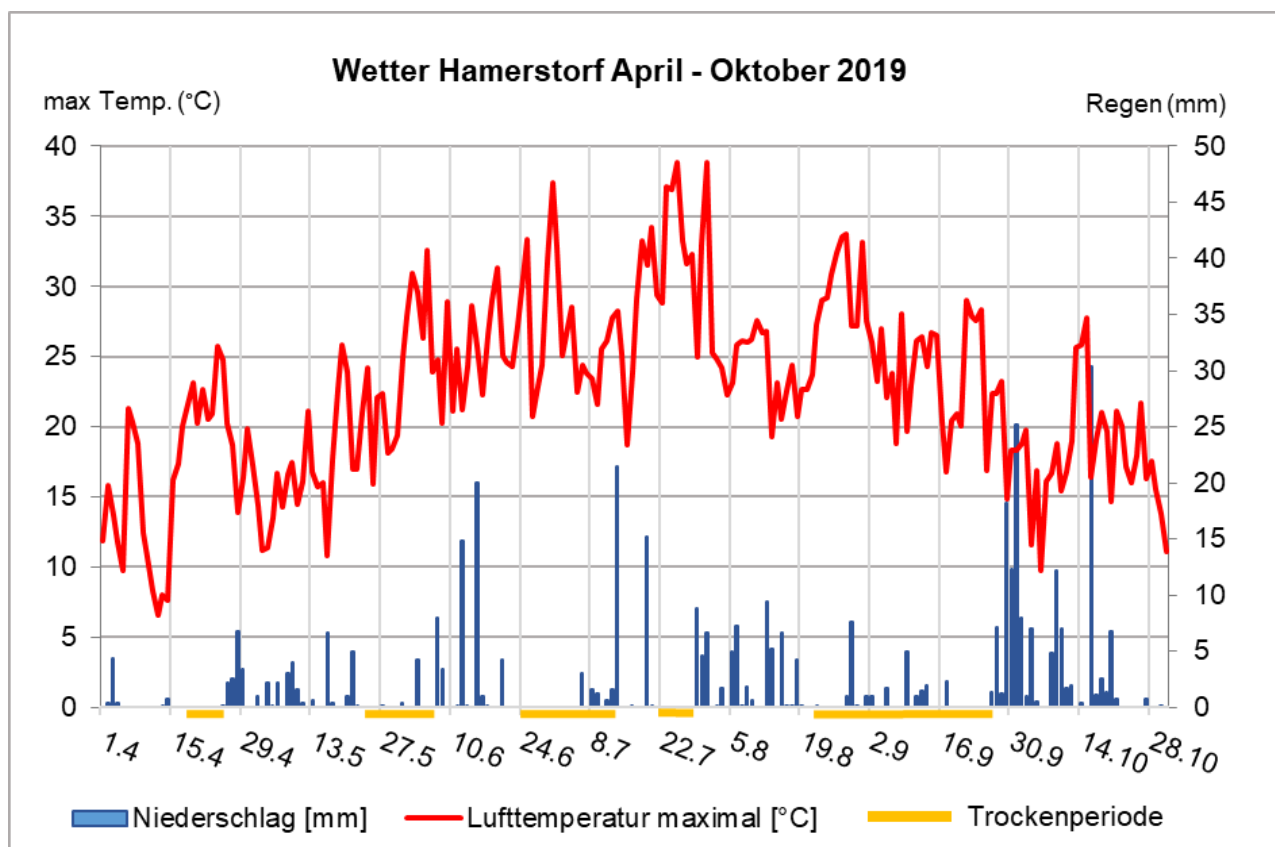


4.1.3.3 Randbedingungen in der Anbausaison 2019

Die Kartoffeln wurden am 15. April von Hand gepflanzt und liefen gut auf. Im Vorfeld der Pflanzung erfolgten die Bodenprobennahmen für die N_{\min} -Werte sowie parzellenscharf für die Grundnährstoffe. Die Kalidüngung erfolgte in einer Gabe am 25.04. mit Kaliumsulfat (240 kg/ha K_2O).

Am 04. Juni wurden sechs Bodenfeuchtesonden der Firma SENTEK vom Typ "drill & drop" mit 60 cm Länge und sechs Sensoren im Abstand von 10 cm je Sonde in den Boden gesetzt. Der Einbau erfolgte nahezu zerstörungsfrei durch Bohren eines Loches mit ca. 3 cm Durchmesser in entsprechender Länge der Sonde. Die Sonden wurden am Rande der Parzellen eingebaut, welche auch Sensoren zur Messung der Blattemperatur haben, um parallel die Bodenfeuchte und Bodentemperaturen zu messen.

Abbildung 4-8: Niederschläge und Lufttemperatur am Standort Hamerstorf 2019



Beregnung

Bereits zu Beginn der Versuche fehlten ausreichende Niederschläge und erforderten Beregnungsgaben. Zur Sicherung der Qualität (Verringerung des Befalls mit Kartoffelschorf) und des Knollenansatzes erfolgte die erste Gabe in den optimal berechneten Varianten bereits am 4. Juni zum BBCH-Stadium 40 "Beginn der Knollenanlage". Zu diesem Zeitpunkt war die

Bodenbedeckung durch die Pflanzen noch nicht vollständig (Beginn Reihenschluss) und der Anteil offenen Bodens entsprechend hoch, so dass noch kein CWSI berechnet werden konnte. Ausreichende Regenmengen in den folgenden zwei Wochen sorgten dann für eine gute Wasserversorgung. Ab dem Blühbeginn Mitte Juni waren die Reihen in den berechneten Varianten geschlossen. Ohne Beregnung war das Krautwachstum jedoch vermindert und dadurch noch kein vollständiger Reihenschluss vollzogen. Am 21. Juni waren die Grenzwerte der Bodenfeuchte (50 % bzw. 35 % der nFK) für alle berechneten Varianten erreicht. Parallel dazu waren auch die CWSI-Grenzwerte (0,5 bzw. 0,65) überschritten worden, weshalb alle Varianten am gleichen Tag beregnet wurden. Ende Juni gab es eine Hitzeperiode mit mehreren Tagen über 30°C Maximaltemperatur. Die optimalen Varianten wurden rechtzeitig beregnet (nach Bodenfeuchte und CWSI) und zeigten dadurch sogar an einem sehr heißen Tag mit 37° Maximaltemperatur keinen Trockenstress nach der CWSI Kurve an.

Die Verläufe der CWSI-Werte ergaben eine gute Übereinstimmung mit dem anhand der Bodenfeuchtwerte ermittelten Beregnungsbedarf im Zeitablauf. Daher erfolgte die Beregnung der jeweiligen optimalen und reduzierten Varianten nach nFK und CWSI zunächst parallel. Erst im Juli, bei der letzten Gabe, wurden Unterschiede sichtbar. Die Grenzwerte der Bodenfeuchte waren früher erreicht als die für den CWSI-Wert, weshalb die Beregnung nach der Bodenfeuchte einige Tage früher erfolgte.

Tabelle 4-6: Beregnungsgaben in der Vegetationsperiode 2019

Datum	Optimale Beregnung		Reduzierte Beregnung		BBCH
	nFK 50 %	CWSI 0,5	nFK 35 %	CWSI 0,65	
04.06.	20	20			40/ 19
21.06.	25	25	25	25	61
27.06.	30	30			65
01.07.			30	30	69
03.07.	30	30			69
18.07.	25	25			75
22.07.			25		
25.07.	30				
26.07.				30	91
29.07.		30			91
Summe	160	160	80	85	
Anzahl Gaben	6	6	3	3	

4.1.4 Ergebnisse

4.1.4.1 Erträge

2017

Der Ertrag bei optimaler Beregnung nach Bodenfeuchte entsprach im absoluten Gewicht 521 dt/ha. Entgegen den Erwartungen war kein positiver Einfluss der applizierten Zusatzwassergabe auf den Kartoffelertrag zu beobachten (siehe Tabelle 4-7). Es gab keine statistisch abgesicherten Ertragsunterschiede zwischen den gemittelten Erträgen der unberegneten und der beregneten Varianten. Tendenziell ist die Ertragswirkung der Beregnung sogar negativ gewesen. Das ist mit der ungewöhnlich feuchten Witterung des Jahres 2017 zu erklären. Nur 3 Tage nach der Beregnung folgten 27 mm Niederschlag innerhalb von 2 Tagen. Die Trockenperiode war also nur sehr kurz, bei gleichzeitig moderaten Temperaturen, und hat sich daher nicht negativ auf den Ertrag ausgewirkt. Ein zu nasser Boden nach der Beregnung und den folgenden Niederschlägen könnte sogar negative Effekte auf die Knollenentwicklung gehabt haben.

Das zeigte sich auch an den Knollengrößen. Die Knollen der beregneten Parzellen wiesen einen etwas höheren Anteil an Unter- und einen geringeren Anteil an Übergrößen auf. Mit optimaler Beregnung betrug der Anteil an Untergrößen (< 35 mm) 6,7 % des Ertrages (siehe Tabelle 4-8). Ohne Beregnung waren durchschnittlich 4,9 % der Knollen kleiner als 35 mm. Der Anteil an Übergrößen (> 65 mm) war ohne Beregnung im Durchschnitt mit 5,7 % deutlich höher als bei der optimalen Beregnung mit 1,8 % (siehe Tabelle 4-9).

Die Kali-Düngung weist in der Tendenz einen positiven Einfluss auf den Ertrag und die Knollengrößen auf. Der Untergrößenanteil war in allen Varianten deutlich geringer.

Die Stärkegehalte lagen zwischen 15,6 und 18 %. Sie unterschieden sich in den Beregnungsvarianten bei optimaler Kali-Düngung nicht. Ohne eine Kali-Gabe haben die Knollen einen um etwa 1 bis 1,5 %Punkte höheren Stärkegehalt ausgebildet als mit Kali-Gabe. Bei optimaler Beregnung stieg er ohne Kali-Düngung leicht an, was mit Kali-Düngung nicht der Fall war. Die höchsten Stärkegehalte wiesen dadurch die Knollen bei optimaler Beregnung und ohne Kali-Düngung auf.

2018

Der Ertrag bei optimaler Beregnung nach Bodenfeuchte entsprach im absoluten Gewicht 661 dt/ha. Die Zusatzwassergaben haben die Erträge sowohl in der reduzierten als auch in der optimalen Variante deutlich gesteigert. Ohne Beregnung waren die Erträge sehr niedrig. Sie erreichten mit Kali-Düngung nur 40 % des Ertrages der optimal nach nFK bewässerten Variante. Dies lässt sich mit dem ungewöhnlich trockenen und heißen Jahr mit einem Niederschlagsdefizit in

der klimatischen Wasserbilanz von -507 mm in dem Zeitraum von April bis einschließlich August erklären. Bei der reduzierten Bewässerung fiel der Ertrag um 15 % geringer aus als mit optimaler Bewässerung. Die Unterschiede zwischen den gleich bewässerten Bodenfeuchte- und den korrespondierenden CWSI-Varianten spiegeln den Versuchsfehler wieder, der sich auch aus kleinräumigen Bodenunterschieden innerhalb des Versuchsfeldes ergibt.

Ohne Beregnung war der Anteil an Untergrößen mit 9,6 % deutlich höher als bei optimaler Beregnung mit 0,6 % bis 1,0 % und reduzierter Beregnung mit 1,2 %-1,1 %. Dagegen war der Anteil an Übergrößen bei der unberegneten Variante mit 3,0 % sehr gering. Bei den optimal beregneten Parzellen waren 24,1 % bis 20,6 % aller Knollen Übergrößen. In den reduziert bewässerten Varianten lagen die Übergrößenanteile zwischen 15,6 % und 25 %.

Auch 2018 konnte eine leicht positive Tendenz der Kali-Düngung in Bezug auf den Knollenertrag festgestellt werden. Dies war jedoch nur in den reduziert und optimal beregneten Varianten der Fall, während der Ertrag ohne Beregnung mit und ohne Kali-Düngung identisch war. Der Anteil an Untergrößen lag mit Kali-Düngung nur geringfügig unter den Werten ohne Düngung. Ein positiver Effekt der Kalidüngung und damit einer guten Kaliversorgung ist aber insbesondere bei Trockenheit erwartet worden.

Die Stärkegehalte lagen zwischen 14,3 und 16,7 %. Sie stiegen in beiden Kalium-Varianten mit zunehmender Wasserversorgung tendenziell leicht an. Ohne Kali-Düngung haben die Knollen, wie bereits 2017, in allen Beregnungsvarianten einen um etwa 1 bis 1,5 %-Punkte höheren Stärkegehalt ausgebildet als mit Düngung.

