



LfL

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Tropfbewässerung im Kartoffelbau



Bodenart	Durchfeuchtungszonen		
	Seitenansicht (Tropfstelle)	Aufsicht (Fläche)	Bodenanteil (Vol. %)
leicht (Sandböden)			
mittel (Lehmböden)			
schwer (Tonböden)			



Impressum

Herausgeber: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)
Vöttinger Straße 38, 85354 Freising-Weihenstephan
Internet: www.LfL.bayern.de

Redaktion: Institut für Landtechnik und Tierhaltung
Vöttinger Straße 36, 85354 Freising-Weihenstephan
E-Mail: ILT@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 71-3650

1. Auflage: März 2016

Druck: ES-Druck, 85356 Freising-Tüntenhausen

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL



Tropfbewässerung im Kartoffelbau

Ergebnisse aus dem Agro-Klima-Forschungsprojekt
Tropfbewässerung im Kartoffelbau

Projektförderung:

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

**Sven Kupke¹, Dr. Markus Demmel¹, Benjamin Blumental²,
Dr. Marc Marx², Robert Brandhuber², Dr. Martin Müller³**

¹LfL-Institut für Landtechnik und Tierhaltung

²LfL-Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz

³Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Zusammenfassung.....9
2	Einleitung10
3	Stand des Wissens.....11
4	Material und Methoden12
5	Ergebnisse15
5.1	Versuchsjahr 201015
5.2	Versuchsjahr 201119
5.3	Versuchsjahr 201224
5.4	Versuchsjahr 201329
5.5	Versuchsjahr 201434
5.6	Bewässerungsversuche im ökologischen Landbau38
5.7	Flüssigdüngung über Tropfschläuche (Fertigation)41
6	Versuchsbegleitende Bodenfeuchtemessungen.....44
6.1	Messverfahren und Laboruntersuchungen44
6.2	Beurteilung der Bodenfeuchtemessungen44
7	Diskussion der Ergebnisse48
8	Internet-gestütztes Bewässerungsmodell49
8.1	Rahmenbedingungen und Zielsetzungen der Bewässerung49
8.2	Bodenwasser-Modell Weihenstephan50
9	Literaturverzeichnis.....52

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abb. 1: Lage der Versuchsbetriebe in Bayern	13
Abb. 2: Versuchsanlage am Standort Regensburg (Thalmassing) 2010	15
Abb. 3: Versuchsanlage mit Tropfbewässerung in Roth Mitte Juli 2010	15
Abb. 4: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Freising, 2010: falls nFK<65 %: 4-5 mm/d	16
Abb. 5: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Roth, 2010: falls nFK<65 %: 4-5 mm/d	17
Abb. 6: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Regensburg, 2010: falls nFK<80 %: 4-5 mm/d	18
Abb. 7: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start (12. Mai) am Standort Regensburg, 2011: falls nFK-15 mm>Bodenfeuchte>65 % nFK: 4 mm/2d, falls Bodenfeuchte <65 % nFK: 8 mm/2d	21
Abb. 8: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start (12. Mai) am Standort Roth, 2011: falls nFK-15 mm > Bodenfeuchte > 65 % nFK: 4mm/2d, falls Bodenfeuchte < 65 % nFK: 8 mm/2d	22
Abb. 9: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start am Standort Roth, 2012: falls nFK- 15 mm > Bodenfeuchte > 65 % nFK: 4 mm/2d, falls Bodenfeuchte < 65 % nFK: 8 mm/2d	26
Abb. 10: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start am Standort Aichach, 2012: falls nFK-15mm > Bodenfeuchte> 65 % nKF: 4 mm/2d, falls Bodenfeuchte < 65 % nFK: 8 mm/2d	28
Abb. 11: Aufbau der Versuchsanlage in Aichach Ende Mai 2013	29
Abb. 12: Schäden durch Wassererosion nach anhaltend starken Niederschlägen vom 26.05. bis 03.06. in Aichach auf dem unteren Teil des Kartoffelfeldes (Foto vom 13.06.)	30
Abb. 13: Bewässerungsvariante am Standort Roth, 2013: falls Bodenfeuchte < 70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4mm/d	31
Abb. 14: Bewässerungsvariante am Standort Aichach, 2013: falls Bodenfeuchte < 70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4 mm/d	32
Abb. 15: Kartoffeldämme mit Tropfschlauch in der Dammkrone (Bild links) und im Zwischen-M-Damm (Bild rechts), Streifenversuch Roth 2014	35
Abb. 16: Versuchsaufbau und Pflanzenbestand am 17.06.2014 (Bild rechts Dammkronenverfahren, nFK <70 % 2 mm/d, nFK < 50% 4 mm/d), Streifenversuche Roth	35
Abb. 17: Bewässerungsvariante am Standort Roth, 2014: falls Bodenfeuchte <70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4 mm/d	36
Abb. 18: Aufbau der Bodenfeuchtemessanlagen auf 2 Standorten	45
Abb. 19: Lage der Sensoren hier beim M-Dammverfahren	45
Abb. 20: Bodenfeuchteverlauf der unbewässerten Kontrolle in 15 und 40 cm Tiefe im Jahr 2014	46
Abb. 21: Saugspannungsverlauf der unbewässerten Kontrolle in 15 und 40 cm Tiefe	46
Abb. 22: Bodenfeuchteverlauf der bewässerten Variante (2/4 mm) im M-Dammverfahren in 15 und 40 cm Tiefe	47
Abb. 23: Saugspannungsverlauf der bewässerten Variante (2/4 mm) im M-Dammverfahren in 15 und 40 cm Tiefe	47

Abb. 24: Links: Wasserverteilung im Dammkronenverfahren: Der komplette Damm ist bis in die Tiefe gut durchfeuchtet. Rechts: Wasserverteilung im M-Damm: Im sandigen Boden reicht die Kapillarität nicht aus, um den Damm im Bereich des Knollennestes ausreichend zu durchfeuchten	48
Abb. 25: Grundprinzip der Tropfbewässerung (Modellhafte Darstellung)	48
Abb. 26: Online-Anwendung zur Unterstützung bei der Planung, Umsetzung und Dokumentation von Bewässerungsmaßnahmen, ALB Bayern e.V.	51

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tab. 1: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2010	18
Tab. 2: Ertragseffekt durch Tropfbewässerung, Standort Regensburg 2010	19
Tab. 3: Daten Wetterstation Obersteinbach Standort Roth, Vieljähriges Mittel DWD (von 1981 bis 2010): Roth B. Nürnberg	20
Tab. 4: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Regensburg 2011	23
Tab. 5: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2011	23
Tab. 6: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Neuburg 2011	23
Tab. 7: Monatsmittelwerte Niederschlag am Standort Roth im Vergleich zum vieljährigen Mittel (DWD von 1981 bis 2010: Roth B. Nürnberg)	26
Tab. 8: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2012	27
Tab. 9: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2012	27
Tab. 10: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2012.....	28
Tab. 11: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2013	33
Tab. 12: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2013	33
Tab. 13: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2013.....	34
Tab. 14: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2013.....	34
Tab. 15: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2014.....	37
Tab. 16: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2014	38
Tab. 17: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Fürstenfeldbruck 2010.....	39
Tab. 18: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung (Frühkartoffeln), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014	40
Tab. 19: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung (Frühkartoffeln), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014.....	40
Tab. 20: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung (normaler Legetermin), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014.....	41
Tab. 21: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung (normaler Legetermin), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014.....	41
Tab. 22: Düngung nach guter fachlicher Praxis der LfL (Konventionell) und Aufteilung der Düngung bei Fertigation, 2010	42
Tab. 23: Düngung nach guter fachlicher Praxis der LfL (Konventionell) und Aufteilung der Düngung bei Fertigation, 2011-2013.....	42
Tab. 24: Zeitlich gestaffelte Ausbringung des Düngers durch Fertigation, 2010	43
Tab. 25: Zeitlich gestaffelte Ausbringung des Düngers durch Fertigation, 2011- 2013	43
Tab. 26: Ertragseffekte durch Bewässerung und Fertigation	44
Tab. 27: Verfahren der Tropfbewässerung (Beispiel: Sandboden, nFK = 10 Vol.-% Bewässerungsstart bei nFK = 50 %)	49

1 Zusammenfassung

Tropfbewässerung ist ein wasser- und energiesparendes Bewässerungsverfahren. Die Kosten für die Anschaffung und der Aufwand für das Verlegen und Bergen der Tropfschläuche sind allerdings hoch. Deshalb ist großes Augenmerk darauf zu legen, die Technik fachgerecht und effizient einzusetzen.

Bei der Tropfbewässerung von Kartoffeln muss entschieden werden, wo die Tropfschläuche vorteilhaft zu positionieren sind, ob auf der Dammkrone oder zwischen den Dämmen. Des Weiteren ist festzulegen, bei welchem Grad der Austrocknung die Bewässerung startet und wie hoch die Einzelgaben sein sollen. Entsprechend dem Witterungsverlauf sind dann die Wassergaben zu steuern.

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden an verschiedenen Standorten in Bayern von 2009 bis 2014 Feldversuche mit Tropfbewässerung von Speisekartoffeln durchgeführt mit Variation der Schlauchposition, des Bodenfeuchteschwellenwertes zum Start der Wassergaben und der Höhe der Wassergaben. Zudem wurde der Effekt von Fertigation (Flüssigdüngung über Tropfschläuche) bewertet. Auf Basis der Versuchsergebnisse wurde das internetbasierte Bodenwasser-Modell Weihenstephan entwickelt. Der Bewässerungslandwirt kann mit einer Bewässerungs-App seine Bewässerungsgaben fachgerecht und effizient planen und steuern.

Die Versuchsergebnisse haben gezeigt, dass bei der Positionierung der Tropfschläuche in der **Dammkrone** der durchwurzelte Teil des Bodens, der durch die Bewässerung durchfeuchtet wird, besonders groß ist. Deshalb bietet das Dammkronenverfahren bei der Terminierung und Dosierung der Einzelwassergaben den größten Gestaltungsspielraum. Das weniger arbeitsaufwendige und in der reduzierten Variante erheblich kostengünstigere **Zwischendammverfahren** (Schläuche liegen zwischen den Dämmen, in der reduzierten Variante nur zwischen jedem zweiten Damm) war dagegen vor allem auf Sandböden und bei Trockenheit zu Beginn der Bewässerungsperiode weniger effizient. Offensichtlich waren die Böden wegen der tiefer gelegenen Schlauchposition nicht in der Lage, das verabreichte Zusatzwasser in ausreichend hohem Maß in die Dämme zu leiten und pflanzenverfügbar zu speichern. Trockene und sandige Böden leiten Wassergaben in die Tiefe statt in die Breite. Deshalb profitieren die Kartoffelpflanzen beim Zwischendammverfahren unter diesen Bedingungen nicht umfänglich von den verabreichten Wassergaben. Bei frühem Bewässerungsstart schnitt das Zwischendammverfahren allerdings besser ab. Es bestand dann ein zeitiges Signal für die Kartoffelpflanzen, das Wurzelwachstum in der Durchfeuchtungszone unter den Zwischendämmen zu aktivieren.

Die im Projekt erfolgreich erprobte Bewässerung im **M-Dammverfahren** macht es möglich, die Kostenvorteile des reduzierten Zwischendammverfahrens mit der hohen Wassereffizienz des Dammkronenverfahrens zu verbinden. Die kompakte Dammform und die erhöhte Position der Tropfschläuche (über der gepflanzten Mutterknolle) zwischen jedem zweiten Damm führen zu einer teilweisen Durchfeuchtung des Dammkernes. Die Kartoffelpflanzen haben so bereits im frühen Jugendwachstum die Möglichkeit, die verabreichten Bewässerungsgaben mit ihren Wurzeln zu erschließen. Das größere durchfeuchtete und durchwurzelte Bodenvolumen macht es z.B. möglich, auf einem Sandboden mit einer nFK von 10 Vol.-% 25 % höhere Einzelwassergaben als im reduzierten Zwischendammverfahren pflanzenverfügbar zu verabreichen.

Explizit bei Anwendung der Zwischendammverfahren traten im Jahr 2010 auf Sandböden erhebliche Qualitätsminderungen durch Kartoffelschorf (Bakterium *Streptomyces scar-*

bies) auf. Die Bakterien infizieren bevorzugt junge Knollen und sie benötigen viel Sauerstoff. Deshalb ist der Krankheitsdruck auf leichten Böden deutlich größer als auf schweren. Bewässerung kann die Anfälligkeit des Knollengewebes erhöhen, der Befall war bei der unbewässerten Variante entsprechend deutlich niedriger. Im Dammkronenverfahren haben die täglichen Wassergaben offensichtlich soweit Sauerstoff aus dem für Knollen und Bakterien wachstumsrelevanten Bereich verdrängt, dass es zu keinem ausgeprägten Schorfbefall kam. Auf leichten, mit Schorf verseuchten Böden sollte deshalb dem Dammkronenverfahren der Vorzug gegeben werden.

Durch den Einsatz von geeigneter Tropfbewässerung ließen sich die Kartoffelerträge und -qualitäten auch bei ungünstigem Witterungsverlauf mit hoher Zuverlässigkeit sichern. Landwirtschaftliche Betriebe im Speisekartoffelanbau können damit ihre eingegangenen Verpflichtungen aus Lieferverträgen mit dem Handel nachkommen. Auf allen untersuchten Standorten war es möglich, die Erträge durch Tropfbewässerung zu steigern. Der Mehrertrag gegenüber der Variante ohne Bewässerung war aber in hohem Maße abhängig von der Menge und Verteilung der Niederschläge sowie der Bodenqualität am Standort. Müssen im Mittel der Jahre nur kürzere Trockenphasen mit Bewässerung überbrückt werden, kann auf flexiblere und kostengünstigere Alternativen wie Beregnungsmaschinen mit Regnereinzug zurückgegriffen werden.

Die Inbetriebnahme von Tropfbewässerungstechnik verursacht nach erfolgter Installation kaum Aufwand. Deshalb empfiehlt sich bei absinkender Bodenfeuchte (z. B. ab 70 % der nutzbaren Feldkapazität) ein zeitiger Bewässerungsstart mit niedrigen Einzelgaben, die jedoch in täglichen oder zweitägigen Abständen erfolgen sollten. Erst bei weiterem Absinken der Bodenfeuchte und Ausbleiben von Niederschlägen ist eine Erhöhung der Bewässerungsintensität angebracht, die den Wasserbedarf der Kartoffelpflanzen vollständig deckt. Mit der Internetanwendung des „Bodenwasser-Modells Weihenstephan“ steht dem Bewässerungslandwirt für die Umsetzung dieses Konzepts ein vielseitiges und fachlich fundiertes Arbeitsmittel zur Verfügung.