2019

Der Ertrag bei optimaler Beregnung nach Bodenfeuchte entsprach im absoluten Gewicht 640 dt/ha. Der Knollenertrag erreichte ohne Beregnung nur 57 % des Ertrages der optimal nach nFK-bewässerten Variante. In der reduziert beregneten Variante nach der nFK wurde ein um 10 % geringerer Ertrag als mit optimaler Beregnung erzielt. Die CWSI und die Bodenfeuchtevarianten unterschieden sich nicht signifikant im Ertrag. Die späte letzte Gabe in den beiden CWSI-Varianten hat sich also nicht messbar auf den Ertrag ausgewirkt. Der Versuchsfehler mit einer Grenzdifferenz von 20 % war zu groß, um feine Unterschiede sehen zu können.

Der Anteil an Untergrößen war in der unberegneten Parzelle mit 5 % höher als in den reduziert bewässerten Varianten mit 2,2 % (nach nFK) beziehungsweise 1,9 % (nach CWSI). Die wenigsten Untergrößen haben sich in der optimal beregneten Variante mit 1,4 – 1,5 % gebildet. Die Menge an Untergrößen unterschied sich in den nach der nFK und nach dem CWSI beregneten Varianten kaum. Den niedrigsten Übergrößenanteil gab es in der unberegneten Variante mit 2,1 %. In der optimal nach nFK bewässerten Variante waren 4,9 % aller Knollen Übergrößen und 9,1 % bei den nach CWSI beregneten Kartoffeln. Bei der reduzierten Bewässerung waren 5,2 % (nach nFK) beziehungsweise 7,2 % (nach CWSI) der Knollen Übergrößen.

In Bezug auf die Kali-Düngung war ein tendenziell positiver Ertragseffekt, wie auch in 2018, nur bei den berechneten Varianten feststellbar. Ohne Berechnung waren die Erträge mit und ohne Kali-Gabe identisch. Bei der Knollengrößensortierung zeigte die Kali-Düngung leichte Vorteile, weil der Anteil an Untergrößen abnahm.

Die Stärkegehalte lagen mit Kali-Düngung zwischen 14,3 und 16,5 %, bei schlechter Kaliversorgung zwischen 16,0 und 19,0 %. Durch die Düngung mit Kali trat in diesem Jahr also eine noch stärkere Minderung des Stärkegehalts auf als in den Vorjahren. Die Bewässerung wirkte sich dagegen positiv aus. Die Stärkeanteile stiegen in beiden Kali-Stufen mit zunehmender Wasserversorgung deutlich an. Mit Kali-Düngung wiesen die optimal berechneten Varianten um 2 %-Punkte höhere Stärkegehalte auf als ohne Berechnung. Ohne Kali-Düngung betrug der Unterschied sogar 3 %-Punkte. Mit reduzierter Berechnung und Kalidüngung bildeten die Knollen um 0,5 %-Punkte weniger Stärke als mit optimaler Berechnung, während ohne Kali-Düngung kein Unterschied zwischen den berechneten Varianten erkennbar war.

Tabelle 4-7: Auswertung der Knollenerträge 2017 - 2019

	2017			2018			2019		
	Knollenertrag rel.		Berechnung	Knollenertrag rel.		Berechnung	Knollenertrag rel.		Berechnung
Varianten	K optimal	ohne K	mm	K optimal	ohne K	mm	K optimal	ohne K	mm
ohne Berechnung	114 ab	103 b	0	40 d	41 d	0	57 d	57 d	0
reduz. Bereg. ab 35% nFK Modell	112 ab	112 ab	0	85 bc	84 c	170	90 abc	71 cd	80
reduziert (CWSI 0,65)	119 a	109 ab	0	87 bc	81 c	170	86 ab	80 bc	85
opt. Bereg. ab 50% nFK Modell	100 b	106 ab	20	100 a	97 ab	253	100 ab	96 ab	160
optimal (CWSI 0,5)	108 ab	101 b	20	93 abc	85 bc	253	101 a	85 abc	160
Standard = 100%	521 dt/ha			661 dt/ha			640 dt/ha		
GD5%	14			12			20		

Tabelle 4-8: Auswertung der Untergrößen 2017 - 2019

Varianten	2017		2018		2019	
	Untergrößen (<35 mm) % abs		Untergrößen (<35 mm) % abs		Untergrößen (<35 mm) % abs	
	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K
ohne Beregnung	5,4	7,5	9,6	10,6	5,0	6,4
reduz. Bereg. ab 35% nFK	4,9	8,0	1,2	1,4	2,2	2,0
Modell reduziert (CWSI 0,65)	4,7	6,1	1,1	1,4	1,9	3,5
opt. Bereg. ab 50% nFK	6,7	8,3	0,6	0,9	1,4	2,0
Modell optimal (CWSI 0,5)	6,1	7,9	1,0	1,3	1,5	3,5

Tabelle 4-9: Auswertung der Übergrößen 2017 – 2019

Varianten	2017		2018		2019	
	Übergrößen (>65 mm) % abs		Übergrößen (>65 mm) % abs		Übergrößen (>65 mm) % abs	
	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K
ohne Beregnung	6,8	2,4	3,0	2,3	2,1	1,2
reduz. Bereg. ab 35% nFK	6,7	3,5	15,6	21,2	5,2	3,9
Modell reduziert (CWSI 0,65)	3,5	0,9	25,0	14,1	7,2	2,8
opt. Bereg. ab 50% nFK	1,8	1,7	24,1	20,8	4,9	5,0
Modell optimal (CWSI 0,5)	3,2	3,7	20,6	15,1	9,1	4,0

Tabelle 4-10: Auswertung des Stärkegehalts 2017 – 2019

Varianten	2017		2018		2019	
	Stärkegehalt (%)		Stärkegehalt (%)		Stärkegehalt (%)	
	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K	K optimal	ohne K
ohne Beregnung	16,0	17,4	14,3	15,6	14,3	16,0
reduz. Bereg. ab 35% nFK	15,6	17,2	14,5	16,0	16,0	19,0
Modell reduziert (CWSI 0,65)	16,5	17,1	15,1	15,9	15,8	18,0
opt. Bereg. ab 50% nFK	17,0	17,9	15,0	16,7	16,5	18,8
Modell optimal (CWSI 0,5)	16,5	18,0	15,4	16,6	16,3	18,3

Fazit

Erträge und Knollengrößen

In den trockenen Jahren 2018 und 2019 konnte mit Hilfe der Beregnung eine deutliche Ertragssteigerung sowohl in den reduzierten als auch in den optimalen Varianten festgestellt werden. Die höchsten Erträge wurden in den optimal bewässerten Parzellen erzielt. 2017 war ein sehr regenreiches Jahr, weshalb sich die Bewässerungsgabe nicht positiv ausgewirkt hat, obwohl der Grenzwert von 50 % der nFK kurzzeitig erreicht worden war. Der höchste Ertrag wurde 2018 mit 661 dt/ha erzielt, gefolgt von 2019 mit 640 dt/ha. Den niedrigsten Ertrag gab es 2017 mit 521 dt/ha.

Die Sortierung ist ein wichtiger Qualitätsaspekt bei der Vermarktung. Vermarktungsfähig sind nur Knollengrößen über 35 mm. Bei Speisekartoffeln gibt es auch für Übergrößen über 65 mm häufig Preisabschläge, weil der Handel und die Verbraucher bevorzugt mittlere Größen kaufen. Der Anteil an Untergrößen war in den Trockenjahren 2018 und 2019 in den jeweils unberegneten Varianten am höchsten und in der optimal beregneten am niedrigsten. In dem sehr trockenen Jahr 2018 gab es die meisten Untergrößen ohne Beregnung und die meisten Übergrößen mit Beregnung.

Des Weiteren konnte in allen Versuchsjahren eine positive Ertragsreaktion durch eine Kali-Düngung festgestellt werden, jedoch ausschließlich in den beregneten Varianten. Ohne Beregnung, also unter Wassermangel, wurde keine positive Wirkung der besseren Kali-Versorgung auf den Ertrag beobachtet. Der Anteil an Untergrößen war über alle Beregnungsvarianten tendenziell mit Kali-Düngung etwas niedriger als ohne Düngung. Der Anteil an Übergrößen war dagegen in den meisten Fällen mit Kali- Düngung etwas höher als ohne Düngung.

In Bezug auf den Stärkegehalt konnte in den trockenen Jahren 2018 und 2019 beobachtet werden, dass mit zunehmender Beregnungsintensität mehr Stärke gebildet wurde, während unter Bedingungen mit Trockenstress ohne Beregnung die geringsten Stärkegehalte auftraten. Die Kali-Düngung hat sich in allen drei Versuchsjahren negativ auf den Stärkegehalt ausgewirkt.

4.1.4.2 Bestimmung des CWSI

Aufgrund der bereits in Kapitel 4.1.3 beschriebenen feuchten Witterungsbedingungen konnte im Versuchsjahr 2017 kein Trockenstress gemessen werden. Daher konnte der CWSI für dieses Versuchsjahr nicht erfolgreich berechnet werden. In den Versuchsjahren 2018 und 2019 ermöglichten die bereits beschriebenen trockenen Witterungsbedingungen die Kalkulation des CWSI.

Tabelle 4-11 und Tabelle 4-12 zeigen die gemittelten CWSI-Werte zwischen 14 und 16 Uhr für die Versuchsjahre 2018 und 2019 während des Zeitraums mit geschlossener Vegetationsdecke. Nicht dargestellt sind Beregnungstage oder Tage mit Niederschlagsereignissen. Zusätzlich ist der mittlere

Globalstrahlungswert zwischen 14 und 16 Uhr als Orientierungswert aufgeführt, da der CWSI stark von der einfallenden Strahlung beeinflusst wird und somit Schwankungen in den CWSI-Werten verursacht werden können. Während der Tageszeit zwischen 14 und 16 Uhr ist der CWSI am belastbarsten, wie die Ergebnisse des Projektes ergaben. Die Tabellen zeigen die berechneten Werte, die zum Treffen der Beregnungsentscheidungen herangezogen wurden.

Beispielhaft soll für das Jahr 2018 die Periode vom 14.07. bis 25.07. in der optimalen Variante betrachtet werden. In diesem Zeitraum war die einfallende Globalstrahlung vergleichsweise hoch. Es ist ersichtlich, dass der CWSI mit voranschreitender Zeit von 0,38 am 14.07. auf 0,65 am 17.07. anstieg. Weiterhin ist zu beobachten, dass durch eine geringere Globalstrahlung am 18.07. der CWSI geringer war als am Vortag. Nach der Beregnung der optimalen Variante am 19.07. sank der CWSI über einige Tage, auch aufgrund geringerer Globalstrahlung, auf Werte zwischen 0,32 und 0,35 ab und stieg bis zur nächsten Beregnung am 26.07. erneut auf einen Wert von 0,71 an.

Betrachtet man in der reduzierten Variante den Zeitraum vom 20. bis 27.07., wird auch in dieser Variante ersichtlich, dass der CWSI bis zur Beregnung am 23.07. trotz sinkender Globalstrahlung anstieg, was vermuten lässt, dass die Pflanze starkem Trockenstress ausgesetzt war. Nach der Beregnung am 23.07. sank der CWSI zunächst ab und stieg bis zu dem Niederschlagsereignis (10 mm) am 28.07. auf einen Wert von 0,51 an.

Tabelle 4-11: Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2018 für die beiden Berechnungsvarianten (reduziert/optimal) zwischen 14 und 16 Uhr am Standort „Hamerstorf“. Dargestellt ist die Periode mit geschlossener Vegetationsdecke (12.07 – 08.08.2018). N = Niederschlagsereignis, B_{reduziert/optimal} = Berechnung mit Angabe der Variante.

Datum	CWSI (reduzierte Variante)	CWSI (optimale Variante)	Globalstrahlung (W m ⁻²)
12.07.2018	0.29	0.32	545.53
13.07.2018	0.41	0.44	613.78
14.07.2018	0.36	0.38	691.30
15.07.2018	0.38	0.43	624.39
16.07.2018	0.38	0.48	757.47
17.07.2018	0.47	0.65	691.88
18.07.2018	0.36	0.59	400.57
19.07.2018	-	B _{optimal}	386.05
20.07.2018	0.53	0.35	687.34
21.07.2018	0.69	0.34	457.82
22.07.2018	0.68	0.32	468.69
23.07.2018	B _{reduziert}	-	697.15
24.07.2018	0.29	0.53	710.17
25.07.2018	0.27	0.71	613.61
26.07.2018	-	B _{optimal}	630.74
27.07.2018	0.51	0.38	687.63
28.07.2018	N	N	350.27
29.07.2018	0.42	0.42	642.12
30.07.2018	B _{reduziert}	-	259.98
31.07.2018	0.19	0.31	431.07
01.08.2018	0.34	0.56	685.34
02.08.2018	-	B _{optimal}	683.90
03.08.2018	0.40	0.37	675.64
04.08.2018	0.52	0.43	605.29
05.08.2018	0.55	0.51	438.92
06.08.2018	0.66	0.60	697.67
07.08.2018	-	B _{optimal}	502.18
08.08.2018	0.82	0.42	579.53

Tabelle 4-12: Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2019 für die beiden Berechnungsvarianten (reduziert/optimal) zwischen 14 und 16 Uhr am Standort „Hamerstorf“. Dargestellt ist die Periode mit geschlossener Vegetationsdecke (04.07 – 31.07.2019). N = Niederschlagsereignis, B_{reduziert/optimal} = Berechnung mit Angabe der Variante. Vom 19. bis 22.7. konnten aufgrund eines Ausfalls der Messstation keine Daten verzeichnet werden.