Derzeit sind die Auswahlmöglichkeiten für Gerätetechnik zum Verlegen und vor allem zum Bergen der Tropfschläuche am Saisonende gering. Anwender von Tropfbewässerung arbeiten zumeist mit Eigenkonstruktionen, die auf das jeweilige Pflanzverfahren und die individuelle Betriebssituation abgestimmt sind. Der Einsatz der am Markt verfügbaren Hebe- und Wickelgeräte (Bergung) bereitet oft noch große Probleme. Das Risiko, dass es beim Aufspulen auf die Trommel zu Beschädigungen am Schlauch und der Plastiktrommel kommt ist vor allem bei großen Schlaglängen hoch. Erste Ansätze zur Prüfung und Optimierung der Verlegetechnik wurden im Projekt durchgeführt. An einer grundsätzlichen Verbesserung der Verfahrenstechnik beim Verlegen und Bergen von Tropfschläuchen wird am Institut für Landtechnik und Tierhaltung der LfL seit 2013 in einem gesonderten Projekt gearbeitet.

2 Einleitung

Bei der pflanzlichen Erzeugung spielt Wasser eine grundlegende Rolle. In Abhängigkeit der klimatischen Standortbedingungen, der Speichereigenschaften des Bodens und dem Aneignungsvermögen der Pflanzen kann zur Gewährleistung der landwirtschaftlichen Produktion (aride und semiaride Regionen) oder aber zur Ertrags- und Qualitätssicherung (humide Regionen) eine künstliche Bewässerung erforderlich sein.

Weltweit werden etwa 20 Prozent der nutzbaren Ackerfläche bewässert. Der Beitrag dieser bewässerten Flächen an der globalen Nahrungsmittelerzeugung wird auf circa 40 Prozent geschätzt. Die dafür beanspruchten Wasserressourcen sind enorm. Mehr als 70 Prozent des globalen Wasserverbrauchs entfallen auf die Bewässerungslandwirtschaft (FAO, 2011).

In Deutschland werden derzeit aufgrund der günstigen klimatischen Bedingungen nur etwa drei Prozent der Ackerfläche bewässert. In Bayern sind es ca. 0,5 %, überwiegend gärtnerische Freilandkulturen, gefolgt von Kartoffeln (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2010). Etwa 2.200 bayerische landwirtschaftliche Betriebe haben die Möglichkeit, Flächen zu bewässern (INVEKOS-Auswertung 2015).

Laut neuesten Prognosen (UMWELTBUNDESAMT, 2015) werden infolge des Klimawandels die Temperaturen in Deutschland weiter steigen, es wird häufiger zu Trockenperioden kommen, in der Vegetationsperiode werden Starkregenereignisse auf Kosten einer gleichmäßigen Niederschlagsverteilung zunehmen. Ackerbausysteme müssen an die sich ändernden Umweltbedingungen angepasst werden. So werden auch in der bayerischen Landwirtschaft zur Sicherung hoher Erträge und Qualitäten insbesondere bei Kulturen mit einer geringen Trockenstresstoleranz, wie der Kartoffel (VAN LOON, 1981; OPENA UND PORTER, 1999), zunehmend Bewässerungsmaßnahmen erforderlich sein. Diese sollten im Hinblick auf insbesondere in Trockenperioden konkurrierende Nutzungen (Trinkwasser, Brauchwasser, Kühlwasser) und weiter steigende Energiepreise möglichst wasser- und energieeffizient erfolgen.

Ein Lösungsansatz kann dabei in der Tropfbewässerung (engl.: drip irrigation oder trickle irrigation) liegen. Diese Form der Bewässerung ist jedoch gegenüber klassischen Beregnungsverfahren teuer in der Anschaffung und aufwendig in der Handhabung. Deshalb muss besonders bei dieser Bewässerungstechnik auf fachgerechten und effizienten Einsatz geachtet werden.

An verschiedenen Standorten in Bayern wurden mehrjährig randomisierte Feldversuche mit Tropfbewässerung von Speisekartoffeln durchgeführt. Die zu untersuchenden Fragestellungen waren landtechnischer und pflanzenbaulicher Art. Sie umfassten die situationsbezogene Prüfung der geeigneten Schlauchposition, den sinnvollen Bodenfeuchtegrenzwert, ab dem bewässert wird und die darauf abgestimmte Höhe der Einzelwassergaben. Zudem wurde der Effekt von Fertigation (Flüssigdüngung über Tropfschläuche) bewertet.

3 Stand des Wissens

Eine Tropfbewässerungsanlage besteht in der Regel aus drei Bestandteilen: der Steuer- und Regeleinheit, der Verteilerleitung sowie den Tropfleitungen mit den Tropfelementen. Die Steuer- und Regeleinheit dient der Reduzierung eines eventuell zu hohen Druckes in der Zuleitung. Außerdem wird der Volumendurchfluss geregelt, die notwendige Düngergabe dosiert und das Wasser von Bestandteilen, die zum Verstopfen der Tropfelemente führen können, gereinigt. Über die Verteilerleitung wird das Wasser mit einem vergleichsweise niedrigen Wasserdruck von weniger als 2 bar den einzelnen Tropfschläuchen zugeführt. Die Installation der Tropfleitungen kann sowohl auf der Bodenoberfläche (engl.: Surface Drip Irrigation) als auch darunter (engl.: Subsurface Drip Irrigation) erfolgen. Durch Tropfer (sog. Emitter), welche in regelmäßigen Abständen von 30 bis 80 Zentimetern auf den Tropfleitungen verteilt sind, wird das Wasser schließlich mit geringer Intensität (1 bis 4 mm/h) unmittelbar am Wurzelbereich der Pflanze abgegeben. Ziel der

Tropfbewässerung ist es, den Wassergehalt des Bodens nahe der Feldkapazität zu halten (PASCHOLD, 2010; SCHÜSSELER UND ZABELTITZ, 2004).

Durch diese direkte, exakte und bedarfsgerechte Art der Wasserapplikation werden Verluste, beispielsweise durch Verdunstung, Versickerung, Oberflächenabfluss oder Windabdrift, vermieden bzw. minimiert. Dies führt zu einer sehr hohen Wassernutzungseffizienz (NIR, 1982; DASBERG, 1999). So belegen Studien bei verschiedenen Feldkulturen, dass der Ertrag unter Tropfbewässerung im Vergleich zu anderen Bewässerungsverfahren bei deutlich geringerem Wasserverbrauch gleich bleibt oder sogar ansteigt (PHENE ET AL., 1992; DETAR ET AL., 1994; DETAR, ET AL., 1996; NEIBLING UND BROOKS, 1995; LAMM UND TROOEN, 2003). Weiterhin ist die Tropfbewässerung sehr energieeffizient (NIR, 1982; DASBERG, 1999). Dies liegt an dem bereits erwähnten niedrigen Arbeitsdruck und der hohen Wassereffizienz (geringere zu fördernde Wassermenge im Vergleich zu anderen Bewässerungsverfahren) (BATTY, ET AL., 1975; SHOJI, 1977).

Ein weiterer Vorteil der Tropfbewässerung liegt darin, dass dem Wasser auch Nährstoffe beigemischt werden können (Fertigation). Dadurch wird eine bedarfsgerechte, hochfrequentierte Düngung möglich (NIR, 1982; DASBERG, 1999). Zahlreiche Untersuchungen zur Fertigation liefern jedoch keine eindeutigen Ergebnisse bezüglich eines Ertragseffektes (vgl. Camp, 1998).

Als weitere Vorteile der Tropfbewässerung werden ein geringer Arbeitsaufwand während der Bewässerungsperiode, ein reduzierter Krankheitsdruck infolge trockener Blätter und ein geringerer Ungras- und Unkrautdruck infolge der nur partiellen Bodenbefeuchtung genannt. Außerdem ist die Tropfbewässerung im Vergleich zu anderen Verfahren unabhängig von Tageszeit (Verdunstung) und Wind (NIR, 1982; DASBERG, 1999). Diesen Vorteilen stehen allerdings hohe Investitionskosten und ein hoher Arbeitsaufwand beim Verlegen und Bergen der Schläuche gegenüber (KTBL, 2009).

Aufgrund der aufgeführten Vorteile gewinnt die Tropfbewässerung vor dem Hintergrund des Klimawandels und einer zunehmenden Wasserknappheit im internationalen Forschungsfeld immer mehr an Bedeutung.

4 Material und Methoden

Die Tropfbewässerung ist in der Zeit von 2009 bis 2014 in bedeutenden Kartoffelanbauregionen Bayerns getestet worden. Die Versuche wurden auf Flächen von Praxisbetrieben angelegt und fanden in den Landkreisen Neuburg-Schrobenhausen (ND), Regensburg (R), Freising (FS), Fürstenfeldbruck (FFB), Roth (RH), Aichach-Friedberg (AIC) und Eichstätt (EI) statt (Abb. 1). Mit Ausnahme der Bewässerung wurde die Bestandesführung jeweils betriebsüblich durchgeführt.

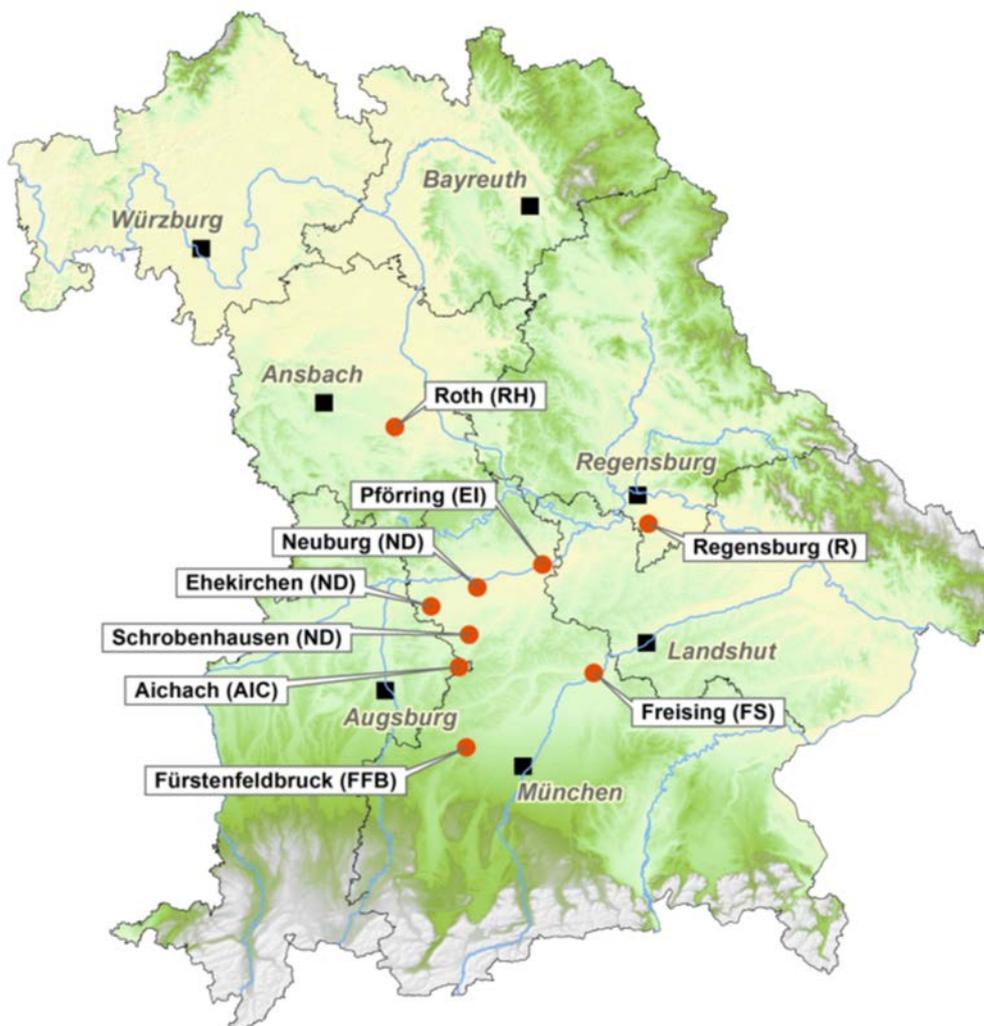


Abb. 1: Lage der Versuchsbetriebe in Bayern

Die Versuche fanden auf Sand-, Lehm- und Tonböden statt, die nutzbare Feldkapazität der Böden variierte entsprechend in einem weiten Bereich. Die Versuchsflächen hatten im Einzelnen folgende Eigenschaften:

- Betrieb 1, Ehekirchen (ND), schluffiger Lehm (Lu), Höhe 373 m, durchschnittlicher NS 767 mm, nFK 20 Vol. %,
- Betrieb 2, Regensburg (R), schluffiger Ton (Tu3), Höhe 365 m, durchschnittlicher NS 681 mm, nFK 17 Vol. %,
- Betrieb 3, Freising (FS), schluffiger Lehm (Lu), Höhe 431 m, durchschnittlicher NS 944 mm, nFK 21 Vol. %,
- Betrieb 4, Fürstenfeldbruck (FFB), schwach toniger Lehm (Lt2), Höhe 405 m, durchschnittlicher NS 887 mm, nFK 17 Vol. %,
- Betrieb 5, Roth (RH), schwach lehmiger Sand (Sl2), Höhe 431 m, durchschnittlicher NS 771 mm, nFK 12 Vol. %,
- Betrieb 6, Neuburg (ND), stark lehmiger Sand (Sl4), Höhe 430 m, durchschnittlicher NS 767 mm, nFK 21 Vol. %,

- Betrieb 7, Aichach (AIC), schluffiger Lehm (Lu), Höhe 460 m, durchschnittlicher NS 767 mm, nFK 20 Vol. %,
- Betrieb 8, Pförring (EI), schluffiger Lehm (Lu), Höhe 373 m, durchschnittlicher NS 723 mm, nFK 16 Vol. %,
- Betrieb 9, Schrobenhausen (ND), mittel lehmiger Sand (S13), Höhe 413 m, durchschnittlicher NS 767 mm, nFK 13 Vol. %,

[Daten durchschnittlicher NS: Agrarmeteorologie Bayern, Vieljähriges Mittel DWD (von 1981 bis 2010)]

Neben den verschiedenen Bewässerungsvarianten wurde der Nutzen von Flüssigdüngung über Tropfschläuche (Fertigation) betrachtet. In diesen speziellen Varianten war die N/P/K-Düngung zeitlich unterschiedlich aufgeteilt. Neben der Grunddüngung zum Zeitpunkt des Kartoffellegens sind die noch fehlenden Mengen nachträglich in bis zu 15 Einzelgaben mit mindestens einwöchigem Abstand verabreicht worden.