Datum	CWSI (reduzierte Variante)	CWSI (optimale Variante)	Globalstrahlung (W m ⁻²)
04.07.2019	0.48	0.43	623.34
05.07.2019	0.31	0.32	262.86
06.07.2019	N (3 mm)	N (3 mm)	116.17
07.07.2019	0.53	0.46	527.07
08.07.2019	N (1.6 mm)	N (1.6 mm)	303.54
09.07.2019	N (1.2 mm)	N (1.2 mm)	348.38
10.07.2019	0.53	0.39	596.65
11.07.2019	0.60	0.37	372.57
12.07.2019	N (1.6 mm)	N (1.6 mm)	362.28
13.07.2019	N (21.4 mm)	N (21.4 mm)	406.94
14.07.2019	0.16	0.29	180.79
15.07.2019	0.18	0.34	245.33
16.07.2019	0.29	0.43	462.54
17.07.2019	0.33	0.37	745.93
18.07.2019	-	B _{optimal}	432.14
19.07.2019	-	-	-
20.07.2019	N (15.2 mm)	N (15.2 mm)	-
21.07.2019	-	-	-
22.07.2019	-	-	-
23.07.2019	0.34	0.32	714.07
24.07.2019	0.58	0.41	703.17
25.07.2019	-	-	660.77
26.07.2019	B _{reduziert}	-	710.41
27.07.2019	0.40	0.75	642.78
28.07.2019	0.36	0.77	557.30
29.07.2019	-	B _{optimal}	242.94
30.07.2019	N (8.4 mm)	N (8.4 mm)	680.30
31.07.2019	N (6 mm)	N (6 mm)	588.73

Im Versuchsjahr 2019 gab es mehrere, teilweise starke Niederschlagsereignisse im Zeitraum der geschlossenen Vegetationsdecke sowie einen Stationsausfall vom 19. bis 23.7. (vormittags). Bei Betrachtung der Periode vom 10. bis 17.07.2019 wird insbesondere in der reduzierten Variante ersichtlich, dass der CWSI durch die Niederschläge am 12. (2,8 mm) und 13.07. (20,3 mm) deutlich absank und bis zur Beregnung am 18.07.2019 wieder anstieg. Bei Betrachtung der optimalen Variante in diesem Zeitraum wird ersichtlich, dass der CWSI deutlich weniger schwankt als in der reduzierten Variante. Allerdings kam es in diesen Tagen ebenfalls zu Schwankungen in der einfallenden Globalstrahlung, weshalb die Belastbarkeit des CWSI unter Vorbehalt betrachtet werden muss. Die teilweise unterschiedliche Entwicklung der Werte bei eigentlich gleichen Wetterbedingungen und die oft starken „Sprünge“ machen eine Entscheidung zum Bewässerungseinsatz allein nach den CWSI-Werten schwierig.

Insgesamt zeigt sich, dass anhand des CWSI unter klaren Witterungsbedingungen und vollem Bestandsschluss belastbare Aussagen über den Wasserversorgungszustand der Pflanze möglich sind. Tendenziell können mit Hilfe des CWSI Beregnungsentscheidungen getroffen werden, sofern Fehlerquellen, die die CWSI-Berechnung verfälschen können (z.B. die Sichtbarkeit von Boden) ausgeschlossen werden können. Dennoch kann der CWSI derzeit aufgrund der existierenden Unsicherheiten noch nicht als eigenständige Methode für die Beregnungsentscheidung dienen. Jedoch könnte er als zusätzlicher Faktor bei der Entscheidungsfindung miteinbezogen werden. Ein Berechnungsalgorithmus, der zusätzlich zum CWSI verschiedene Faktoren wie Temperatur, Globalstrahlung, Pflanzenbestand und Bodeneigenschaften, mit einbezieht, könnte die Vorhersage der Bewässerungstermine präzisieren.

4.1.4.3 Bedeutung der Kaliumernährung bei Kartoffeln unter Beregnung

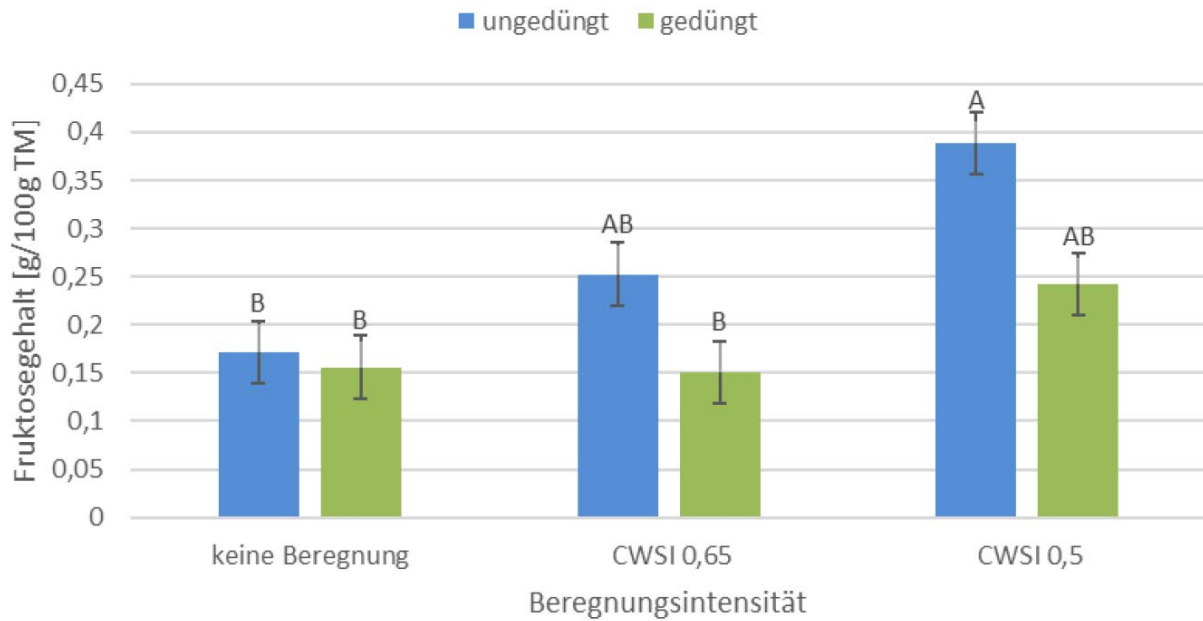
Unter den heimischen Kulturpflanzen benötigt insbesondere die Kartoffel relativ große Mengen des Pflanzennährstoffs Kalium, weil die aus der Fotosynthese stammenden Kohlenhydrate innerhalb der Pflanze in die recht wasserreichen Ernteorgane, die Kartoffelknollen, transportiert werden müssen. So ist auch die Kartoffelknolle selbst mit 1,5-2,5 % TM recht kaliumreich. Der Nährstoff Kalium spielt zudem eine sehr wichtige Rolle im Prozess der Fotosynthese und bei der Regulation des pflanzlichen Wasserhaushalts. Es ist daher seit langem bekannt, dass Kartoffeln eine ausreichende Kaliumversorgung benötigen (Putz, 1999).

In der wissenschaftlichen Literatur gibt es in den letzten Jahren vermehrt Berichte darüber, dass eine ausreichende Kaliumversorgung von Kulturpflanzen generell für die Wassernutzungseffizienz von Kulturpflanzen besonders wichtig ist (Grzebisz et al. 2013, Jakli et al. 2017, 2018). So entstand in diesem Projekt die Versuchsfragestellung, ob eine optimale Kaliumernährung der Kartoffel einen moderaten Wassermangel eventuell kompensieren könnte.

Im Rahmen dieser Studie zeigte sich entgegen dieser Hypothese, dass die Kaliumdüngung den Knollenertrag in den Versuchsvarianten ohne Beregnung in zwei Jahren nicht positiv beeinflussen konnte, und dass es nur in einem Jahr (2017), in dem die Beregnung ohnehin keine großen Ertragsunterschiede verursachte, eine erkennbare Kompensation gab. Sehr bemerkenswert ist jedoch der Befund, dass innerhalb der beregneten Varianten die Knollenerträge infolge der durchgeführten Kaliumdüngung trotz einer guten Kaliumversorgung der Böden in allen Jahren leicht erhöht waren. Obgleich die Unterschiede nicht signifikant waren (siehe Tabelle 4-7), wird dies als Hinweis darauf gesehen, dass durch die Kaliumdüngung die Wassernutzungseffizienz verbessert wurde, denn bei gleichen Beregnungsmengen konnte ein höherer Ertrag erzielt werden. Die Studie zeigte weiterhin, dass auch die Knollengröße hin zu etwas größeren Knollen beeinflusst wurde, was sich positiv auf die Vermarktungsfähigkeit auswirkte. Schließlich zeigte sich, dass die Stärkegehalte der Kartoffeln in allen drei Untersuchungsjahren durch die Kaliumdüngung leicht vermindert wurden (Tabelle 4-10). Diese Veränderung ist je nach Produktionsziel als günstig oder ungünstig zu bewerten. Während z.B. bei Stärkekartoffeln hohe Stärkegehalte das Ziel sind, ist bei einigen Speisesorten ein zu hoher Gehalt unerwünscht, da die Kartoffeln dann weniger festkochend sind.

Neben dem Stärkegehalt wurden in der Studie auch Effekte der Kaliumdüngung auf die Gehalte an reduzierenden Zuckern in den Kartoffelknollen geprüft. Sie stellen ein Qualitätskriterium im Hinblick auf die Eignung für die Erzeugung von Pommes frites oder Bratkartoffeln dar. Der Gehalt an reduzierenden Zuckern soll möglichst gering sein, weil reduzierende Zucker zur Verbraunung des Kartoffelprodukts und im Falle von Pommes frites zur Entstehung des krebserregenden Acrylamid beitragen. Hier zeigten sich zum Teil signifikante Unterschiede: Kaliumdüngung reduzierte in allen Fällen die Gehalte an reduzierenden Zuckern, und insbesondere bei den beregneten Varianten CWSI 0,65 und CWSI 0,5 wurden deutliche Unterschiede gefunden.

Abbildung 4-9 Gehalte des reduzierenden Zuckers Fruktose in Kartoffelknollen des Sebek-Feldversuchs in Hamerstorf für das Untersuchungsjahr 2019 (ungedüngt: ohne Kaliumdüngung, gedüngt: 240 kg K₂O ha⁻¹. Quelle: Bachelorarbeit Dina Schärfe, Universität Göttingen 2020).



4.2 Messungen auf Praxisflächen, Standort Niendorf II

4.2.1 Allgemeine Beschreibung des Standortes

Das Untersuchungsgebiet Niendorf II befindet sich im nordöstlichen Niedersachsen in der Gemeinde Wrestedt im Landkreis Uelzen, etwa sechs Kilometer südlich von Uelzen und etwa 15 Kilometer nordöstlich von Suderburg. Das Gebiet um den Standort ist geprägt durch glazifluviale Sedimente, hauptsächlich sandige Böden bestehend aus glazifluviatilen Sanden, Geschiebedecksanden und Flugsanden (LBEG 2019). In diesem Gebiet sind hauptsächlich Podsole, Podsol-Braunerden und Pseudogley-Braunerden aufzufinden (LBEG 2019). Weitere Kenndaten zum Versuchsstandort sind in Tabelle 4-13 aufgeführt.

Tabelle 4-13: Kenndaten zum Versuchsstandort Niendorf II (Wrestedt), Quelle: LBEG (2019) - Die Daten zur nutzbaren Feldkapazität wurden durch das Thünen-Institut für Agrartechnologie erhoben.

Lage	Landkreis Uelzen, Gemeinde Wrestedt
Höhenlage	40 – 50 müNN
Bodentyp	Braunerde, Podsol-Braunerde
Bodenart	Sand
Ackerzahl	40 – 50
Nutzbare Feldkapazität	75 - 100 mm
Mittlerer Jahresniederschlag	620 mm
Mittlere Jahrestemperatur	9 °C

Die Sensorik am Standort Niendorf II wurde für die praktische Anwendung im laufenden Betrieb getestet. Die Versuchsflächen hierfür befanden sich auf den Flächen von Landwirt H. Becker. Aufgrund der variierenden Fruchtfolgen wechselten die Standorte mit den Versuchsjahren. Eine Übersichtskarte mit den Positionen der Messstationen für die drei Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019 ist in Abbildung 4-10 dargestellt.