Bewässert wurde mit Hilfe eines Modells, welches auf der täglichen Bilanzierung des Bodenwassers basiert: Verdunstung und Versickerung werden vom vorhandenen Bodenwasser abgezogen, Niederschlag und Wassergaben hinzu addiert. Die Verdunstung wird mit der Gras-Referenz-Methode abgeschätzt (ALLEN ET AL. 1998), wobei die Anpassung der Referenzverdunstung durch kulturart- und stadienspezifische k_c -Faktoren (PASCHOLD ET AL. 2011) und weitere Faktoren erfolgt. Die weiteren Faktoren sind variabel und wurden im Rahmen des Projektes ermittelt. Sie berücksichtigen die variable Feuchte des Bodens und der Bodenoberfläche.

In den ersten drei Versuchsjahren wurden zur fortlaufenden Dokumentation und Kontrolle der Vorgehensweise Bodenproben genommen und die Bodensaugspannung, die Rückschlüsse auf den Bodenwassergehalt zulässt, wurde in ausgewählten Varianten mit Tensiometern gemessen. Diese Messungen wurden ab dem vierten Versuchsjahr erweitert. Neben der Kenngröße Bodensaugspannung ist durch FDR-Messsonden der Bodenfeuchtegehalt kontinuierlich in unterschiedlichen Bodentiefen direkt erfasst worden.

Der Versuchsaufbau wurde 2009 bis 2012 durchwegs als Exakt-Parzellenversuch umgesetzt. Alle Varianten waren vierfach wiederholt und der Versuch war randomisiert. Die Parzellengröße hatte eine Breite von jeweils drei Meter und eine Länge von zehn Metern. Beprobt und beerntet wurden immer die mittleren beiden Parzellendämme. Ab dem fünften Versuchsjahr wurde neben einem Exakt-Parzellenversuch ein großflächiger Streifenversuch angelegt, der im letzten Versuchsjahr erweitert und wiederholt wurde. An der Variantenbreite im Streifenversuch von 3 m wurde festgehalten, die Schlaglänge betrug 200 m. An der Verfahrensweise, die mittleren beiden Kartoffeldämme zu untersuchen, wurde beim Streifenversuch festgehalten. Die Kopfeinheit der Bewässerungstechnik war zum Schutz in einem Container montiert (Abb. 2). Die einzelnen Regelkreise wurden von einem Bewässerungscomputer vor Ort angesteuert, der durch Modem und SIM-Karte aus der Ferne angesteuert bzw. programmiert werden konnte. Auf diese Weise war sichergestellt, dass für ein tägliches Bewässern kein Mitarbeiter zwingend vor Ort sein musste.



Abb. 2: Versuchsanlage am Standort Regensburg (Thalmassing) 2010

5 Ergebnisse

5.1 Versuchsjahr 2010

Im Versuchsjahr 2010 wurden Tropfbewässerungsversuche auf einem Sand-, einem Lehm- und einem Tonboden durchgeführt. Zum Einsatz kamen für mehrjährige Nutzung ausgelegte Tropfschläuche mit einem Tropferabstand von 30 cm und einer Durchflussrate von 1 Liter je Stunde. Es wurden Varianten angelegt, in der die Position der Tropfschläuche in der Dammkrone (Dammkronenverfahren = DKV), zwischen jedem Damm (Zwischendammverfahren = ZDV) und zwischen jedem zweiten Damm (reduziertes Zwischendammverfahren = red. ZDV) variierte.

Nachdem es im April nur geringfügig geregnet hatte, war der Witterungsverlauf im Mai von kühlen Temperaturen und immer wieder einsetzenden Niederschlägen gekennzeichnet. Im Juni ließen die Niederschläge nach und es wurde allmählich wärmer. Eine Woche nach Beginn der Trockenperiode (zweite Junihälfte) errechnete das Bewässerungsmodell an den Standorten R und RH deutlich sinkende Bodenwasserwerte, denen mit täglichen Bewässerungsgaben entgegengesteuert wurde. Die Bestände ohne Bewässerung reagierten auf dieses Absinken mit stagnierendem Wachstum und im Anschluss mit dem allmählichen Abbau oberirdischer Biomasse. Diese Trockenstresssymptome waren ab Anfang Juli im Pflanzenbestand deutlich zu beobachten und nahmen in den folgenden Tagen stetig zu (Abb. 3).



Abb. 3: Versuchsanlage mit Tropfbewässerung in Roth Mitte Juli 2010

Am Standort FS (Abb. 4) wurde diese niederschlagsfreie Zeit durch mehrere Gewitterschauer unterbrochen, die im Gegensatz zu den anderen Standorten den Bodenwasservorrat zum Teil auffüllten und dadurch Wasserengpässen entgegen wirkten. Die Berechnungen aus dem Bodenwassermodell zum Erhalt einer nutzbaren Feldkapazität von 65 % machten auch an diesen Standort Bewässerungsgaben im Juli erforderlich. Betrachtet man die gesamte Vegetationsperiode an diesem Standort, wären Bewässerungsgaben nach Modell nur in einem Zeitraum von 10 Tagen erforderlich gewesen. Daraus entstehende Ertragseffekte durch Bewässerung waren auf dem Versuchsfeld in Freising nicht statistisch zu belegen und sind auch tendenziell nicht erkennbar. Die erzielte Kartoffelernte lag im Durchschnitt auf einem hohen Ertragsniveau von 730 dt/ha.

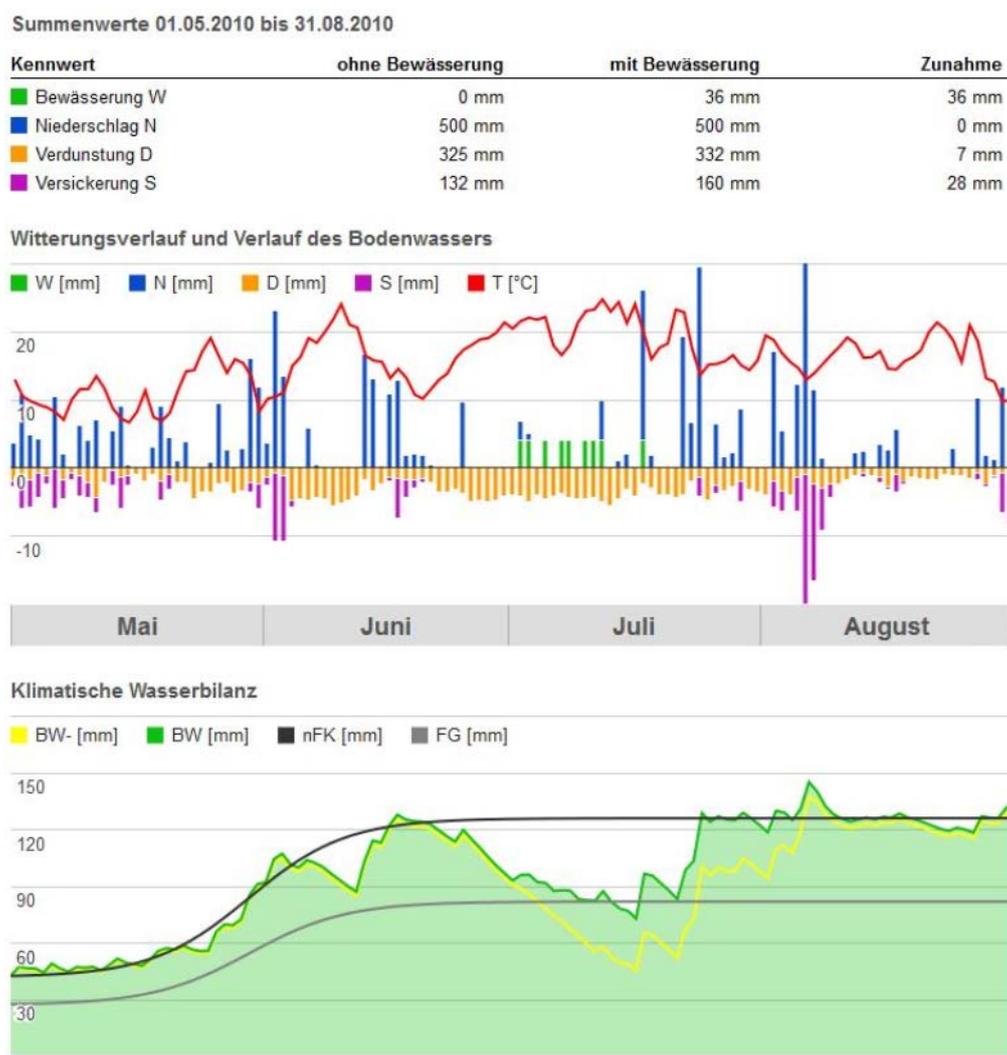


Abb. 4: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Freising, 2010: falls $nFK < 65\%$: 4-5 mm/d

An den Standorten R und RH wurde mit der Bewässerung etwa eine Woche nach Beginn der Trockenphase mit zunächst 4 mm je Tag begonnen. Danach wurde die Wasserapplikation auf 5 mm je Tag erhöht. Mit dem Einsetzen leichter Niederschläge Mitte Juli aber wieder auf 4 mm je Tag reduziert. Durch diese Bewässerungsgaben konnten die Bodenwassergehalte rechnerisch über den angestrebten Feuchtegrenzwerten von 65 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK) in RH (Sandboden) bzw. 80 % nFK in R (Tonboden) gehalten werden (Abb. 5 und 6). Diese Vorgehensweise erfolgte sowohl im Dammkronen-

verfahren (DKV), als auch bei den beiden Verfahren mit der Tropfschlauchposition zwischen den Kartoffeldämmen (ZDV und red. ZDV). Im Juni wurden am Standort Roth durch acht Bewässerungsgaben 32 mm und im Juli mit zweiundzwanzig Gaben 97 mm verabreicht. Im gleichen Zeitraum bei nahezu identischen Bewässerungsgaben wurde in Regensburg insgesamt 130 mm an Zusatzwasser gegeben.

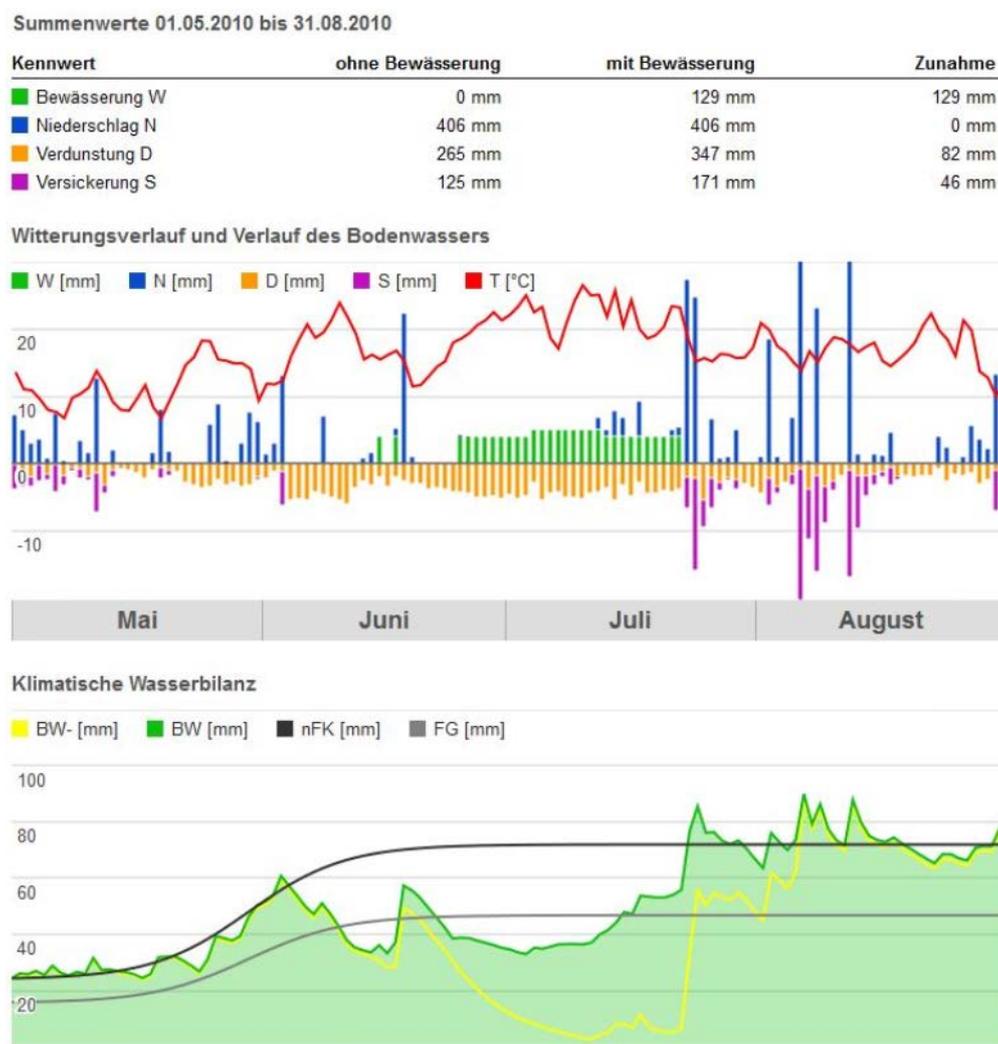


Abb. 5: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Roth, 2010: falls $nFK < 65\%$: 4-5 mm/d

Ergiebige Niederschläge am 23. und 24. Juli ($RH = 50$ mm und $R = 28$ mm) füllten die Bodenwasservorräte wieder auf ein Niveau, welches weitere Bewässerungsgaben in den folgenden Tagen nicht erforderlich machte. Am Standort RH kam es daraufhin in den unbewässerten Varianten, unterstützt durch weitere Niederschläge im August, in hohem Maße zur Bildung von neuer oberirdischer Biomasse. Trotz des späten Zeitpunktes hatte diese Neubildung kaum Qualitätsminderungen des Erntegutes (Kindelbildung u. a.) zur Folge. Vielmehr wurde ohne Bewässerung in diesem Zeitraum bis Mitte September, Proberodungen zu Folge, ca. 50 % des Gesamt-Ernteertrages gebildet.

Am Standort RH wurde in der nicht bewässerten Kontrollvariante ein Ertrag von 470 dt/ha geerntet (Tab. 1). Durch Bewässerung mitzeitigem Start ab 15 cm Wuchshöhe, sofern die nutzbare Feldkapazität (nFK) unter 65 % abgesunken war, wurde im Dammkronenverfahren ein Mehrertrag von 219 dt/ha erzielt. Das entspricht einer Ertragssteigerung von 46 %.

Vergleichbar mit diesem Ergebnis ist das Ertragsgeschehen, wenn die Tropfschlauchposition zwischen den Dämmen liegt (ZDV = +44 %). Das Verfahren mit nur einem Tropfschlauch zwischen jedem zweiten Damm erzielte 26 % Ertragssteigerung.

Tab. 1: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2010

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag		
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		470		
Dammkrone	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	690	220	47
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	675	205	44
Zwischendamm	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	680	210	45
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	635	165	35
red. Zw.-Damm	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	595	125	27
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	615	145	31

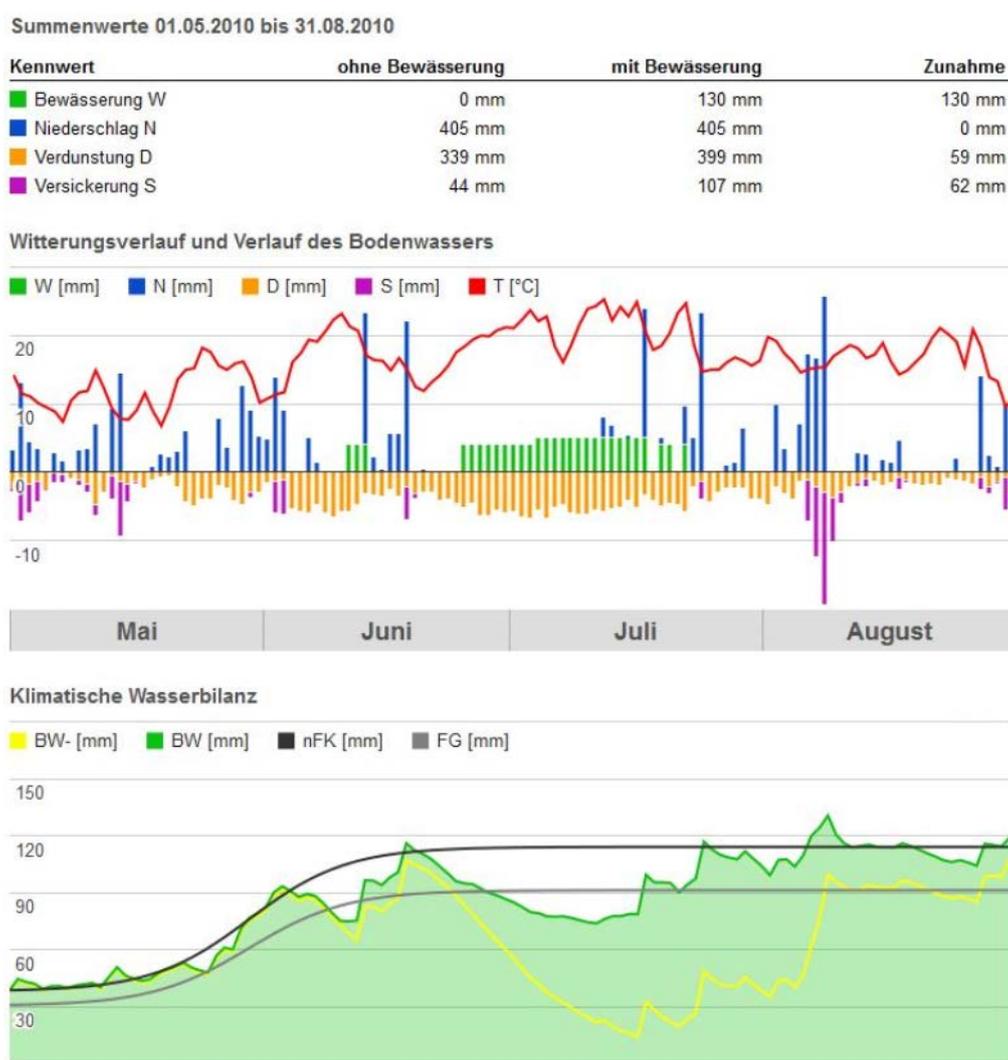


Abb. 6: Bewässerungsvariante mit Start ab 15 cm Krauthöhe am Standort Regensburg, 2010: falls nFK < 80 %: 4-5 mm/d

Durch ausgiebige Niederschläge im Mai verzögerte sich der Bewässerungsstart in den frühen Varianten und es musste nach Berechnungen des Bodenwassermodells bis zur Blüte kaum bewässert werden. Aus diesem Grund führte ein späterer Start der Bewässerung zur Blüte zu ähnlich hohen Ertragszuwächsen.

Die Ergebnisse der Ernte auf dem Versuchsfeld in Regensburg sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Hier wurde in der nicht mit Zusatzwasser versorgten Kontrollvariante ein Ertrag von 515 dt/ha erzielt. Durch Bewässerung mit Einzelwassergaben von 4 bis 5 mm je Tag im DKV stieg der Ertrag beizeitigem Beginn und einem Bodenfeuchtegrenzwert von 80 % nFK um ca. 170 dt/ha. Dies entspricht einer Steigerung von 32 %. Im Zwischendamm- und reduzierten Zwischendammverfahren ergab die Ernte eine Ertragssteigerung um 26 %. Diese mit 26 % nur geringfügig kleinere Ertragssteigerung ist insofern bemerkenswert, da das Bewässern der Kartoffeln in der Dammkrone als arbeitsaufwendiger bei der Bergung der Tropfschläuche eingeschätzt werden muss.

Tab. 2: Ertragseffekt durch Tropfbewässerung, Standort Regensburg 2010

Schlauchposition	Bewässerung	Ertragseffekt		
		Ertrag dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		515		
Dammkrone	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	685	170	33
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	685	170	33
Zwischendamm	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	655	140	27
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	630	115	22
red. Zw.-Damm	(1) ab 15 cm, nFK < 80 %: 4-5 mm/d	655	140	27
	(2) ab 15 cm, nFK < 60 %: 8 mm/d	635	120	23

In den untersuchten Varianten mit verspätetem Start der Bewässerung durch einen geringeren Bodenfeuchtegrenzwert und gleichzeitig höheren Einzelwassergaben erzielte das Dammkronenverfahren ebenfalls die höchsten Ertragszuwächse. Bei dieser Vorgehensweise kam es allerdings bei den beiden Verfahren mit Bewässerung im Zwischendamm zu einem weniger starken Ertragszuwachs.

Im Versuch in Roth (Sandboden) hatten Kartoffeln, die mit Tropfschläuchen zwischen den Dämmen bewässert wurden, massiven Tiefenschorf. Im Gegensatz dazu wurde bei Bewässerung in der Dammkrone gegenüber der unbewässerten Kontrolle nur eine Verdoppelung des Befalls festgestellt (gegenüber 7,5-facher Befallsstärke nach Bewässerung im Zwischendamm). Am Standort Regensburg ergab Tropfbewässerung oberflächliche Schorfeffekte mit gleicher Tendenz, allerdings auf deutlich geringerem, kaum qualitätsminderndem Niveau.

In der Versuchsanstellung auf den Standorten Freising, Roth und Regensburg wurden Varianten mit aufgenommen, in denen der Einfluss von zielgerichteter Flüssigdüngung über die verlegten Tropfschläuche (Fertigation) untersucht wurde. Diese Ergebnisse werden in einem gesonderten Kapitel betrachtet.

5.2 Versuchsjahr 2011

Die Tropfbewässerungsversuche aus dem Vorjahr auf einem Sandboden (Roth) und einem Tonboden (Regensburg) wurden im Jahr 2011 wiederholt. Um eine große Bandbreite in

den Versuchen zu ermöglichen und das Bodenwassermodell entwickeln zu können, wurde der dritte Versuchsort gewechselt und auf einem stark lehmigen Sand in Neuburg-Schrobenhausen (ND) angelegt.

Der Beginn des Jahres war von einer anhaltenden Frühjahrstrockenheit gekennzeichnet, die in dieser Form im Versuchszeitraum nur 2011 stattgefunden hat. Höhere Temperaturen, geringere Niederschläge und deutlich längere Sonnenstunden in den Monaten März, April und Mai (Tab. 3) verringerten die üblicherweise auf den Versuchsstandorten vorhandenen Bodenwasservorräte. Dieser Wassermangel zeigte sich direkt nach dem Auflaufen der Kartoffelpflanzen. Trotz ausreichender Temperaturen für ein zügiges Jugendwachstum stockte die Entwicklung in den nicht mit Zusatzwasser versorgten Varianten.

Tab. 3: *Daten Wetterstation Obersteinbach Standort Roth, Vieljähriges Mittel DWD (von 1981 bis 2010): Roth B. Nürnberg*

Monat	Temp. (2 m)	langj. Temp (2 m)	NS-Summe	langj. NS-Summe	Sonnen- stunden Summe	langj. Sonnen- stunden Summe
	[°C]	[°C]	[mm]	[mm]	[h]	[h]
März	5,3	4,4	15,6	55,0	200	115
April	11,7	8,7	31,8	50,0	253	172
Mai	14,7	14,0	32,3	78,0	278	207

Aufgrabungen, Beobachtungen und Proberodungen haben gezeigt, dass sehr frühe Bewässerungsmaßnahmen, kurz nach dem die jungen Pflanzen den Damm durchstoßen haben, für die Entwicklung der Kartoffelbestände an allen drei Standorten am förderlichsten waren. Bei dieser Vorgehensweise war beabsichtigt, den Dammkern, also den Hauptwurzel- bzw. Knollenbildungsbereich, während der gesamten Wachstumsperiode feucht und kühl zu halten (Abb. 7 und 8).

Vor allem Bestände mit frühem Bewässerungsbeginn (ab Auflaufen der Bestände am 12. Mai) im Dammkronenverfahren verzeichneten ein rasches Jugendwachstum bezüglich der Ausprägung des Wurzelsystems und des Krautwachstums. Die Knollenzahl je Pflanze wurde auf diese Weise am Standort ND gegenüber unbewässert von 7,2 Knollen je qm auf 11,3 Knollen je qm (= +57 %) erhöht, in RH von 10,2 auf 12,2 (= 20 %) und in R von 9,3 auf 10,4 (= 12 %). Ein um zwei Wochen späterer Bewässerungsstart Ende Mai ergab in ND hinsichtlich des Knollenansatzes deutlich weniger Effekte (8,6 Knollen je qm, = +20 % gegenüber unbewässert).

Ein völlig anderes Erscheinungsbild zeigte sich bei frühen Bewässerungsmaßnahmen im Zwischendammbverfahren. Durch den tieferen und räumlich versetzten Befeuchtungspunkt unterhalb der Pflanzknolle wird das verabreichte Wasser nur zu einem geringen Teil und zum Rand hin in den Kartoffeldamm geleitet. Das unter dem Tropfer entstehende Wasserdepot war im Mai aufgrund des bei starkem Wassermangel stark gehemmten Wurzelwachstums für die Kartoffelpflanzen nur unzureichend verfügbar.

Durch das Aufgraben von Bodenprofilen im Frühjahr konnte deutlich beobachtet werden, das im Dammkronenverfahren ein zeitiger Bewässerungsstart von Beginn an eine gleichmäßige Durchwurzelung der Dämme und symmetrisch angelegte Knollennester bewirkte. In Varianten ohne Bewässerung bzw. nach spätem Start (Ende Mai) beschränkte sich das

Feinwurzelwachstum zunächst weitgehend auf die Eindringtiefe von Niederschlägen bis 10 cm Bodentiefe.

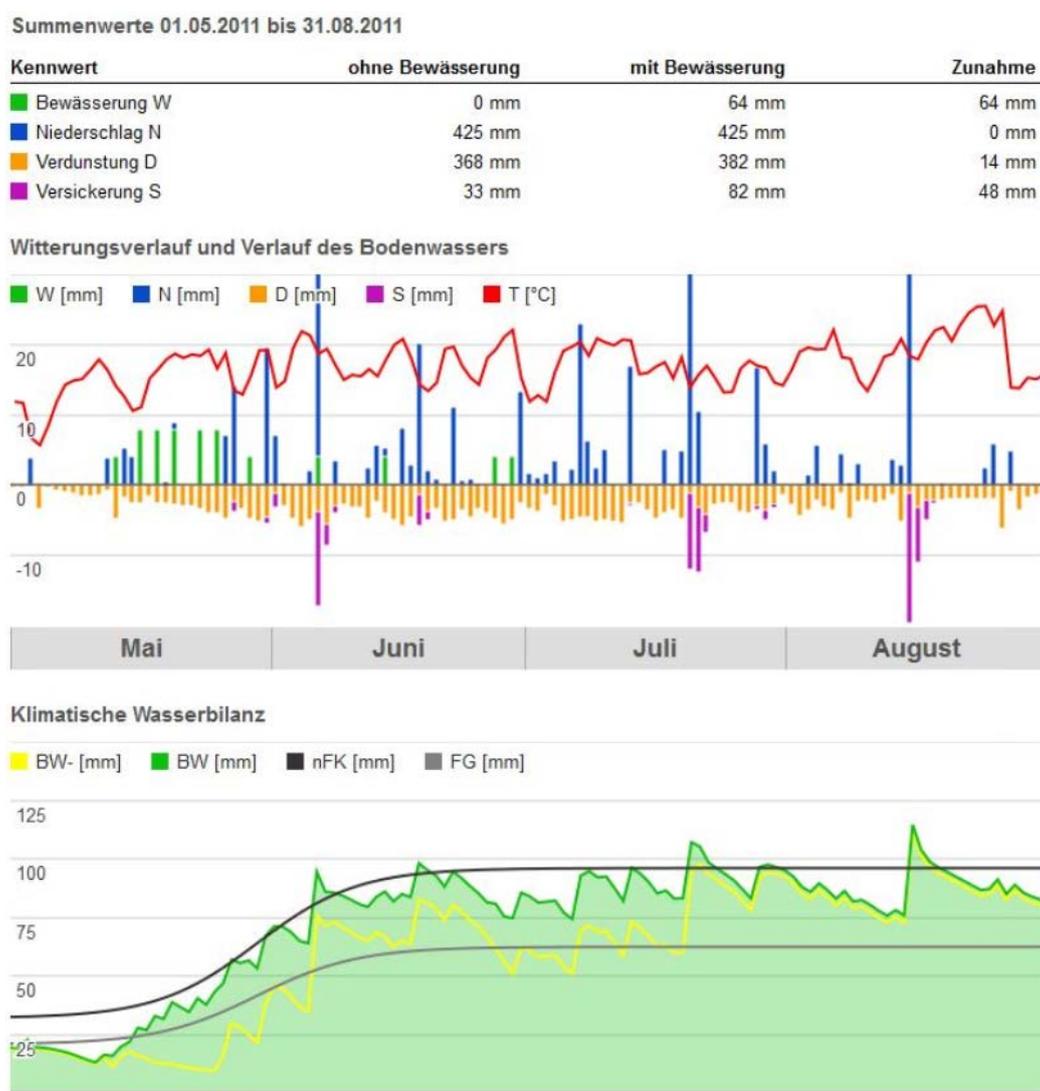


Abb. 7: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start (12. Mai) am Standort Regensburg, 2011: falls $nFK-15 \text{ mm} > \text{Bodenfeuchte} > 65 \% nFK$: $4 \text{ mm}/2d$, falls $\text{Bodenfeuchte} < 65 \% nFK$: $8 \text{ mm}/2d$

Ein später Start der Bewässerung in der Dammkrone hatte nicht nur ein vermindertes Jugendwachstum zur Folge, sondern verminderte auch den positiven Einfluss auf den Knollenansatz, der durch zeitige Bewässerung sichtbar wurde. Der Ansatz von Knollen war in dieser Variante nur um 10 % im Vergleich zur unbewässerten Kontrolle erhöht. Die Bewässerung in den Zwischendämmen zeigte keinen Einfluss auf den Knollenansatz.