Abbildung 4-10: Position der Messstandorte im Gebiet Niendorf II in den drei Versuchsjahren 2017 (gelb), 2018 (blau) und 2019 (grün)



4.2.2 Versuchsaufbau und Messensorik

Der Aufbau der Messstation „Niendorf groß“ beinhaltete insgesamt sechs Infrarotthermometer. Der Aufbau der Messsensorik erfolgte kreisförmig. Vier der Infrarotsensoren, mit einem Öffnungswinkel von 35°, waren jeweils in zwei Metern Höhe an einem Mast zu den vier Himmelsrichtungen (Nord, Ost, Süd, West) mit einer Neigung von 60° auf den Bestand ausgerichtet. Die zwei weiteren Infrarotsensoren hatten einen Öffnungswinkel von 90° und waren in zwei Metern Höhe senkrecht zum Bestand und senkrecht zum Himmel ausgerichtet. Weiterhin war die Messstation mit folgender Messtechnik, angebracht in zwei Metern Höhe, ausgestattet: ein Feuchte- und Temperaturfühler und ein Luftdruckmessgerät. Weiterhin wurden die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse mit einem Nettoradiometer gemessen. Die Windstärke wurde im Messjahr 2017 zunächst mit drei Schalenanemometern in zehn, fünf und zwei Metern Höhe gemessen und in den Jahren 2018 und 2019 mit fünf Schalenanemometern in ca. zwei, vier, sechs, acht und zehn Metern Höhe gemessen. Zwei weitere Schalenanemometer waren in allen Versuchsjahren an einem Mast in ein und zwei Metern Höhe installiert. Weiterhin konnte der Bodenwärmefluss sowie die Bodentemperatur mit Hilfe von Bodenwärmeflussplatten und

Temperaturfühlern gemessen werden. Für die Versuchsjahre 2017 und 2018 stand des Weiteren eine Eddy-Kovarianz-Station zur Verfügung, mit der die turbulenten Wärmeflüsse und weitere für die Berechnung wichtige Parameter gemessen werden konnten.

Die Messstation „Niendorf klein“ hatte die gleiche Anzahl und Anordnung an Infrarotsensoren wie die Messstation „Niendorf groß“. Weiterhin war die Messstation ausgestattet mit folgender Messtechnik: ein Feuchte- und Lufttemperaturfühler, ein Luftdruckmessgerät, ein Pyranometer zur Messung der Globalstrahlung sowie ein Ultra Sonic Windsensor zur Messung der Windstärke und Windrichtung. Alle Sensoren waren ebenfalls in einer Höhe von zwei Metern installiert.

Abbildung 4-11: Kreisförmiger Messaufbau der Messstation auf den Praxisflächen in Niendorf II. Schematisch dargestellt für den Messaufbau über der Speisekartoffel Belana im Versuchsjahr 2019 (Foto: Thünen-Institut).



4.2.3 Versuchsdurchführung

In den folgenden Kapiteln werden die Randbedingungen für die Versuchsjahre 2017, 2018 und 2019 beschrieben. Die Versuche wurden in diesen Jahren mit der zuvor beschriebenen Messtechnik durchgeführt.

4.2.3.1 Randbedingungen in der Anbausaison 2017

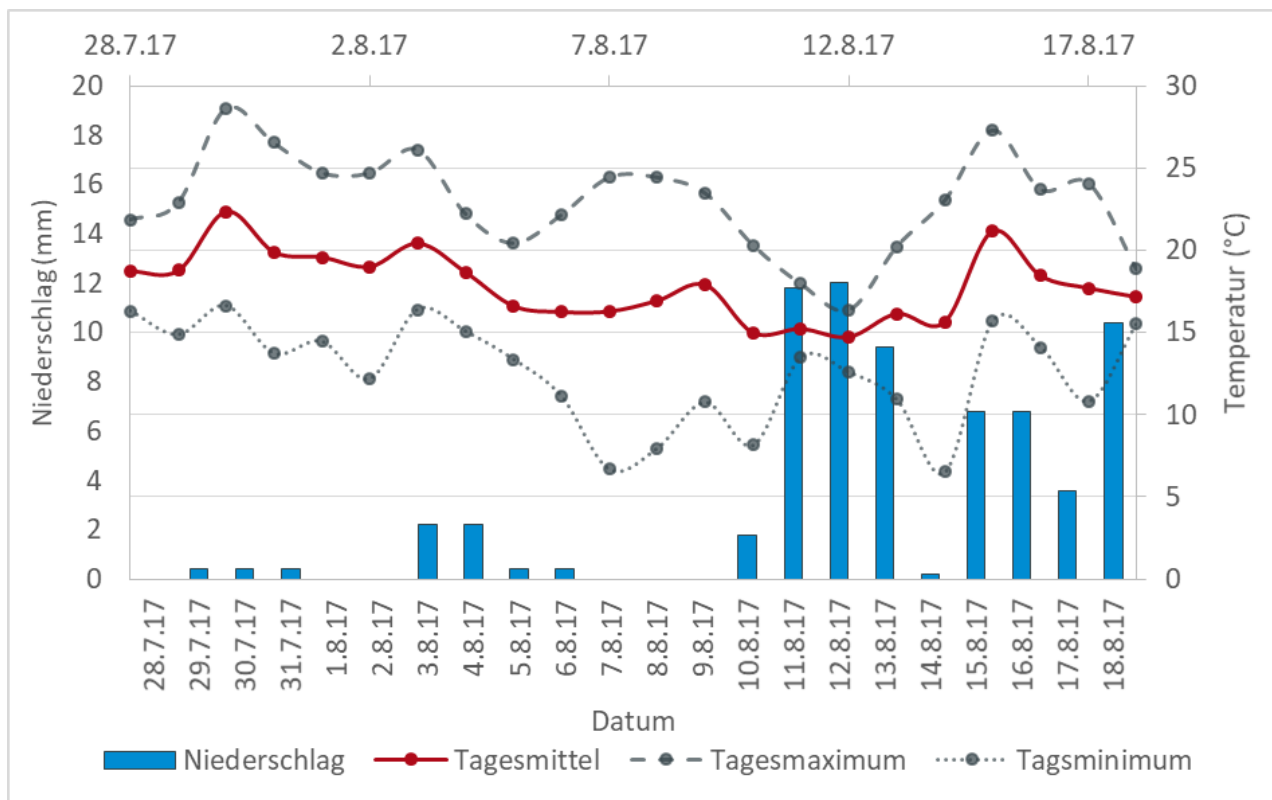
Im Versuchsjahr 2017 wurde eine Messstation auf einer der Flächen in Niendorf II über der Stärkekartoffelsorte Axion installiert. Zusätzlich wurde eine Eddy-Kovarianzstation auf derselben Fläche aufgebaut. Weitere Daten sind Tabelle 4-14 zu entnehmen.

Tabelle 4-14: Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2017.

Standort	Sorte	Pflanzung Kartoffeln	Aufbau Messstation	Abbau Messstation	Dauer Messung
Niendorf (groß)	Axion (Stärke)	Mitte April	28.07.2017	18.08.2017	22 Tage
Eddy-Kovarianz	Axion (Stärke)	Mitte April	21.07.2017	18.08.2017	29 Tage

Das Versuchsjahr 2017 war ein sehr niederschlagsreiches Jahr mit vergleichsweise niedrigen Temperaturen. Im Messzeitraum von 22 Tagen konnten 69,2 mm Niederschlag gemessen werden. Die Niederschlagssummen und die Temperaturverläufe sind in Abbildung 4-12 dargestellt.

Abbildung 4-12: Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2017 (28.07 bis 18.08.2017) an der großen Messstation am Standort Niendorf II. Die Niederschlagsdaten wurden nicht direkt an der Messstation aufgezeichnet, sondern durch eine nahegelegene Wetterstation der Ostfalia Hochschule Suderburg.



Aufgrund der sehr feuchten Bedingungen war es nicht notwendig die Kartoffeln während des Messzeitraums zu beregnen.

4.2.3.2 Randbedingungen in der Anbausaison 2018

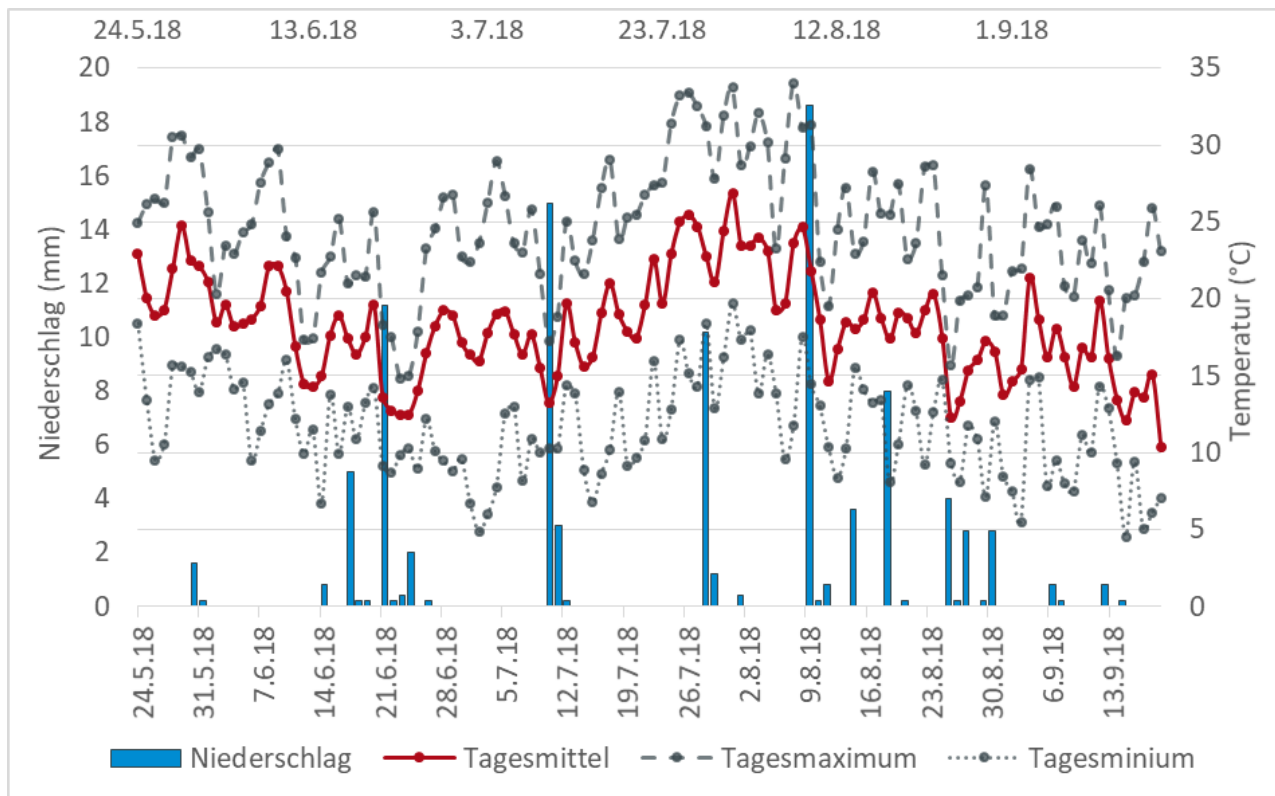
Im Versuchsjahr 2018 wurden zwei Messstationen nach Auflaufen der Kartoffeln auf den Flächen von Landwirt Becker installiert. „Niendorf klein“ wurde über der Speisekartoffel Madeira in Betrieb genommen, „Niendorf groß“ über der Stärkekartoffel Axion. Weitere Daten sind der Tabelle 4-15 zu entnehmen. Weiterhin wurde, wie bereits im Versuchsjahr 2017, eine Eddy-Kovarianz Station auf demselben Acker wie die große Messstation („Niendorf groß“) aufgebaut.

Tabelle 4-15: Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2018.

Standort	Sorte	Pflanzung Kartoffeln	Aufbau Messstation	Abbau Messstation	Dauer Messung
Niendorf klein	Madeira (Speise)	25.04.2018	14.05.2018	11.09.2018	120 Tage
Niendorf groß	Axion (Stärke)	20.04.2018	23.05.2018	18.09.2018	118 Tage
Eddy-Kovarianz	Axion (Stärke)	20.04.2018	06.06.2018	20.08.2018	75 Tage

Das Versuchsjahr 2018 war geprägt durch hohe Temperaturen und wenig Niederschlag. Insgesamt fielen am Standort Niendorf II (große Messstation) über einen Messzeitraum von 118 Tagen (23.05 bis 18.09) 95 mm Niederschlag. Eine Übersicht über die Niederschlagssumme und den Temperaturverlauf während der Messperiode ist in Abbildung 4-13 dargestellt.