Nach der atypisch anhaltenden Trockenphase im Frühjahr zeigte der Witterungsverlauf in den Monaten Juni, Juli und August ein gänzlich anderes Bild. Immer wieder nahezu gleichverteilt einsetzende Niederschläge bewirkten eine kontinuierliche Weiterentwicklung aller untersuchten Varianten ohne auffällige Besonderheiten. Die im Frühjahr in ihrer Entwicklung stark gehemmten Kartoffelpflanzen konnten durch diese durchgängig wachstumsfördernde Witterung die zuvor bewirkten Effekte ausgleichen.

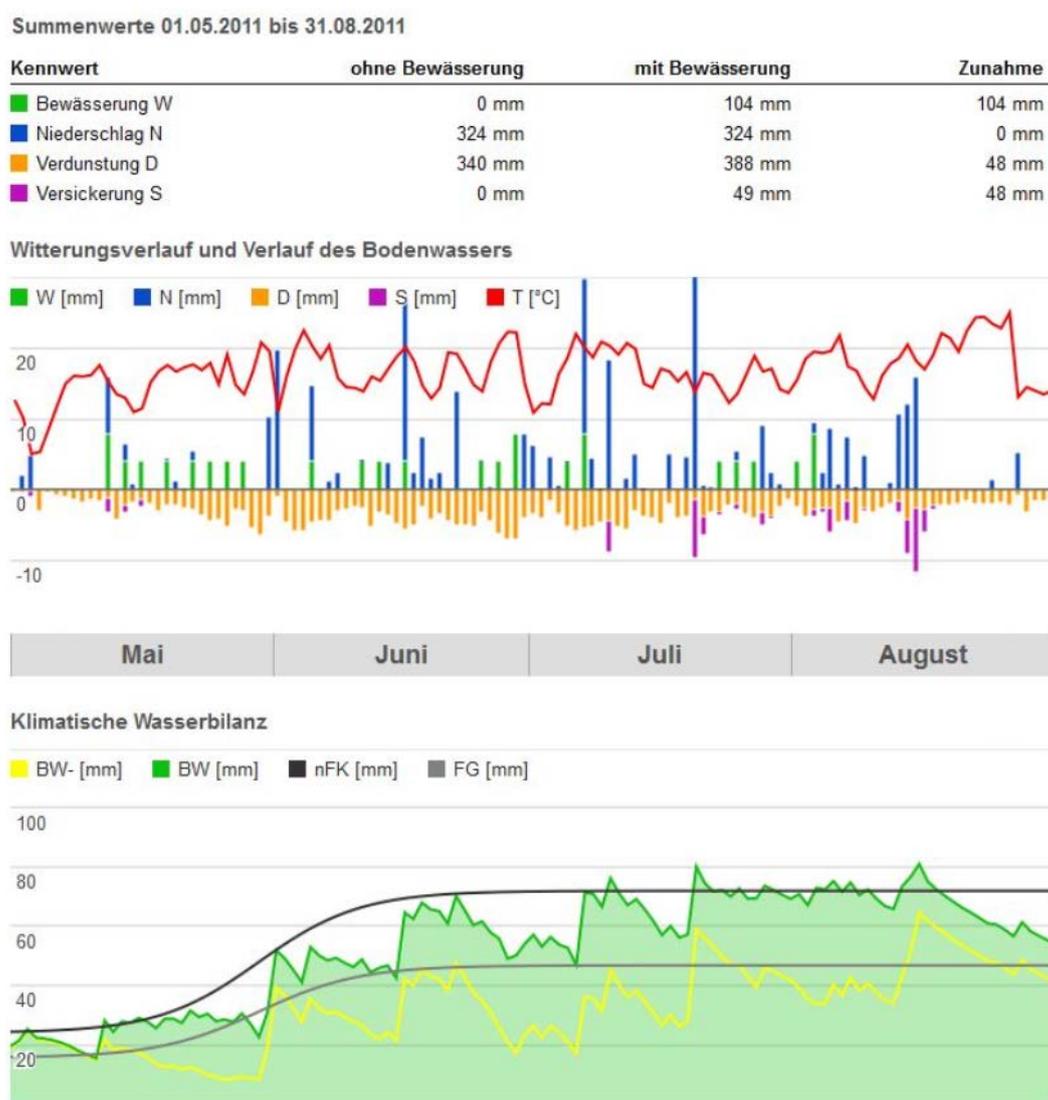


Abb. 8: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start (12. Mai) am Standort Roth, 2011: falls $nFK-15 \text{ mm} > \text{Bodenfeuchte} > 65 \% nFK$: $4 \text{ mm}/2\text{d}$, falls $\text{Bodenfeuchte} < 65 \% nFK$: $8 \text{ mm}/2\text{d}$

Auf dem schluffigen Tonboden am Standort Regensburg war es ab Juni nach Berechnungen aus dem Bodenwassermodell nur an vier Tagen notwendig, Zusatzwasser zu verabreichen. Direkt im Anschluss oder in den nächsten Tagen einsetzende Niederschläge glichen diese Effekte aber wieder aus und füllten auch in den unbewässerten Varianten die für das Wachstum zwingend erforderlichen Bodenwasservorräte auf.

Einen ähnlichen Verlauf der Bewässerungsmaßnahmen zeigte sich auf dem schwach lehmigen Sandboden in Roth. Da hier der Boden nur eine nutzbare Feldkapazität von 12 Vol. % aufweist, sank der Bodenfeuchtegrenzwert als Maß für Bewässerungsmaßnahmen aus dem Modell sehr schnell ab. Im Juni war es deshalb notwendig an sieben Tagen und im Juli an fünf Tagen zu bewässern. Auch hier glichen direkt im Anschluss oder in den nächsten Tagen einsetzende Niederschläge diese wachstumsfördernden Maßnahmen in der unbewässerten Kontrollvariante wieder aus.

Am dritten Versuchsstandort in Neuburg-Schrobenhausen, einem stark lehmigen Sandboden, war es im Juni und Juli durch das Absinken der Bodenwasservorräte ebenfalls not-

wendig zu bewässern, aber wie in Regensburg und Roth wurden diese Maßnahmen durch zeitversetzte Niederschläge kompensiert.

Das resultierende Ertragsniveau erreichte auch ohne Bewässerung an allen drei Standorten im Jahresvergleich sehr hohe Werte (Tab. 4 - 6).

Tab. 4: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Regensburg 2011

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		675		
Dammkrone	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	770	95	14
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	720	45	7
Zwischendamm	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	680	5	0
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	700	25	4

Tab. 5: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2011

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		860		
Dammkrone	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	1000	140	16
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	980	120	14
Zwischendamm	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	940	80	9
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	940	80	9

Tab. 6: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Neuburg 2011

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		730		
Dammkrone	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	820	90	12
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	750	20	2
Zwischendamm	(1) ab 10 cm Bestandeshöhe (12. Mai)	800	70	10
	(2) ab 25 cm Bestandeshöhe (29. Mai)	830	100	13

In Regensburg betrug das Ertragsniveau ohne Bewässerung 675 dt/ha, in Roth 860 dt/ha und in Neuburg-Schrobenhausen 730 dt/ha. Das Dammkronenverfahren mitzeitigem Bewässerungsstart erzielte an allen drei Standorten die mit Abstand besten Effekte. Am Standort Neuburg-Schrobenhausen trat ab Ende Juli in den bewässerten Teilstücken aufgrund von Unterbodenverdichtungen deutlich sichtbar *Erwinia carotovora* (Stengel- und Knollennassfäule) auf, dessen Umfang des Befalls umso höher war, je stärker zuvor bewässert wurde. Hierdurch kam es zu einer zusätzlichen Angleichung der zuvor erzeugten Ertragseffekte.

5.3 Versuchsjahr 2012

Damit weitere Daten für das Bodenwassermmodell gewonnen werden konnten, wurden als Versuchsstandorte 2012 zwei Betriebe in Aichach und Pförring ausgewählt, die auf schluffigen Lehmböden seit vielen Jahren Kartoffeln anbauen. Der Versuch in Roth wurde mit veränderten Feuchtegrenzwerten wiederholt. Der Schwerpunkt lag in diesem Versuchsjahr bei der Verwendung des Tropfschlauches in der Dammkrone mit einem Tropferabstand von 30 cm und abgestufter Bewässerungsintensität.

Der Witterungsverlauf auf den drei Versuchsstandorten gestaltete sich z. T. recht unterschiedlich. Die an den Standorten niedergegangenen Niederschläge Mitte April füllten die Bodenwasservorräte auf und ein deutlicher Temperaturanstieg in der letzten Aprilwoche führte zu einem schnellen Auflaufen der Kartoffelpflanzen. Die gute Weiterentwicklung der Bestände wurde durch die anhaltenden hohen Temperaturen und gleichverteilte Niederschläge bis Mitte Mai unterstützt. Anders als im Vorjahr waren die Vorräte an Bodenwasser für das Wachstum in diesem Zeitraum ausreichend vorhanden und es musste mit der Bewässerung in Aichach erst am 22. Mai und zwei Tage später in Roth begonnen werden. Am dritten Standort Pförring hatten die Wassergehalte im Boden in dieser Zeit den errechneten Feuchtegrenzwert noch nicht unterschritten und einsetzende Niederschläge vom 29. Mai bis 1. Juni (41 mm) füllten die vorhandenen Bodenwasservorräte vollständig wieder auf.

In Roth (10 mm) und Aichach (7 mm) fielen diese Niederschläge nicht so ergiebig aus, entsprachen in ihrer Menge aber einer vergleichbaren Bewässerungsgabe von 4 mm/2d, die nicht nur auf die unbewässerte Kontrolle sondern vor allem auch auf die Variante mit spätem Bewässerungsstart Anfang Juni wachstumsfördernd wirkte. Ertragsunterschiede in der Versuchsanstellung bei geplantem frühem Start (15 cm Wuchshöhe bei Feuchtegrenzwert $< nFK - 15$ mm) und spätem Start der Bewässerung (Bestandesschluss bei Feuchtegrenzwert $< nFK - 15$ mm) konnten in diesen angelegten Varianten auf allen drei Standorten deshalb nicht festgestellt werden.

Der sich daran anschließende Witterungsverlauf im Juni gestaltet sich auf den drei Versuchsstandorten unterschiedlich und hatte damit Einfluss auf die weitere Entwicklung der sich bis dahin gut etablierten Kartoffelpflanzen. Mit einer Durchschnittstemperatur von 17,7°C war der Juni etwas wärmer als das langjährige Mittel (17,0 °C, Quelle DWD). Über die Versuchsfelder mit schluffigem Lehm in Aichach ($nFK = 21$ Vol.-%) und Pförring ($nFK = \text{Vol.}-16$ %) zogen im Monat Juni immer wieder Regenschauer hinweg, die ergiebige Niederschläge mit sich führten und dadurch die vorhandenen Bodenwasservorräte kontinuierlich wieder auffüllten. Am Standort Aichach fielen an 15 Regentagen insgesamt 138 mm Niederschlag. In Pförring gab es im gleichen Zeitraum 3 Regentage mehr mit einer Niederschlagssumme von 102 mm.

Bewässerung war auf den Lehmböden nach Berechnungen aus dem Bodenwassermmodell bis Ende Juni nicht notwendig und die Kartoffelbestände entwickelten sich in allen Varianten gleichmäßig weiter. Durch das reichlich vorhandene Bodenwasser und die warmen Temperaturen entstanden sehr dichte Bestände mit viel oberirdischer Biomasse. Weitere ergiebige Niederschläge in der ersten Juliwoche (AIC = 36 mm; EI = 30 mm) setzten diesen Vorgang fort.

Auf dem Sandboden in Roth, der mit einer nFK von 12 Vol.-% die geringste Wasserspeicherkapazität der drei Versuchsstandorte aufweist, blieben diese Niederschläge im Juni aus. Hier fielen an 7 Regentagen nur insgesamt 14 mm Niederschlag auf das Versuchsfeld,

wobei an 4 Tagen von der Wetterstation in Obersteinbach nur jeweils eine Regenmenge von 1mm aufgezeichnet wurde.