Abbildung 4-13 Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2018 (24.05 bis 18.09.2018) an der großen Messstation am Standort Niendorf II. Dargestellt sind die Niederschlagssummen pro Tag sowie die Tagesmittel-, Tagesmaximal- und -Tagesminimaltemperaturen.



Im Versuchsjahr 2018 wurden zwei unterschiedliche Bewässerungssysteme verwendet. Die Stärkekartoffeln der großen Messstation wurden mittels mobiler Beregnungsmaschine mit Regnereinzug beregnet. Insgesamt wurde im Bereich der Messstation zehn Mal im Zeitraum vom 01.06 bis 31.08.2018 mit einer durchschnittlichen Beregnungsgabe von etwa 25 mm beregnet. Die Speisekartoffeln der kleinen Messstation wurden mittels Kreisberegner beregnet. Der Schlag wurde im Zeitraum vom 03.06 bis 17.08.2018 insgesamt neun Mal, ebenfalls mit einer durchschnittlichen Beregnungsgabe von etwa 25 mm, beregnet.

4.2.3.3 Randbedingungen in der Anbausaison 2019

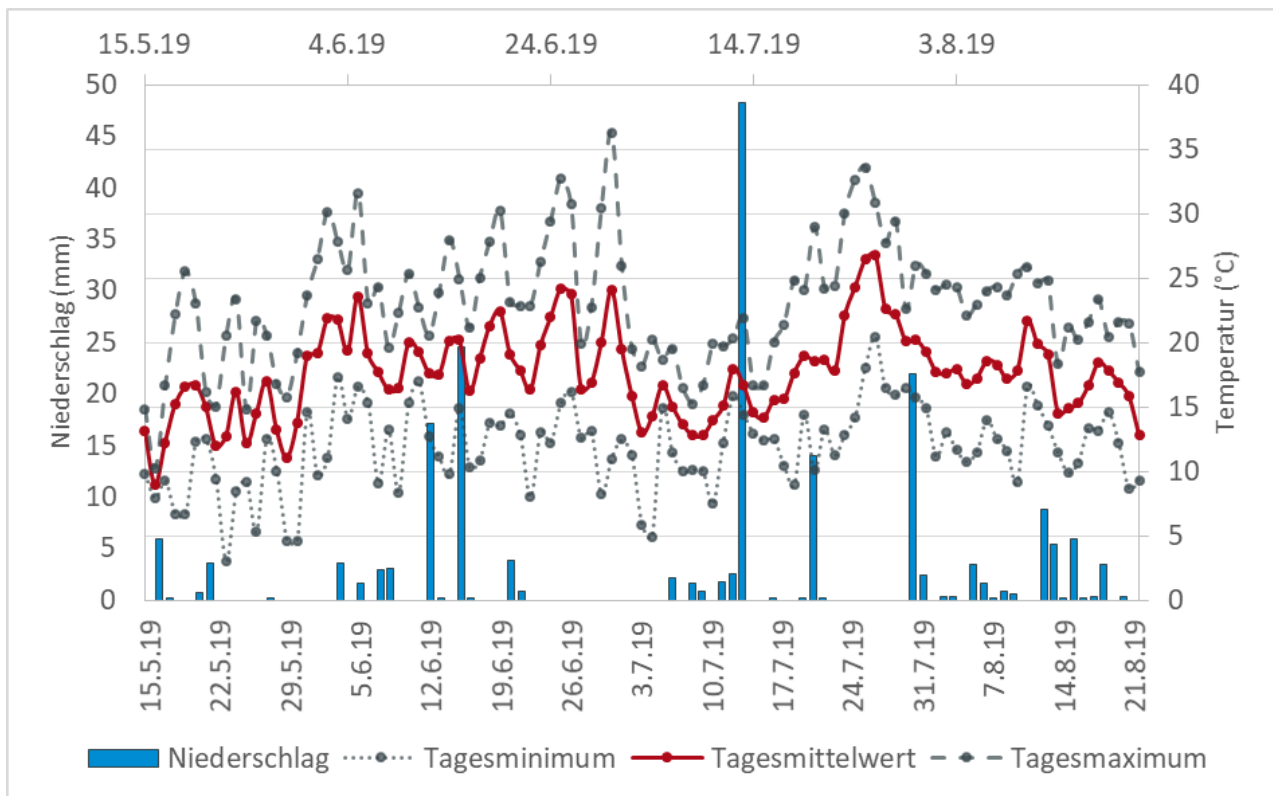
Im Versuchsjahr 2019 wurden ebenfalls zwei Messstationen auf Flächen in Niendorf II installiert. Da es aufgrund der örtlichen Gegebenheiten nicht möglich war, die große Messstation wie im Vorjahr über den Stärkekartoffeln zu installieren, wurde diese über den Speisekartoffeln aufgebaut. Ebenfalls anders als im Vorjahr wurde die kleine Messstation im Jahr 2019 über den Speisekartoffeln installiert. Die zuvor verwendete Eddy-Kovarianzstation stand im Versuchsjahr 2019 nicht zur Verfügung. Weitere Daten sind der Tabelle 4-16 zu entnehmen.

Tabelle 4-16: Kenndaten der Messstationen auf den Flächen in Niendorf II im Versuchsjahr 2019.

Standort	Sorte	Pflanzung Kartoffeln	Aufbau Messstation	Abbau Messstation	Dauer Messung
Niendorf groß	Belana (Speise)	Mitte bis Ende April	15.05.2019	21.08.2019	98 Tage
Niendorf klein	Axion (Stärke)	Mitte bis Ende April	07.05.2019	05.09.2019	121 Tage

Das Versuchsjahr 2019 war durch wechselhafte Witterungsbedingungen geprägt. Wie aus Abbildung 4-14 ersichtlich wird, gab es Zeiträume die durch hohe Temperaturen und Trockenheit sowie durch vergleichsweise geringe Temperaturen und viel Niederschlag geprägt waren. Während des Messzeitraums von 98 Tagen fielen an der großen Messstation insgesamt 196 mm Niederschlag.

Abbildung 4-14: Klimadiagramm für den gesamten Messzeitraum 2019 (17.05 bis 21.08.2019) an der großen Messstation in Niendorf II. Dargestellt sind die Niederschlagssummen pro Tag sowie die Tagesmittel-, Tagesmaximal- und Tagesminimaltemperaturen.

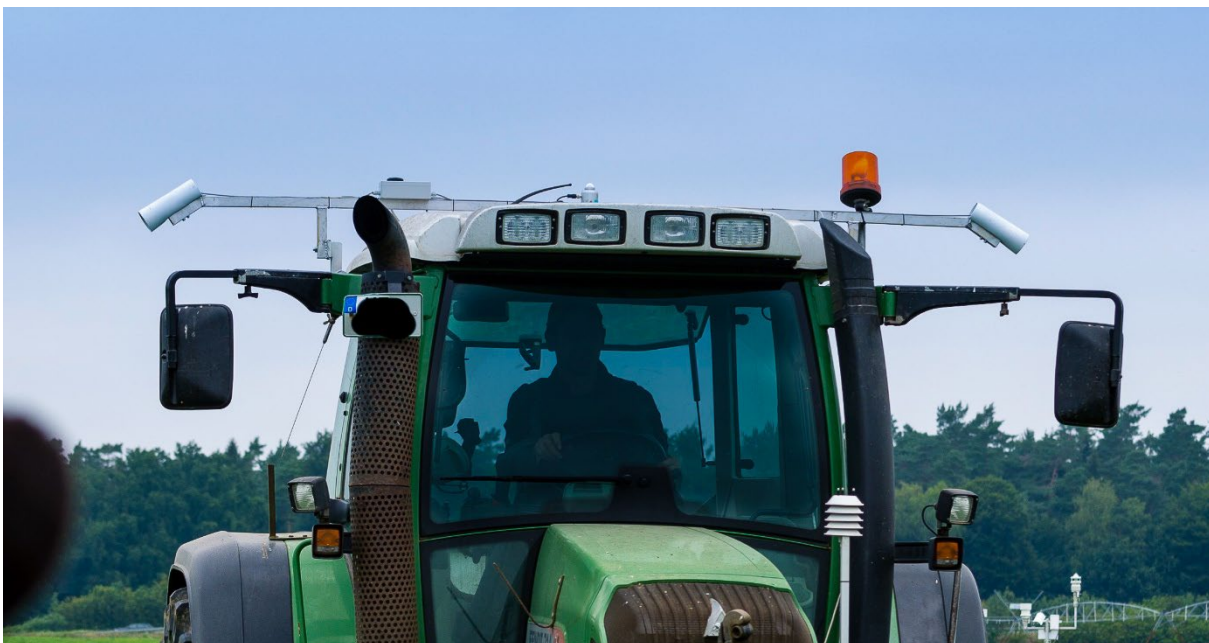


Sowohl die große als auch die kleine Messstation wurden im Versuchsjahr 2019 mittels mobiler Beregnungsmaschine mit Regneinzug beregnet. Beide Stationen wurden im jeweiligen Messzeitraum je fünf Mal mit einer durchschnittlichen Beregnungsgabe von ca. 25 mm beregnet.

4.2.4 Weitere Untersuchungen

Zusätzlich zu den stationären Messungen wurden in den Versuchsjahren 2018 und 2019 mobile Messungen mit dem Schlepper durchgeführt. Dazu wurden Sensoren zur Messung der Bestandtemperatur via Infrarot, der Lufttemperatur und ein Pyranometer zu Messung der Globalstrahlung an dem Schlepper montiert. Weiterhin wurde die Fahrtstrecke mittels GPS aufgezeichnet. Das Pyranometer und der GPS-Sensor wurden auf dem Schlepperdach montiert. Zwei Infrarotsensoren des gleichen Typs wie an den Stationen wurden an einer Verlängerung jeweils rechts und links am Schlepperdach befestigt und in einem 60°-Winkel ausgerichtet. Der Temperatursensor wurde über der Motorhaube montiert. Die mobilen Messungen wurden genutzt um anhand der Bestandtemperatur der gesamten Bestandsfläche auf potentiell unterschiedliche Wasserversorgungszustände der Pflanzen rückschließen zu können. Um den Wasserversorgungszustand bestmöglich zu erfassen und den CWSI zu errechnen, wurden die Fahrten zwischen 12 und 16 Uhr durchgeführt.

Abbildung 4-15: Schlepper mit installierten Sensoren bei einer Überfahrt im Sommer 2018 (Foto: INBW, Ostfalia)



Weiterhin wurden im Jahr 2018 ungestörte Bodenproben zur Bestimmung wichtiger bodenkundlicher Parameter entnommen, um die erhobenen Daten standortspezifisch

auszuwerten. Darüber hinaus wurden die Versuchsfelder in allen drei Versuchsjahren mit Hilfe einer Drohne überflogen und Video- und Fotomaterial der Flächen aufgenommen.

4.2.5 Auswertung und Zusammenfassung der Messergebnisse

Der Crop Water Stress Index...

.. oder kurz „CWSI“ ist ein Indikator zur Ermittlung des Trockenstresses bei Pflanzen. Er wurde erstmals 1981 von Idso et al. beschrieben und 1981 und 1988 von Jackson et al. parametrisiert und weiterentwickelt. Wichtigster Bestandteil ist die Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen der Temperatur der Blattoberfläche (T_c) und der Lufttemperatur (T_A). Vereinfacht berechnet sich der CWSI wie folgt:

$$CWSI = \frac{\Delta T_{\text{aktuell}} - \Delta T_{\text{optimal}}}{\Delta T_{\text{trocken}} - \Delta T_{\text{optimal}}}$$

mit

$$\Delta T = T_{\text{Bestand}} - T_{\text{Luft}}$$

Dabei beschreibt $\Delta T_{\text{aktuell}}$ die gemessene Temperaturdifferenz, während $\Delta T_{\text{optimal}}$ und $\Delta T_{\text{trocken}}$ fiktive Größen darstellen. Sie beschreiben den Zustand bei maximaler Wasserversorgung ($\Delta T_{\text{optimal}}$) und unter Trockenstress ($\Delta T_{\text{trocken}}$) und werden mit Hilfe eines agrarmeteorologischen Modells, basierend auf der Penman-Monteith Gleichung, aus meteorologischen Parametern berechnet. Der CWSI wird mit Werten zwischen 0 (kein Trockenstress) und 1 (maximaler Trockenstress) datiert.

4.2.5.1 Bestimmung des CWSI

Aufgrund der bereits in Kapitel 4.2.3.1 beschriebenen Witterungsbedingungen konnte im Versuchsjahr 2017 kein Trockenstress gemessen werden. Aufgrund dessen konnte der CWSI für dieses Versuchsjahr nicht erfolgreich berechnet werden. In den Versuchsjahren 2018 und 2019 war aufgrund der bereits beschriebenen klimatischen Gegebenheiten die Kalkulation des CWSI erfolgreich.

Die Tabelle 4-17 und Tabelle 4-18 zeigen die gemittelten CWSI-Werte zwischen 14 und 16 Uhr für die Versuchsjahre 2018 und 2019, dargestellt für den Zeitraum mit geschlossener

Vegetationsdecke. Nicht dargestellt sind Berechnungstage oder Tage mit Niederschlagsereignissen. Zusätzlich ist der mittlere Globalstrahlungswert zwischen 14 und 16 Uhr als Orientierungswert dargestellt, da der CWSI stark von der einfallenden Strahlung beeinflusst wird und somit Schwankungen in den CWSI-Werten verursacht werden können. Die Werte werden zu den Zeiten zwischen 14 und 16 Uhr dargestellt, da die Ergebnisse des Projektes zeigten, dass der CWSI zu diesen Zeiten am belastbarsten ist. Die Tabellen zeigen die berechneten Werte, die zum Treffen der Berechnungsentscheidungen herangezogen wurden.

Aufgrund der heißen und trockenen klimatischen Gegebenheiten konnten im Versuchsjahr 2018 präzise CWSI-Ergebnisse erzielt werden. Beispielhaft soll die Periode vom 26.06 bis 08.07.2018 näher betrachtet werden (vgl. Tabelle 4-17). Hier war die gemessene Globalstrahlung relativ hoch und die Schwankungen über die Tage vergleichsweise gering, weshalb auf klare Bedingungen rückgeschlossen werden kann und die Werte in dieser Periode als belastbar anzusehen sind. Die nähere Betrachtung der CWSI-Werte zeigt, dass der CWSI bis zur Beregnung am 29.06.2018 zunächst ansteigt und nach dieser über mehrere Tage leicht sinkt. Ab dem 03.07.2018 steigt der CWSI erneut an und erreicht bis zum Tag vor der Beregnung (07.07.2018) ein Maximum von 0,93. Es wird ersichtlich, dass der CWSI unter klaren Bewölkungsverhältnissen eine belastbare Aussage über den Wasserversorgungszustand der Pflanze liefert. Betrachtet man jedoch Tage, an denen die einfallende Globalstrahlung stark schwankt (vgl. 22./23.06 oder 25./26.06.2018) zeigt sich, dass der CWSI ebenfalls stark schwankt und die Aussagekraft des Index dann zweifelhaft ist.

Tabelle 4-17: Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2018 zwischen 14 und 16 Uhr am Standort "Niendorf groß". Dargestellt ist die Periode mit geschlossener Vegetationsdecke (20.06. – 05.08.2018). N = Niederschlagsereignis, B = Beregnung.

Datum	CWSI	Globalstrahlung (W m ⁻²)
20.06.2018	0.31	571.92
21.06.2018	N	469.18
22.06.2018	0.59	597.85
23.06.2018	0.27	212.14
24.06.2018	N	212.54
25.06.2018	0.33	259.59
26.06.2018	0.51	790.41
27.06.2018	0.48	723.05
28.06.2018	0.55	777.89
29.06.2018	B	753.29
30.06.2018	0.52	758.39
01.07.2018	0.49	802.56
02.07.2018	0.43	785.59
03.07.2018	0.49	733.90
04.07.2018	0.62	784.92

Datum	CWSI	Globalstrahlung (W m⁻²)
05.07.2018	0.77	776.07
06.07.2018	0.75	696.38
07.07.2018	0.93	751.98
08.07.2018	B	755.48
09.07.2018	0.42	564.22
10.07.2018	N	349.05
11.07.2018	N	456.63
12.07.2018	0.28	533.31
13.07.2018	0.48	679.57
14.07.2018	0.45	751.96
15.07.2018	0.38	638.71
16.07.2018	0.43	769.59
17.07.2018	0.62	756.18
18.07.2018	0.48	376.50
19.07.2018	0.75	726.96
20.07.2018	B	690.34
21.07.2018	0.30	410.71
22.07.2018	0.36	546.29
23.07.2018	0.47	765.68
24.07.2018	0.44	730.59
25.07.2018	0.59	714.59
26.07.2018	0.74	688.32
27.07.2018	B	688.22
28.07.2018	0.19	412.74
29.07.2018	0.44	666.58
30.07.2018	0.36	608.80
31.07.2018	0.30	461.41
01.08.2018	0.52	689.63
02.08.2018	0.66	708.35
03.08.2018	0.74	709.96
04.08.2018	B	705.20
05.08.2018	0.61	540.14

Im Versuchsjahr 2019 waren die Witterungsbedingungen wie bereits beschrieben nicht so beständig wie im Versuchsjahr 2018. Auch der Zeitraum mit geschlossener Vegetationsdecke war von kürzerer Dauer als 2018, da die Kartoffelbestände bedingt durch die lang anhaltende Kälte nach der Aussaat, einen weniger ausgeprägten Bestandsschluss aufwiesen. Tabelle 4-18 zeigt die

errechneten CWSI-Werte die für das Treffen von Beregnungsentscheidungen herangezogen wurden.

Beispielhaft wird für das Versuchsjahr 2019 die Periode vom 23. bis 28.7.2019 näher betrachtet. In dieser Periode war es sehr heiß und trocken (vgl. Abbildung 4-14) und die Strahlungsverhältnisse überwiegend klar und gleichbleibend (keine bis wenig Bewölkung). Die CWSI-Werte zeigen, dass der CWSI immer weiter ansteigt bis zur Beregnung am 28.07.2019. Weiterhin wird bei Betrachtung des 05.08.2019 ersichtlich, dass mit einer geringer werdenden Globalstrahlung auch der CWSI sinkt. Während am 04.08. der CWSI bei einer einfallenden Globalstrahlung von etwa 300 W m^{-2} noch bei 0,53 liegt, sinkt der CWSI mit Abnahme der Globalstrahlung auf 130 W m^{-2} auf 0,18. Auffallend sind die relativ hohen CWSI-Werte vom 1. bis 4. August, obwohl infolge Beregnung und Niederschlägen eine sehr günstige Wasserverfügbarkeit gegeben war. Der Blick auf die Kontrollfotos zeigt ab dem 31. Juli erste Abreifesympptome in Verbindung mit beginnender Krautfäule an einzelnen Blattspitzen. Offensichtlich nimmt die Verdunstungsleistung bereits in einem frühen Stadium der Abreife deutlich ab, während der Bestand an sich noch den gesamten Boden bedeckt.

Generell zeigt sich, dass die CWSI-Werte unter klaren Bedingungen belastbare Aussagen über den Wasserversorgungszustand der Pflanze und somit eine Beregnungsentscheidung liefern könnten, sofern keine Fehlerquellen, beispielsweise die Sichtbarkeit von Boden, die Messungen verfälschen. Aufgrund der noch existierenden Unsicherheiten des CWSI unter bestimmten Bedingungen bietet der CWSI derzeit noch keine eigenständige Aussage als Beregnungsentscheidung, jedoch kann dieser als zusätzliche Entscheidungsfindung miteinbezogen werden.

Tabelle 4-18 Gemittelter CWSI für das Versuchsjahr 2019 zwischen 14 und 16 Uhr am Standort "Niendorf groß". Dargestellt ist die Periode mit geschlossener Vegetationsdecke (04.07. – 05.08.2019). N = Niederschlagsereignis, B = Beregnung.

Datum	CWSI	Globalstrahlung (W m ⁻²)
04.07.2019	0.59	636.43
05.07.2019	0.37	285.94
06.07.2019	N	109.17
07.07.2019	0.62	394.17
08.07.2019	N	335.79
09.07.2019	0.33	360.69
10.07.2019	B	602.05
11.07.2019	N	331.93
12.07.2019	N	302.94
13.07.2019	N	357.55
14.07.2019	0.49	209.55
15.07.2019	0.30	228.17
16.07.2019	0.51	488.57
17.07.2019	0.61	738.25
18.07.2019	0.46	605.45
19.07.2019	0.55	640.67
20.07.2019	N	532.92
21.07.2019	0.64	637.56
22.07.2019	0.38	286.03
23.07.2019	0.53	729.98
24.07.2019	0.56	712.72
25.07.2019	0.52	535.48
26.07.2019	0.79	719.68
27.07.2019	0.88	631.43
28.07.2019	B	644.95
29.07.2019	N	233.55
30.07.2019	N	673.17
31.07.2019	N	572.39
01.08.2019	0.60	638.93
02.08.2019	0.57	528.30
03.08.2019	0.70	637.25
04.08.2019	0.53	300.60
05.08.2019	0.18	130.16

4.2.5.2 Auswertung der Messfahrten mit dem Schlepper

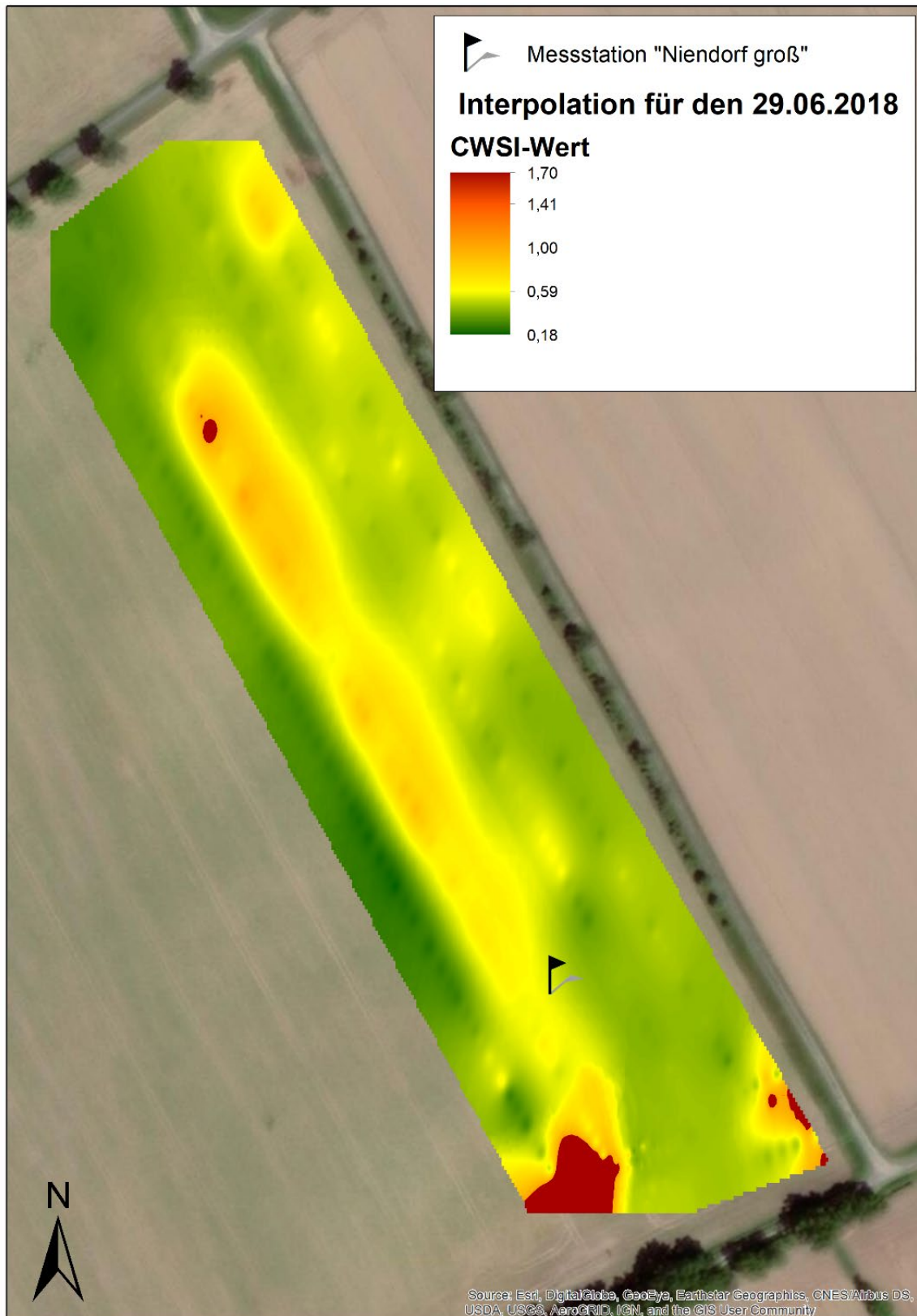
Die während der Schlepperüberfahrten erhobenen Daten wurden genutzt, um über die gemessene Bestandstemperatur den CWSI für die befahrene Fläche zu berechnen. Die Daten wurden im Sekundentakt aufgezeichnet, sodass für jeden GPS-Punkt Daten zur Luft- und Bestandstemperatur sowie für die Globalstrahlung vorlagen. Mit Hilfe der stationär erhobenen Daten konnten die für die CWSI-Berechnung benötigten Daten ergänzt werden und der CWSI punktuell links und rechts der gefahrenen Spur berechnet werden. Die punktuell berechneten Daten konnten verschnitten und interpoliert werden, sodass der CWSI für die gesamte Ackerfläche im Bereich der Befahrung abgeschätzt werden konnte.