Die Bewässerung wurde nach Berechnungen des Bodenwassermodells durch die Niederschläge Ende Mai kurzzeitig unterbrochen, ab dem 9. Juni wiederaufgenommen und die Intensität 10 Tage später in einigen Varianten wie vorgesehen von 4 mm/2d auf 8 mm/2d erhöht. Während sich die mit zusätzlichem Wasser versorgten Kartoffelpflanzen weiterentwickelten, neue oberirdische Biomasse bildeten und zügig den Bestand schlossen, stagnierte das Wachstum in der unbewässerten Kontrollvariante ab der zweiten Junidekade. Die Kartoffelpflanzen zeigten erste deutliche Trockenstresssymptome durch frühes Einrollen der Blätter und reagierten im Weiteren mit dem Absterben der unteren Blätter, so dass deutliche Unterschiede in der Entwicklung der Bestände sichtbar wurden. Erste Anzeichen von Wassermangel zeigten Ende Juni auch diejenigen Kartoffelpflanzen, deren Bewässerungsintensität nicht erhöht wurde.

Anfang Juli wurde diese Trockenphase in Roth von Regenschauern unterbrochen, die in den ersten 10 Tagen insgesamt 51 mm Niederschlag mit sich brachten. Die Bewässerung wurde ab der zweiten Julidekade wieder aufgenommen und bis Mitte August fortgesetzt. Mit insgesamt 37 Einzelgaben wurde in der Variante mit erhöhter Intensität eine Gesamtmenge von 240 mm ausgebracht (Abb. 9). Die kurzzeitig Ende Juni sichtbaren Anzeichen von Wassermangel bei Kartoffeln, deren Bewässerungsintensität nicht erhöht wurde, waren im weiteren Verlauf des Jahres nicht mehr zu beobachten. Die Kartoffelpflanzen ohne Bewässerung reagierten auf die Niederschläge Anfang Juli und stabilisierten sich auf niedrigem Niveau. Weitere Trockenstressphasen traten bis zur Abreife nicht mehr auf. Die Pflanzen waren aber bei dem geringen Bodenwasserangebot nicht mehr in der Lage, den Wachstumsrückstand aufzuholen und sich vergleichbar üppig wie die bewässerten Varianten zu entwickeln.

Im gesamten Vegetationszeitraum beeinflussten Temperaturverlauf, Niederschlagshöhe und -verteilung sowie getätigte oder unterlassene Bewässerung die Entwicklung der Pflanzenbestände. Zudem sind Kartoffelpflanzen in der Lage, im Verlauf der Vegetationsperiode durch kurzfristige Anpassungsmaßnahmen diese Einflüsse zu kompensieren oder zumindest zu dämpfen. Wird neben der beschriebenen Entwicklung der Pflanzenbestände die monatliche Niederschlagsmenge am Standort Roth des Jahres 2012 im Vergleich zum langjährigen Mittel betrachtet, zeigt sich die Besonderheit, dass jeder Monat im gesamten Vegetationszeitraum ein zum Teil recht deutliches Defizit aufweist (Tab. 7). Damit fielen im Zeitraum von März bis September insgesamt 207 mm Niederschlag weniger als im langjährigen Mittel. Diese Auffälligkeit trat nur am Standort Roth und nur 2012 auf.

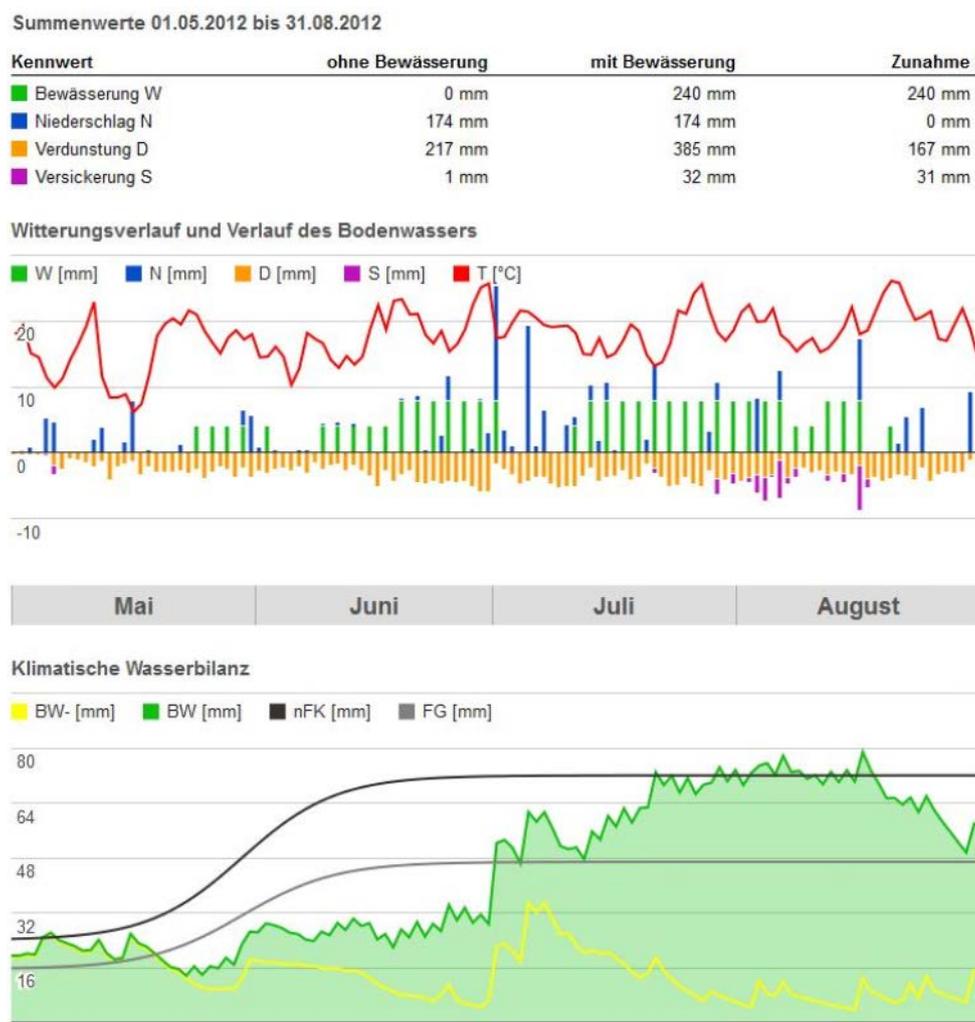


Abb. 9: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start am Standort Roth, 2012: falls $nFK - 15 \text{ mm} > \text{Bodenfeuchte} > 65 \% nFK$: $4 \text{ mm}/2\text{d}$, falls $\text{Bodenfeuchte} < 65 \% nFK$: $8 \text{ mm}/2\text{d}$

Tab. 7: Monatsmittelwerte Niederschlag am Standort Roth im Vergleich zum vieljährigen Mittel (DWD von 1981 bis 2010: Roth B. Nürnberg)

Monat	Niederschlag Summe	langj. Niederschlag Summe	langj. Niederschlag (Abweichung absolut)	langj. Niederschlag (Abweichung relativ)
	[mm]	[mm]	[mm]	%
Januar	107,7	52,0	55,7	107,1
Februar	12,8	47,0	-34,2	-72,8
März	7,8	55,0	-47,2	-85,8
April	32,5	50,0	-17,5	-35,0
Mai	38,1	78,0	-39,9	-51,2
Juni	44,9	81,0	-36,1	-44,6
Juli	75,6	95,0	-19,4	-20,4
August	46,0	71,0	-25,0	-35,2
September	39,7	62,0	-22,3	-36,0
Oktober	42,0	60,0	-18,0	-30,0
November	89,6	59,0	30,6	51,9
Dezember	84,1	61,0	23,1	37,9
Summe	620,8	771,0	-150,2	

Auf dem Sandstandort in Roth wurde in der unbewässerten Variante ein Ertrag von 500 dt/ha erreicht. Durch die angewendeten Bewässerungsmaßnahmen konnte der Ertrag beinahe verdoppelt werden (Tab. 8). Die einzelnen Varianten im Dammkronen- und red. Zwischendammverfahren weisen hingegen nur geringfügige Unterschiede auf. Das Bewässern nicht nur den Ertrag, sondern vornehmlich auch die Größenverteilung beeinflusst, wird aus Tabelle 9 ersichtlich. Der Anteil an vermarktungsfähiger Ware ist in den bewässerten Varianten im Gegensatz zur unbewässerten Kontrollvariante deutlich erhöht.

Tab. 8: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2012

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		500		
Dammkrone	(1) ab nFK – 15 mm = 4 mm/2d	960	460	92
	(2) ab nFK – 15 mm = 4 mm/2d nFK < 65 % = 8 mm/2d	940	440	88
	(3) ab nFK – 15 mm = 4 mm/2d nFK < 65 % = 8 mm/2d nFK < 40 % = 12 mm/2d	970	470	94
red. Zw.-Damm	(2) ab nFK – 15 mm = 4 mm/2d nFK < 65 % = 8 mm/2d	980	480	96

Tab. 9: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2012

	Gewicht 0 < 40 mm in %	Gewicht 40 < 50 mm in %	Gewicht 50 < 60 mm in %	Gewicht 60+ mm in %
unbewässerte Kontrolle	19,1	49,1	29,3	2,5
DK nFK – 15 mm = 4 mm/2d	6,4	21,6	43,6	28,4
DK nFK – 15 mm = 4 mm/2d nFK < 65 % = 8 mm/2d	7,7	21,9	37,6	32,8
red. ZD nFK – 15 mm = 4 mm/2d nFK < 65 % = 8 mm/2d	7,2	25,1	50,1	17,4

Auf den Lehmböden in Aichach und Pförring wurde mit der Bewässerung nach Unterschreitung des Bodenfeuchtegrenzwertes in der dritten Junidekade wieder begonnen und bis Mitte August fortgesetzt (Abb. 10). Begleitet wurden diese Maßnahmen von immer wieder auftretenden Regenschauern, die auch die unbewässerte Kontrollvariante mit Wasser versorgte. Sichtbare Unterschiede in den einzelnen Varianten waren nicht erkennbar und die Bestände reiften nahezu gleichmäßig ab.

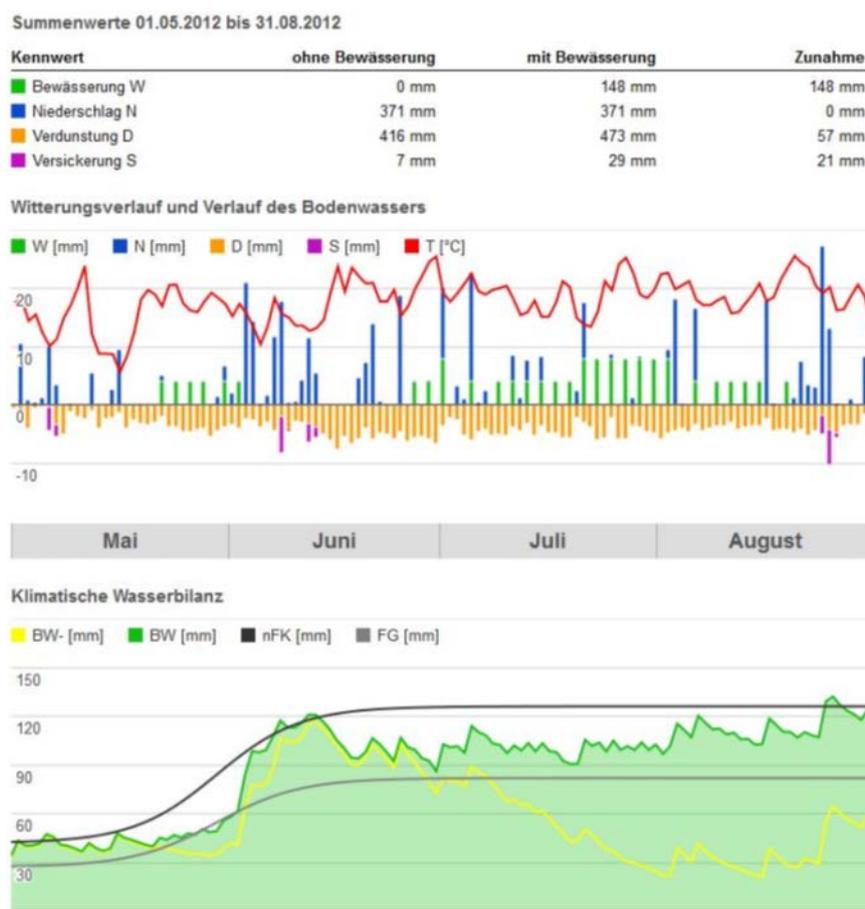


Abb. 10: Bewässerungsvariante mitzeitigem Start am Standort Aichach, 2012: falls $nFK - 15\text{mm} > \text{Bodenfeuchte} > 65\% nFK$: $4\text{ mm}/2\text{d}$, falls $\text{Bodenfeuchte} < 65\% nFK$: $8\text{ mm}/2\text{d}$

In Aichach wurde in der nicht bewässerten Variante mit einem Ertrag von 860 dt/ha bereits ein sehr hohes Niveau erzielt. Die Auswertung der Ergebnisse mit Bewässerung im Dammkronen- und reduzierten Zwischendammverfahren (Tab. 10) verdeutlicht, dass mit Bewässerung bei dieser Ertragslage nur noch geringe Steigerungsmöglichkeiten bestehen. Vergleichbar gestaltet sich das Ertragsgeschehen in Pförring. Hier lag der Ertrag in der unbewässerten Variante bei 650 dt/ha und fiel in den bewässerten Varianten nur geringfügig besser aus.

Tab. 10: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2012

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		860		
Dammkrone	(1) ab $nFK - 15\text{ mm} = 4\text{ mm}/2\text{d}$	895	35	4
	(2) ab $nFK - 15\text{ mm} = 4\text{ mm}/2\text{d}$ $nFK < 65\% = 8\text{ mm}/2\text{d}$	895	35	4
	(3) ab $nFK - 15\text{ mm} = 4\text{ mm}/2\text{d}$ $nFK < 65\% = 8\text{ mm}/2\text{d}$ $nFK < 40\% = 12\text{ mm}/2\text{d}$	900	40	5
red. Zw.-Damm	(2) ab $nFK - 15\text{ mm} = 4\text{ mm}/2\text{d}$ $nFK < 65\% = 8\text{ mm}/2\text{d}$	890	30	3

5.4 Versuchsjahr 2013

Auf der Grundlage der umfangreichen Erfahrungen und Ergebnisse der Vorjahre war es möglich, im Jahr 2013 Veränderungen am Versuchsaufbau vorzunehmen. Der Exaktparzellenversuch in Aichach auf einem schluffigen Lehm Boden wurde wie im Vorjahr wiederholt sowie um einige Varianten erweitert (Abb. 11) und der Bewässerungsversuch in Roth wurde auf das Design eines großflächigen Streifenversuches übertragen. Zur weiteren Verbesserung des Bodenwassersmodells wurden die umfangreichen Messungen zur direkten Bestimmung des Bodenwassergehaltes durch FDR-Sonden fortgesetzt und in die Entscheidungsfindung, ob und mit welcher Intensität bewässert werden muss, einbezogen.