Abbildung 4-16 zeigt beispielhaft für den 29. Juni 2018 die Interpolation der erhobenen Messdaten auf der befahrenen Ackerfläche. Es ist zu erkennen, dass die CWSI-Werte variieren, weshalb eine räumliche Varianz der Wasserverfügbarkeit vermutet werden kann. Der beprobte Schlag wurde in Streifen entsprechend der Arbeitsbreite des Regners beregnet, sodass nicht alle Bereiche des Ackers zeitgleich und gleichmäßig mit Wasser versorgt waren. Der Bereich um die Messstation bis zum östlichen Rand des Ackers wurde am Tag der Datenerhebung nach der Befahrung beregnet, während der Bereich westlich der Messstation (westliches Viertel) einen Tag zuvor (28.06.2018) beregnet wurde. Es ist zu erkennen, dass der Bereich um die Messstation und östlich dieser wärmer ist als der bereits beregnete Bereich westlich der Messstation.

Dennoch zeigt die Karte auch Bereiche, in denen der CWSI größer ist als eins. Eine mögliche Fehlerquelle könnte die Sichtbarkeit von Boden sein, denn trockener, dunkler Boden kann sich sehr stark erhitzen, wodurch die CWSI-Werte abgefälscht werden. Durch die Auswertung der eigenen Messdaten konnte gezeigt werden, dass der CWSI sensibel auf Schwankungen der Temperatur reagiert. Weiterhin ist zu beachten, dass die Kartoffeldämme im Vorgewende (südlicher Ackerrand) senkrecht zu den Hauptdämmen angelegt waren. Dadurch ist die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Befahrung des Vorgewendes ein größerer Anteil an Boden sichtbar ist, erhöht. Bei Betrachtung der Abbildung 4-16 zeigt sich, dass insbesondere die Bereiche am südlichen Ackerrand die höchsten Temperaturen aufweisen, wodurch diese Vermutung bestärkt wird.

Generell kann durch die mobilen Messungen mittels Schlepper und die Berechnung des CWSI anhand der erhobenen Daten gezeigt werden, dass die Wasserverfügbarkeit über die Ackerfläche variiert. Dennoch ist zu beachten, dass aufgrund der oben erwähnten möglichen Fehlerquellen der CWSI-Wert nicht als belastbar angesehen werden kann, sondern lediglich Tendenzen angeben kann zu Unterschieden in der Wasserverfügbarkeit, da die tatsächlichen Fehlerquellen nicht validiert werden können.

Abbildung 4-16: Interpolation der CWSI-Werte auf die gesamte Ackerfläche im Bereich der Befahrung, dargestellt für die Messfahrt am 29. Juni 2018 zwischen 11:46 und 12:04 Uhr am Standort „Niendorf groß“.



4.3 Beurteilung des CWSI als Instrument zur Bewässerungssteuerung

Für einen optimierten Einsatz der Bewässerung ist es notwendig, den Status der Wasserversorgung und damit das Risiko für einen ertrags- bzw. qualitätswirksamen Trockenstress eines Pflanzenbestandes zu kennen bzw. richtig einzuschätzen. Wenn bestimmte Grenzwerte erreicht werden, muss bei einem System zur Unterstützung von Bewässerungsentscheidungen rechtzeitig eine entsprechende Empfehlung ausgegeben werden.

Im Rahmen des Projektes konnte der CWSI für die Versuchsjahre 2018 und 2019 erfolgreich berechnet werden. Für Tage mit geeigneten meteorologischen und pflanzenphysiologischen Bedingungen zeigt der CWSI belastbare Ergebnisse über den Wasserversorgungszustand der Pflanzen. Sie entsprachen der Schätzung, die mit Hilfe des bewährten Vergleichsparameters der Bodenfeuchte über den %-Anteil an pflanzenverfügbarem Bodenwasser (% nFK) erfolgt war. Dementsprechend wäre eine Steuerung des Beregnungseinsatzes über die Bestimmung des CWSI prinzipiell möglich.

Die Berechnung führt allerdings nur bei klaren Strahlungsverhältnissen (keine bis sehr wenige Wolken) zu belastbaren Ergebnissen. Wenn die aktuelle Verdunstung durch die Witterung eingeschränkt ist (bedeckter Himmel, niedrige Temperaturen, hohe Luftfeuchtigkeit), nimmt die Aussagekraft ab. Selbst bei niedriger Bodenfeuchte reicht das Bodenwasser unter diesen Umständen häufig aus, den geringen Verdunstungsanspruch zu erfüllen und die Blatttemperatur relativ niedrig zu halten. Bei einer plötzlichen Wetteränderung hin zu verdunstungsfördernden Bedingungen käme eine Beregnungsempfehlung dann zu spät. Daher müssen immer der zeitliche Verlauf der CWSI-Werte und die korrespondierende Witterung sowie die Wettervorhersage mit einbezogen werden, um den Beregnungseinsatz rechtzeitig empfehlen bzw. steuern zu können.

Weiterhin fiel eine Fehlinterpretation der Wasserversorgung immer dann auf, wenn unbedeckter Boden die gemessenen Temperaturen des Bestandes beeinflusste. Das war der Fall, solange sich der Bestand in einem frühen Entwicklungsstadium vor dem Reihenschluss befand oder die Blattfläche und damit die Bodenbedeckung durch äußere Einflüsse im Vegetationsverlauf verringert wurde. Das kann z.B. der Fall sein durch Blattkrankheiten, Blattfraß, negative Reaktionen auf Pflanzenschutzmittel, Hagel, Sturm und während der Abreife. Diese Faktoren sollten zukünftig durch zusätzliche Messungen, eine andere Messtechnik und entsprechende Korrekturfaktoren berücksichtigt werden.

Bisher eignet sich der CWSI daher noch nicht als alleinige, eigenständige Methode zum Treffen von Beregnungsentscheidungen, da unter wechselhaften und bewölkten Witterungsbedingungen noch zu große Unsicherheiten bei der CWSI-Berechnung bestehen. Allerdings zeigte sich insbesondere im Versuchsjahr 2019, dass sich der CWSI eignet um ihn als zusätzlichen Faktor zum Treffen von Beregnungsentscheidungen heranzuziehen. Dennoch sind weitere Untersuchungen und Weiterentwicklungen des Modells notwendig, um den CWSI für eine Beregnungsentscheidung verwenden zu können.

Literaturverzeichnis

- Grzebisz, W., Gransee, A., Szczepaniak, W. and Diatta, J. 2013 The effects of potassium fertilization on water-use efficiency in crop plants. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 176(3), pp.355-374.
- Idso, S. B.; Jackson, R. D.; Pinter, P. J.; Reginato, R. J. (1981): Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. In: *Agricultural Meteorology* 24, S. 45–55.
- Jackson, R. D.; Idso, S. B.; Reginato, R. J.; Pinter, P. J. (1981): Canopy Temperature as a Crop Water Stress Index. In: *Water Resources Research* 17 (4), S. 1133–1138.
- Jackson, Ray D.; Kustas, William P.; Choudhury, Bhaskar J. (1988): A reexamination of the crop water stress index. In: *Irrig Sci* 9 (4), S. 309–317. DOI: 10.1007/BF00296705.
- Jákli, B., Tavakol, E., Tränkner, M., Senbayram, M. and Dittert, K. 2017 Quantitative limitations to photosynthesis in K deficient sunflower and their implications on water-use efficiency. *Journal of plant physiology* 209, 20-30.
- Jákli, B., Hauer-Jákli, M., Böttcher, F., Meyer zur Müdehorst, J., Senbayram, M. and Dittert, K. 2018 Leaf, canopy and agronomic water-use efficiency of field-grown sugar beet in response to potassium fertilization. *Journal of Agronomy and Crop Science* 204, 99-110.
- Koch, M., Busse, M., Naumann, M., Jákli, B., Smit, I., Cakmak, I., Hermans, C. and Pawelzik, E. 2019 Differential effects of varied potassium and magnesium nutrition on production and partitioning of photoassimilates in potato plants. *Physiologia plantarum* 166, 921-935. DOI: 10.1111/ppl.12846.
- LBEG (2019): NIBIS Kartenserver. Bodenübersichtskarte 1:50 000 (BUEK50). Hg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Hannover. Online verfügbar unter <https://nibis.lbeg.de/cardomap3/>, zuletzt geprüft am 13.08.2019.
- Putz, B. 1999 Kartoffel-Lexikon. 1. Aufl. Hamburg: Behr's Verlag. ISBN: 3-86022-478-6.
- Renger, M., et.al., (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis, Reihe Bodenökologie und Bodengenese Heft 40, 5 – 51,
- Riedel, A. und Fricke, E. (2015): Feldberechnung: Optimaler Einsatz, *Kartoffelbau* 66(5), 35-39
- Schärfe, D. 2020 Auswirkungen verschiedener Berechnungsintensitäten sowie Kaliumdüngestufen auf den Ertrag und ausgewählte Qualitätsparameter in Kartoffeln. Bachelorarbeit Agrarwissenschaften, Department für Nutzpflanzenwissenschaften an der Georg-August-Universität Göttingen, 41 p.

5 Zusammenfassung und Aspekte der Implementierung

Dominic Meinardi¹, Jürgen Grocholl², Martin Kraft³, Angela Riedel², Klaus Röttcher¹

1) Institut für nachhaltige Bewässerung und Wasserwirtschaft im ländlichen Raum, Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, 2) Landwirtschaftskammer Niedersachsen, 3) Thünen-Institut für Agrartechnologie

In Nordostniedersachsen ist Feldberegnung schon heute eine entscheidende Maßnahme im Ackerbau. Wirtschaftlich tragende Kultur ist auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben dieser Region die Kartoffel. Auf Grund des Klimawandels wird Feldberegnung auch in anderen Regionen Deutschlands an Bedeutung gewinnen. Ziel des Projektes ist in erster Linie die weitere Verbesserung der Beregnungssteuerung, um auf diesem Wege die Effizienz des Wassereinsatzes zu verbessern. Hierzu wurde am Beispiel der Kartoffel der Einsatz von Sensoren zur Messung der Bestandstemperatur untersucht.

Folgende Kernaussagen sind ohne Gewichtung im Folgenden aufgeführt:

- Die Feldversuche bestätigten die große Bedeutung einer angepassten Bewässerung für die Sicherung von Ertrag und Qualität im Kartoffelanbau in Nordostniedersachsen.
- Eine gute Kaliumversorgung ist für Ertrag und Qualität ebenfalls entscheidend, kann jedoch negative Effekte des Wassermangels nicht mindern.
- Die Niederschlagsmengen können sich schon kleinräumig, selbst in landschaftlich relativ homogenen Regionen (hier: norddeutsche Tiefebene, Radius < 20 km) stark unterscheiden. Dies unterstreicht den Bedarf an lokalen Messungen für standortbezogene Aussagen zum Bewässerungsbedarf auf landwirtschaftlichen Flächen.
- Die Messung der Bestandstemperatur und der daraus errechnete Crop Water Stress Index (CWSI) sind grundsätzlich zur Ermittlung der Wasserversorgung eines Pflanzenbestandes und potentiell zur Bewässerungssteuerung geeignet.
- Die Berechnung des CWSI benötigt eine hohe Zahl an Rohdaten und ist damit eine aufwändige Methode. Das komplexe Verfahren wurde an die Rahmenbedingungen der Projektregion in Nordostniedersachsen und die Kultur Kartoffel angepasst, unterliegt aber bestimmten Bedingungen und Voraussetzungen:
 - a. der Sonnenstand in Abhängigkeit der Ausrichtung des Infrarotsensors beeinflusst die Messung,
 - b. der Pflanzenbestand muss lückenlos geschlossen und gesund sein, da die Sichtbarkeit von Boden die Eingangsdaten und damit die Berechnung verfälscht. Auch kranke, abreifende oder sonst irreversibel geschädigte Blätter verfälschen den CWSI durch ihre reduzierte Transpirationsleistung,
 - c. die Messung benötigt klare Strahlungsverhältnisse, Bewölkung und wechselhafte Bedingungen führen zu nicht belastbaren Ergebnissen,

- d. eine Berechnung an Tagen, an denen ein Niederschlagsereignis auftrat oder der Bestand beregnet wurde ist nicht möglich.
- Bisher eignet sich der CWSI noch nicht als alleinige, eigenständige Methode zum Treffen von Beregnungsentscheidungen, er ist aber als zusätzlichen Faktor geeignet. Denkbar wäre z.B. eine Kombination mit einem agrarmeteorologischen Modell.
- Weitere Untersuchungen und Weiterentwicklungen des Modells sind notwendig, um den CWSI als alleinige Grundlage für eine Beregnungsentscheidung verwenden zu können.

5.1 Optimierung der Wassernutzungseffizienz

Betrachtet man die verschiedenen Methoden zur Ermittlung des Beregnungswasserbedarfs unterscheiden diese sich in ihrer Genauigkeit und ihrem Arbeitsaufwand, bzw. dem Bedarf an technischem Equipment. Neben den Beregnungsempfehlungen offizieller Stellen wie z.B. dem Fachverband Feldberegnung e.V. können Geräte wie Bodenfeuchtesensoren zum Einsatz kommen, oder ein Spaten. Oftmals ist die Durchführung einer Bewässerungsgabe abhängig von der Verfügbarkeit der vorhandenen Beregnungssysteme. Die Genauigkeit der Ermittlung des Beregnungswasserbedarfs kann durch einen höheren Arbeitsaufwand und den Einsatz von speziellem Equipment gesteigert werden, entspricht aber im Idealfall der logistischen Leistungsfähigkeit des Bewässerungsbetriebes. Der Einsatz einer sensorgestützten Beregnungssteuerung kann die Genauigkeit der Beregnungsempfehlung bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Arbeitsaufwandes ermöglichen und erlaubt eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Ackerschläge. Durch die immer größer werdende Verbreitung von teilflächenspezifischen, oder auch stationären Bewässerungssystemen, führt dies bei den Bewässerungsbetrieben zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und zu einer höheren Wassernutzungseffizienz.

Die Beregnungssteuerung auf Basis des CWSI konnte in der Bewässerungssaison 2019 bereits nahezu identische Ergebnisse von der als optimal betrachteten Beregnungssteuerung auf Basis der gravimetrischen Untersuchungen reproduzieren. Die berührungslose Messung mit der entsprechenden Sensorik ist somit in der Lage kongruente Ergebnisse im Vergleich mit den arbeitsintensiven, gravimetrischen Bestimmungen zu erzeugen. Auch wenn das zu diesem Zeitpunkt ermittelte Einsparpotential der sensorgestützten Beregnungssteuerung noch gering ist, so kann mit vergleichsweise geringem Arbeitsaufwand ein realistischer Pflanzenwasserbedarf ermittelt werden. Möglicherweise können die einzelnen Wassergaben durch die kontinuierliche Bestimmung des Wasserbedarfs geringer ausfallen als durch eine Bestimmung, die nur zu bestimmten Zeitpunkten durchgeführt wird. Dadurch können Sicherheitszuschläge bei der Bewässerung vermieden werden und das Einsparpotential wird erhöht. Eine Variation der Wassergaben wurde in diesem Projekt allerdings nicht untersucht.

Neben einem Einsparpotential des Beregnungswassers kann die Anwendung des CWSI zu einer Reduktion des Arbeitsaufwands beitragen, bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung der

Berechnungsempfehlung. Die im Projekt realisierte stationäre permanente CWSI-Messung liefert (bei geeigneten Wetterbedingungen) täglich einen aussagefähigen Wert zur Beschreibung der Trockenstresssituation des Bestands. Die Werte stehen dem Landwirt online auf seinem mobilen Endgerät zur Verfügung, so dass er die Stresssituation seines Bestandes täglich aus der Ferne verfolgen und frühzeitig mit der Bewässerungsplanung beginnen kann. Die Berechnungssteuerung erfolgt individuell für einzelne Kartoffelschläge. Ob eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Schläge möglich ist wurde in dieser Studie nicht betrachtet und müsste gegebenenfalls in weiteren Arbeiten untersucht werden.

Auf Basis einer Vielzahl von verschiedenen Szenarien hat das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) einen Sonderbericht über die Auswirkungen der Erderwärmung von 1,5 °C herausgegeben. Die Erwärmung von 1,5 °C wird mit hoher Wahrscheinlichkeit zwischen den Jahren 2030 und 2050 erreicht (IPCC 2018). Für Niedersachsen gibt der Klimareport Niedersachsen (DWD 2018) ausgehend von der Vergleichsperiode 1971-2000 einen Temperaturanstieg bis 2050 um etwa 1,4°C an und bis zum Jahr 2100 sogar um durchschnittlich 3,5°C. Das Wasserdefizit der klimatischen Wasserbilanz wird sich demnach kurzfristig um ein Viertel erhöhen und im langfristigen Planungshorizont verdoppeln.

Bereits in den drei aufeinander folgenden Trockenjahren 2018, 2019 und 2020 traten in Niedersachsen hohe bis sehr hohe Wasserbilanzdefizite in der Vegetationszeit auf, die einen überdurchschnittlichen Beregnungsaufwand notwendig machten oder ohne Bewässerung regional hohe Ertragsausfälle zur Folge hatten. Diese Szenarien werden in der Zukunft auf Grund des Klimawandels häufiger vorkommen. In der Vegetationsperiode wird durch die steigenden Temperaturen eine erhöhte Evapotranspiration erwartet. Die Menge an Niederschlagswasser wird sich im Sommer nicht unbedingt verringern, jedoch sorgen vermehrte Starkregenereignisse für einen höheren Oberflächenabfluss, was zu einer weiteren Reduzierung des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden führen kann. Der Zusatzwasserbedarf für die Bewässerung wird sich dadurch in Zukunft erhöhen. Die Klimawirkungsstudie Niedersachsen (Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen 2019) gibt für die Flachlandregionen in der fernen Zukunft bis 2100 eine starke Zunahme des Beregnungswasserbedarfes um etwa 15-30 % an. Die Klimawirkung wird im Osten Niedersachsens aufgrund der besonders negativen klimatischen Wasserbilanz am höchsten sein. Zusätzlich sind Gebiete mit sehr sandigen Böden, die wenig Wasser speichern können, stärker betroffen als Flächen mit gut wasserspeichernden Böden. Dies wird durch Ergebnisse aus dem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit geförderten Projekt „Netzwerke Wasser 2.0“ bestätigt, die für den Landkreis Gifhorn einen Zuwachs des Beregnungsbedarfs in naher Zukunft (2050) mit 11 % darstellen und für die ferne Zukunft (2100) von 23 % ausgehen (Scharun 2021).

Um dem erhöhten Bewässerungswasserbedarf in Zukunft entgegenzuwirken bedarf es daher unter anderem technischer Lösungen, die die Wassernutzungseffizienz erhöhen. Die Entwicklung und der Einsatz von Sensoren und Automatismen in der Landwirtschaft ist eine Möglichkeit dieses Ziel zu erreichen.

5.2 Perspektiven der Implementierung

Für die Bestimmung des CWSI werden eine Reihe aktueller Messdaten benötigt. Von zentraler Bedeutung sind die Bestandstemperatur, die Lufttemperatur und das Sättigungsdefizit der Luft (VPD), das sich aus der Lufttemperatur und Luftfeuchte berechnen lässt. Unentbehrlich sind aber auch aktuelle Werte der Globalstrahlung (zur Abschätzung der gesamten Nettostrahlung) und der Windgeschwindigkeit.

Während die Bestandstemperatur zwingend an dem zu charakterisierenden Pflanzenbestand selbst gemessen werden muss, besteht bei den Wetterdaten eventuell die Möglichkeit, diese von einer nahe gelegenen Wetterstation abzurufen, sei es eine betriebseigene, eine öffentliche oder eine überbetrieblich genutzte Wetterstation.

Die Messung der Bestandstemperatur erfolgt in jedem Fall berührungslos. Folgende Plattformen kommen in Frage:

1. Stationäre Messeinrichtung, z.B. an einem hohen Mast am Feldrand mit „Blick“ auf den Bestand,
2. mobile Temperaturmesseinrichtung an einem Schlepper,
3. drohnen-, flugzeug- oder satellitengestützte Temperaturmessung.

Stationäre Messanlagen mit Datenübertragung ins Internet haben den Vorteil, dass ihr täglicher Betrieb keinen Arbeitsaufwand und keine Präsenz erfordert. Nachteilig ist der Investitionsaufwand, einschließlich einer geeigneten Energieversorgung. Für eine möglichst zuverlässige Messung der Bestandstemperatur ist eine hohe Anbringung der Infrarottemperatursensoren wünschenswert. Die Höhe von Masten in einem Kartoffelfeld ist aber durch die eingesetzte Pflanzenschutztechnik begrenzt. Möglicherweise bietet sich in der Praxis eine Aufstellung am Feldrand (auch einige Meter vom Feldrand entfernt) mit entsprechend höheren Masten an. Da die Infrarotthermometer die Bestandstemperatur einer größeren (meist elliptischen) Fläche mitteln können, kann schon ein einzelner Sensor repräsentative Angaben liefern.

Mobile Messungen sind nur innerhalb eines begrenzten täglichen Zeitfensters aussagekräftig. Das geeignete Zeitfenster wurde im Projekt nicht untersucht; es liegt vermutlich in den Stunden ab dem solaren Mittag (Sonnenhöchststand). Schleppergestützte Messungen können deshalb in der Regel nicht mit Pflanzenschutzmaßnahmen kombiniert werden, da sie üblicherweise am frühen Morgen oder späten Abend erfolgen. Drohnengestützte Messungen der Bestandstemperatur gelten bisher als nicht sehr zuverlässig. Hier muss noch einiger Entwicklungsaufwand geleistet werden. Satellitenbasierte Messungen sind mit spezifischen Einschränkungen wie Wolken und festen Überflugzeiten konfrontiert, können in Zukunft aber dennoch eine Rolle bei der Trockenstressbestimmung spielen. Die Firma Hydrosat mit Standorten in den USA und Luxemburg untersucht bereits Perspektiven thermaler Satellitenaufnahmen für das Bewässerungsmanagement.

Die Einschränkung der CWSI-Messung auf die Vegetationszeit mit vollem Bestandsschluss macht es erforderlich, insbesondere vor dem Bestandsschluss mindestens ein anderes Verfahren zur Bestimmung des Bewässerungsbedarfs einzusetzen. Die CWSI-Messung kann nur ein Baustein sein, der den tatsächlichen aktuellen Trockenstress des Kartoffelbestands in seiner Hauptwachstums- und Knollenbildungszeit feststellen und übermitteln kann.

Zum Zeitpunkt dieses Berichts ist noch kein einsatzbereites System zur CWSI-Bestimmung auf landwirtschaftlichen Flächen am Markt verfügbar, obwohl sich das Messprinzip selbst in den wissenschaftlich begleiteten Experimenten des Projekts SeBeK als sensibles Verfahren zur Abschätzung des Trockenstress von Kartoffelbeständen erwiesen hat.

Literaturverzeichnis

- DWD (2018): Klimareport Niedersachsen. Hg. v. Deutscher Wetterdienst. Offenbach am Main, Deutschland. Online verfügbar unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimareport_ns/klimareport_ns_download_2018.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 01.06.2021.
- IPCC (2018): Summary for Policymakers. In Global Warming of 1.5°C. AN IPCC Special Report on the Impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufournier, C. Pean, R. Pidock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. (In Press).
- Klimakompetenznetzwerk Niedersachsen (2019): Klimawirkungsstudie Niedersachsen. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz. Hannover. Online verfügbar unter <https://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/klimawandel/klimawirkungsstudie-in-niedersachsen-176483.html>, zuletzt geprüft am 01.06.2021.
- Scharun, C. (2021): Potentielle Beregnungsbedürftigkeit von Ackerkulturen in den Landkreisen Gifhorn und Altmarkkreis Salzwedel. Netzwerke Wasser 2.0. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie, 16.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.lwk-niedersachsen.de/download.cfm/file/35815.html>, zuletzt geprüft am 03.06.2021.

Bibliografische Information:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikationen in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter www.dnb.de abrufbar.

Bibliographic information:
The Deutsche Nationalbibliothek (German National Library) lists this publication in the German National Bibliografie; detailed bibliographic data is available on the Internet at www.dnb.de

Bereits in dieser Reihe erschienene Bände finden Sie im Internet unter www.thuenen.de

Volumes already published in this series are available on the Internet at www.thuenen.de

Zitationsvorschlag – Suggested source citation:
Meinardi D, Schröder J, Riedel A, Röttcher K, Kraft M, Grocholl J, Dittert K (2021) Sensorgestützte Beregnung von Kartoffeln: Eine Entwicklung des Crop Water Stress Index für Nordostniedersachsen. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 120 p, Thünen Working Paper 179, DOI:10.3220/WP1628164998000

Die Verantwortung für die Inhalte liegt bei den jeweiligen Verfassern bzw. Verfasserinnen.

The respective authors are responsible for the content of their publications.



Thünen Working Paper 179

Herausgeber/Redaktionsanschrift – *Editor/address*
Johann Heinrich von Thünen-Institut
Bundesallee 50
38116 Braunschweig
Germany

thuenen-working-paper@thuenen.de
www.thuenen.de

DOI:10.3220/WP1628164998000
urn:nbn:de:gbv:253-202108-dn063811-8