Abb. 11: Aufbau der Versuchsanlage in Aichach Ende Mai 2013

Auf beiden Versuchsstandorten kam es zu einer weiteren Veränderung. Neben herkömmlichen Kartoffeldämmen wurde eine Dammform erprobt und in den Versuchsaufbau integriert, die zwei Dämme durch einen erhöhten Zwischenraum miteinander verbindet (M-Damm). Durch die Ablage des Tropfschlauches in dieser erhöhten Position vergrößert sich der pflanzenverfügbare Bodenwasserspeicher um ca. 25% (MÜLLER ET AL., 2014).

Der Witterungsverlauf 2013 führte zu einem sehr schwierigen Jahr für den Kartoffelanbau. Kühle Temperaturen und Niederschläge Mitte April (insges. 30 mm) verhinderten das rechtzeitige abtrocknen der Böden und verzögerten dadurch den Pflanztermin. Die Kartoffeln konnten in Aichach erst am 29.4. gelegt werden. Durch weitere Regenschauer fiel der Mai niederschlagsreich und sonnenscheinarm aus und die Böden erwärmten sich nur langsam. Der späte Feldaufgang in der letzten Maidekade wurde von ungewöhnlich kühlen Temperaturen begleitet, die das Jugendwachstum weiter beeinträchtigten. Starke Niederschläge ab 26. Mai (31.5 - 2.6. = 118 mm) überschwemmten das leicht erhöht liegende Versuchsfeld und zerstörten durch zusammenfließen des Wassers im unteren Teil des Schlags die Kartoffeldämme und ebneten sie regelrecht ein (Abb. 12).



Abb. 12: Schäden durch Wassererosion nach anhaltend starken Niederschlägen vom 26.05. bis 03.06. in Aichach auf dem unteren Teil des Kartoffelfeldes (Foto vom 13.06.)

Aufgrabungen zeigten völlig durchweichte Dämme und extreme Staunässe direkt unter der Pflugtiefe durch Schichtwasser, das erst Mitte Juni mit ansteigenden Temperaturen langsam zurückging und durch bessere Sauerstoffversorgung im Boden eine Erholung der Kartoffelpflanzen einleitete. Zum Bestandesschluss kam es am Standort Aichach erst Ende Juni mit gleichzeitigem Beginn der Blüte.

Am Standort Roth wurden die Kartoffeln am 26. April gelegt, leicht angehäufelt und eine Woche später die Dämme geformt. Auch hier verzögerten kühle Temperaturen, starke Bewölkung und Niederschläge den Feldaufgang bis in die letzte Maiwoche. Direkt mit dem Feldaufgang kam es auch in Roth zu extremen Regenfällen. Im Zeitraum von neun Tagen fielen 118 mm Niederschlag, den der leichte Sandboden nicht aufnehmen konnte. Das Wasser sammelte sich zeitweise in den Furchen zwischen den Dämmen und floss in Sturzbächen in den unteren Teil des Schlages. Dabei wurde feines Bodenmaterial von den Dammflanken abgespült und verlagert. Berechnungen des Bodenwassermodelles zeigen für diesen Zeitraum eine starke Sickerwasserbildung (Abb. 13).

Durch den vollständig gesättigten Boden staute sich tagelang direkt unter der Flurgrenze das Wasser und verzögerte durch Sauerstoffmangel das weitere Wachstum der noch jungen Kartoffelpflanzen. Erst steigende Temperaturen ab Mitte Juni regten das Pflanzenwachstum nachhaltig an und Bestandesschluss und Blüte gingen Ende Juni in einander über.

Nach vereinzelt Wasserungsgaben, die wegen wiederholter Regenschauer immer wieder ausgesetzt werden mussten, wurde mit der kontinuierlichen Bewässerung am 2. Juli begonnen und die Intensität etwa eine Woche später erhöht. Der Kartoffelbestand in den bewässerten Varianten reagierte auf diese zusätzlichen Wassergaben ausgesprochen positiv. Ab der zweiten Julidekade konnten deutliche Anzeichen von Trockenstress in der unbewässerten Variante beobachtet werden. Die Pflanzen reagierten auf den entstehenden Wassermangel erst mit einrollen der Blätter und einige Tage später lockerte sich der Bestand durch das Absterben der unteren Blätter merklich auf. Auch die Varianten, deren Intensität der Bewässerung nicht auf 4 mm bzw. 6 mm je Tag erhöht worden war, zeigten beginnende Anzeichen von Wassermangel. Ende Juli konnte man die einzelnen Reihen der unbewässerten, mit 2 mm und mit 4 bzw. 6 mm je Tag bewässerten Varianten deutlich an der Dichte des Blattapparates im Bestand unterscheiden.

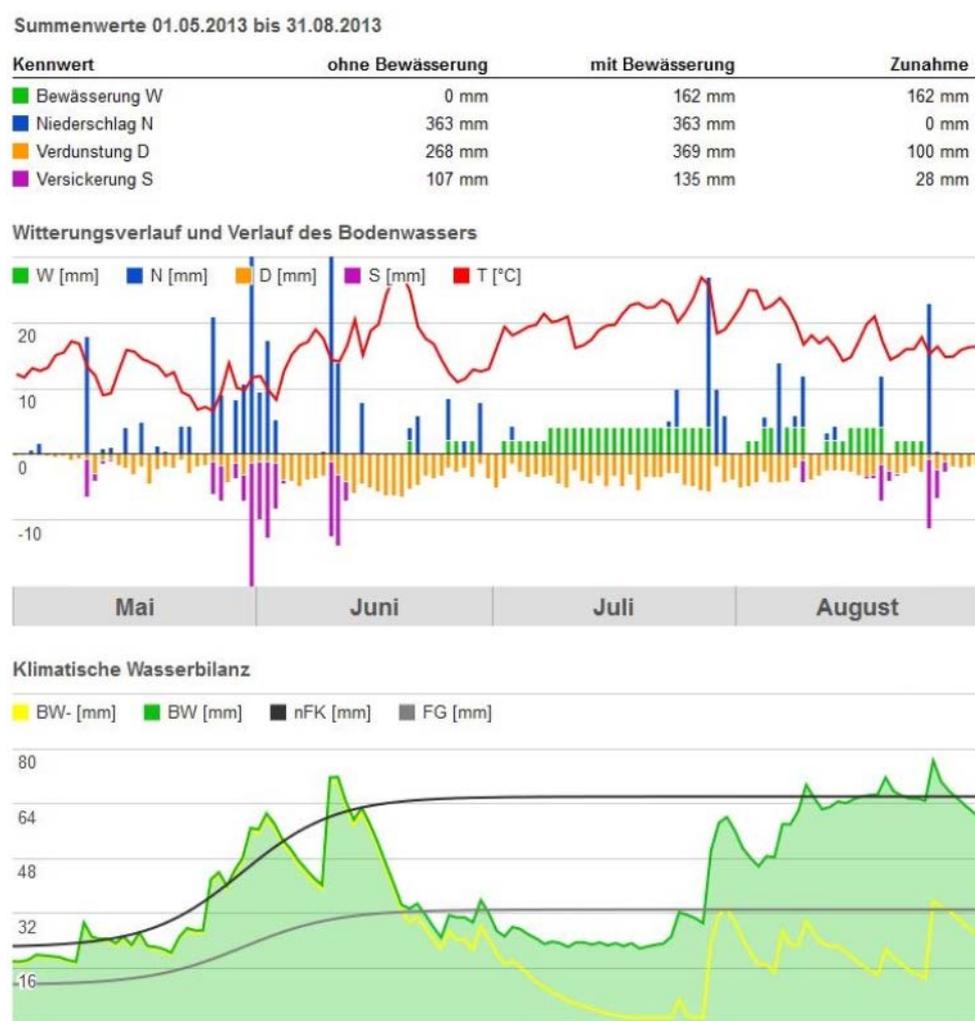


Abb. 13: Bewässerungsvariante am Standort Roth, 2013: falls Bodenfeuchte < 70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4mm/d

Auf einem direkt angrenzenden Nachbarfeld ohne Bewässerung, auf denen die Kartoffeln etwas früher gelegt und aufgelaufen waren, führte diese anhaltende Trockenphase im Juli am Standort Roth zum Totalverlust durch Absterben des gesamten Bestandes.

Einsetzende Niederschläge Ende Juli von 39 mm an drei Tagen durchfeuchteten die fast vollständig ausgetrocknete Kontrollvariante und die unbewässerten Kartoffeln erholten sich ein wenig. Das geringe Wasserangebot aus den Niederschlägen im August erhielt die Kartoffelpflanzen in der unbewässerten Variante eher am Leben, als das es ertragsbildend wirken konnte.

Auch in Aichach war der Juli durch fehlende Niederschläge sehr trocken. Steigende Temperaturen und das reichlich im Lehmboden vorhandene Bodenwasser regte das Pflanzenwachstum an. Mit der Bewässerung wurde hier am 8. Juli begonnen und die Intensität eine Woche später bei absinkendem Feuchtegrenzwert erhöht. Bis zum Ende der Bewässerung wurden in der Variante mit gesteigerter Intensität von 4 mm je Tag insgesamt 132 mm Zusatzwasser ausgebracht (Abb. 14).

In weiteren Ausgrabungen und Proberodungen konnten bis zum 25. Juli trotz Bewässerungsmaßnahmen keine Unterschiede in den Varianten beobachtet werden. Erst gegen Ende Juli zeigten die Pflanzen in der unbewässerten Variante in den Mittagstunden an der

Blattstellung erste Anzeichen von beginnendem Wassermangel. Der Niederschlag am 29. Juli von 17 mm glich diesen Mangel im Boden jedoch höchstwahrscheinlich aus und es konnten in allen Varianten, sicher unterstützt durch die gleichverteilten und recht ergiebigen Niederschläge im August, keine weiteren Veränderungen im Bestand bis zur Ernte festgestellt werden.

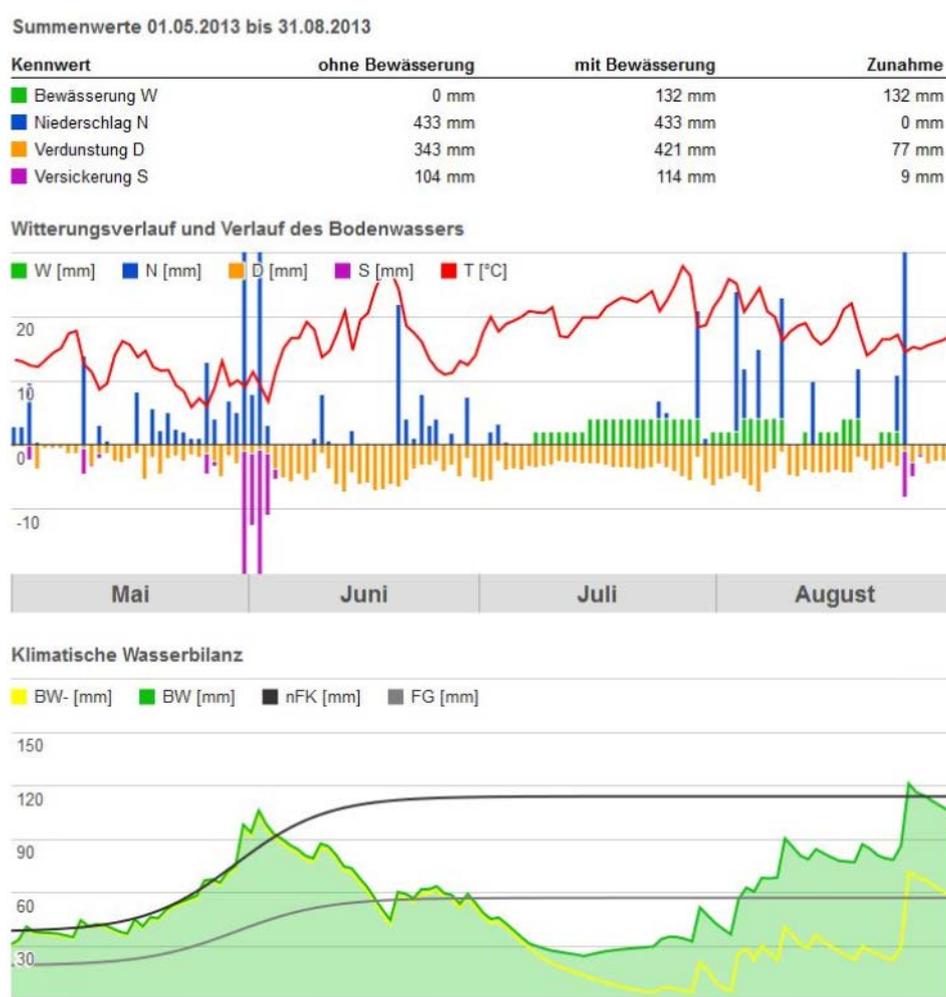


Abb. 14: Bewässerungsvariante am Standort Aichach, 2013: falls Bodenfeuchte < 70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4 mm/d

Das Ertragsgeschehen auf dem Sandboden in Roth zeigt im Gegensatz zum schluffigen Lehmboden in Aichach ein völlig anderes Erscheinungsbild. Hier wurden in der unbewässerten Variante 235 dt/ha geerntet, wobei fast 90 % der Kartoffeln kleiner als 50 mm waren (Tab. 11 und 12). Die Ergebnisse der bewässerten Varianten zeigen bei allen drei angewendeten Schlauchpositionen neben einer erheblichen Steigerung des Ertrages eine deutliche Verschiebung in Größenfraktionen vermarktungsfähiger Ware.

Der Ertrag am Standort Aichach fiel in der unbewässerten Kontrollvariante wie im Vorjahr mit 725 dt/ha sehr hoch aus (Tab. 13). Obwohl durch die Bewässerungsmaßnahmen dieser Ertrag in allen Varianten noch einmal gesteigert werden konnte, blieben die Unterschiede in den angewendeten Schlauchpositionen und Bewässerungsstufen zu geringfügig um weitere Aussagen daraus ableiten zu können. Neben dem Ertrag wurde für die einzelnen Varianten die prozentuale Größenverteilung des Erntegutes untersucht (Tab. 14). Die

Ergebnisse weichen auch hier nur geringfügig voneinander ab. Die angelegte Variante mit spätem Bewässerungsstart kam nicht zum Tragen, da mit der Bewässerung erst ab dem 8. Juli begonnen wurde.

Tab. 11: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2013

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag		
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		235		
Dammkrone	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	300	65	28
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	460	225	96
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	515	280	119
Zw.-M-Damm	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	415	180	77
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	455	220	94
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	590	355	151
red. Zw.-Damm	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	440	205	87

Tab. 12: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2013

		Gewicht	Gewicht	Gewicht	Gewicht
		0 < 40 mm in %	40 < 50 mm in %	50 < 60 mm in %	60 + mm in %
unbewässerte Kontrolle		44,2	43,1	11,6	1,1
Dammkrone	nFK < 70 % = 2 mm/d	38,3	42,3	17,5	1,9
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	24,2	36,4	29,7	9,6
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	17,7	35,4	32,2	14,7
Zw.-M-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d	20,8	48,0	27,2	4,0
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	24,8	43,9	28,3	3,1
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	17,2	35,5	34,5	12,8
red. Zw.- Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	35,2	41,1	20,3	3,5

Tab. 13: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2013

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		725		
Dammkrone	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	795	70	10
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	775	50	7
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	790	65	9
Zw.-M-Damm	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	765	40	6
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	755	30	4
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	790	65	9
red. Zw.-Damm	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	785	60	8

Tab. 14: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Aichach 2013

		Gewicht	Gewicht	Gewicht	Gewicht
		0 < 40 mm in %	40 < 50 mm in %	50 < 60 mm in %	60 + mm in %
unbewässerte Kontrolle		4,4	15,2	33,3	45,2
Dammkrone	nFK < 70 % = 2 mm/d	2,7	13,2	32,7	50,0
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	2,4	12,8	35,3	48,4
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	3,5	12,2	38,4	44,7
Zw.-M-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d	4,9	17,7	36,3	40,0
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	3,4	13,1	34,6	47,7
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	3,8	15,1	36,2	44,8
red. Zw.-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	2,9	13,0	32,3	50,5

5.5 Versuchsjahr 2014

Im Jahr 2014 wurde der großflächige Streifenversuch in Roth wiederholt und erweitert. Nachdem im Vorjahr erste positive Erfahrungen beim Formen eines kompakten M-Dammes gesammelt werden konnten, wurde für diesen Versuch ein weiterer Dammformer umgebaut und zum Einsatz gebracht. Die Flanken des Kartoffeldammes waren in diesen Varianten nicht so steil und sollten dadurch besser gegen eine mögliche Abschwemmung durch Starkniederschläge geschützt werden.

Die Kartoffeln wurden wegen der sehr kühlen zweiten Aprildekade in Roth erst Ende April gelegt, wie im Vorjahr leicht angehäufelt und die Dämme Anfang Mai geformt (Abb. 15). Durch die anhaltend kühlen Temperaturen in der ersten Maihälfte verzögerte sich der Feldaufgang und die jungen Kartoffelpflanzen erhielten erst durch die deutlich wärmeren Temperaturen in der dritten Maidekade mit bis zu 30 °C einen Wachstumsschub. Niederschläge Ende Mai (26. bis 29.5. insges. 53 mm) füllten die Bodenwasservorräte vollständig auf und schafften damit optimale Bedingungen für das Wachstum der Pflanzen in dieser sensiblen Phase.



Abb. 15: Kartoffeldämme mit Tropfschlauch in der Dammkrone (Bild links) und im Zwischen-M-Damm (Bild rechts), Streifenversuch Roth 2014

Anfang Juni stiegen die Temperaturen merklich an und die Pflanzen reagierten mit der Bildung von sehr viel oberirdischer Biomasse und stellten zügig den Bestandesschluss her. Dieses Wachstum beanspruchte die verfügbaren Vorräte an Bodenwasser stark und führte zu einem merklichen Abfall des Bodenwassergehaltes. Mit Unterschreiten des Feuchtegrenzwertes von 70 % nFK am 6.6. wurde mit der Bewässerung begonnen (Abb. 16) und die Intensität in den betreffenden Varianten vier Tage später auf 4 bzw. 6 mm je Tag erhöht (Abb. 17). Die mit zusätzlichem Wasser versorgten Kartoffelpflanzen reagierten darauf mit der weiteren Bildung von oberirdischer Biomasse, während sich das Wachstum in der unbewässerten Kontrollvariante verlangsamte. Ab Mitte Juni zeigten die nicht bewässerten Kartoffelpflanzen deutliche Anzeichen von Wassermangel, der durch den Niederschlag von 12 mm am 17.6. abgeschwächt wurde. Dieser Vorgang setzte sich in der dritten Junidekade fort. Abgemildert durch leichte Niederschläge begannen die unteren Blätter der nicht bewässerten Pflanzen ab Anfang Juli zu welken und abzusterben.



Abb. 16: Versuchsaufbau und Pflanzenbestand am 17.06.2014 (Bild rechts Dammkronenverfahren, nFK < 70 % 2 mm/d, nFK < 50% 4 mm/d), Streifenversuche Roth

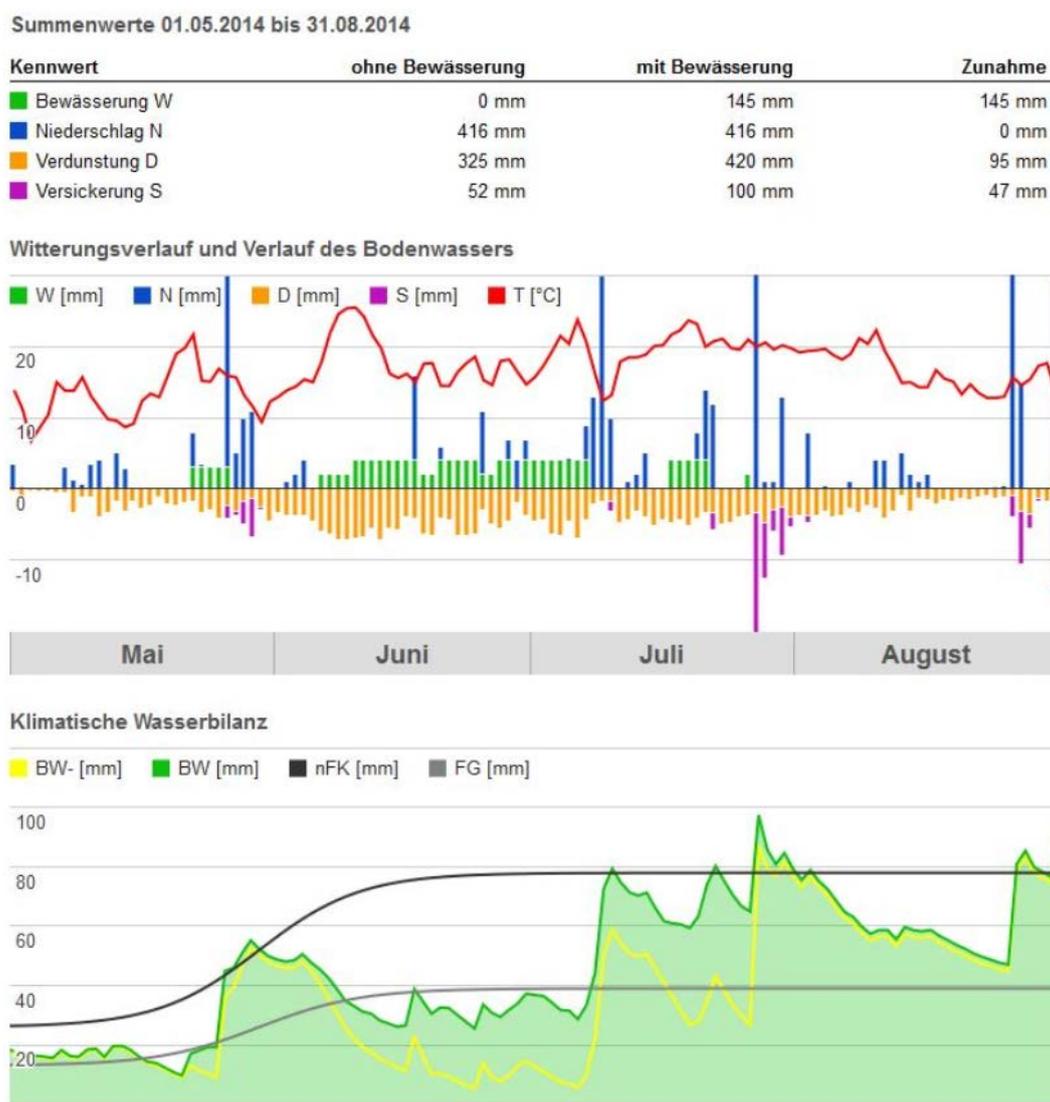


Abb. 17: Bewässerungsvariante am Standort Roth, 2014: falls Bodenfeuchte <70 % nFK: 2 mm/d, falls Bodenfeuchte < 50 % nFK: 4 mm/d

In der ersten Juliwoche stiegen die Temperaturen noch einmal an und es war im Bestand deutlich zu erkennen, dass eine kontinuierliche Versorgung mit Zusatzwasser ab dem 6. Juni mit 2 mm je Tag trotz der Niederschläge für die Erhaltung des Pflanzenbestandes nicht ausreichend war. Diese beginnenden Symptome von Wassermangel zeigten sich gleichermaßen in den Varianten mit M-Damm- und Dammkronenverfahren.

Aufgrabungen und Proberodungen Mitte Juni und Anfang Juli ergaben keine sichtbaren Unterschiede in den vergleichbar bewässerten Varianten des M-Damm- und Dammkronenverfahrens in Bezug auf Krautwachstum und Kartoffelknollen (Kindelbildung). Inwieweit eine nicht so intensive Durchfeuchtung des Kartoffelnestes im M-Damm-Verfahren durch den versetzt liegenden Tropfschlauch positive Auswirkungen hat, konnte nicht festgestellt werden.

Kräftige Niederschläge in der Zeit vom 7. bis 10. Juni (insgesamt 58 mm) füllten die Bodenwasservorräte vollständig wieder auf und beendeten die wochenlang anhaltende Trockenphase. Vor allem die nicht bewässerten Kartoffelpflanzen reagierten auf diese Zufuhr mit Wasser durch Neubildung von oberirdischer Biomasse ausgesprochen positiv. Weitere Niederschläge im 7-Tage-Rhythmus bis Ende Juli förderten einerseits das Wachstum und

verhinderten andererseits ein nochmaliges Absinken der Bodenwassergehalte in Bereiche, welche das Wachstum der Kartoffelpflanzen deutlich beeinträchtigt hätten.

Neuerliche Aufgrabungen, Proberodungen und Beobachtungen im August und September machten deutlich, dass die nicht oder nur mit geringer Intensität bewässerten Kartoffelpflanzen in dieser Zeit die Möglichkeit nutzten, den Wachstumsvorsprung der anderen Kartoffelpflanzen auszugleichen. Wie bereits in den Vorjahren wurde darauf verzichtet, eine gleichmäßige Abreife durch frühzeitige Krautminderung im Bestand herbeizuführen.

Mit einem Ertrag von 625 dt/ha fiel das Ergebnis in der unbewässerten Variante in diesem Jahr unerwartet hoch aus (Tab. 15). Bei der Betrachtung der Größensortierung der Kartoffeln zeigt sich, dass sich im Gegensatz zum Vorjahr 90 % des Ertrages aus Kartoffeln zusammensetzt, die größer als 50 mm waren (Tab. 16). Der Ertrag in allen mit Zusatzwasser versorgten Varianten konnte durch die Bewässerungsmaßnahmen noch einmal deutlich gesteigert werden. Hier erreichte das Dammkronenverfahren mit einer Zunahme von 200 dt/ha das beste Ergebnis. Dass in allen Varianten das Maximum erreicht wurde, zeigt sich in den Ergebnissen der Größenverteilung.

Tab. 15: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2014

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		625		
Dammkrone	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	825	200	32
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	785	160	26
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6mm	750	125	20
Zw.-M-Damm	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	770	145	23
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	790	165	26
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	810	185	30
red. Zw.-Damm	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	765	140	22

Tab. 16: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung, Standort Roth 2014

		Gewicht 0 < 40 mm in %	Gewicht 40 < 50 mm in %	Gewicht 50 < 60 mm in %	Gewicht 60+ mm in %
unbewässerte Kontrolle		3,3	5,7	25,9	65,0
Dammkrone	nFK < 70 % = 2 mm/d	1,1	2,1	17,0	79,9
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	1,6	3,9	23,8	70,7
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	1,5	3,6	23,0	71,9
Zw.-M-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d	1,0	2,7	18,7	77,6
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	1,0	3,2	21,3	74,4
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	1,9	4,2	18,6	75,3
red. Zw.-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	1,3	3,2	22,8	72,7

5.6 Bewässerungsversuche im ökologischen Landbau

Im Jahr 2010 wurde in Fürstenfeldbruck und im Jahr 2014 in Schrobenhausen Bewässerungsversuche auf Flächen durchgeführt, die nach Vorgaben des Ökologischen Landbaues bewirtschaftet werden. Die Versuche wurden als Streifenversuche konzipiert und die Tropfschlauchpositionen in der Dammkrone und zwischen den Dämmen getestet.

Am Standort Fürstenfeldbruck erfolgte das Verlegen der Tropfschläuche im Jahr 2010 in den Varianten in der Dammkrone beim letzten Anhäufeln der Dämme. Um Beschädigungen an den noch jungen Trieben der Kartoffelpflanzen durch Striegeln zu vermeiden, fand diese Maßnahme vor dem Auflaufen der Kartoffelpflanzen statt. Auf eine weitere Beikrautregulierung wurde verzichtet, da die Gefahr bestand, dass durch den nochmaligen Einsatz eines Striegels die sich nah an der Oberfläche befindlichen Tropfschläuche beschädigt werden könnten. Insgesamt wurde zu 20 Terminen im Juni und Juli 80 mm Zusatzwasser durch die Tropfschläuche in der Dammkrone zugeführt.

In den beiden Zwischendammverfahren wurde die mechanische Regulierung des Beikrautes entsprechend der Praxisvariante des Betriebes mit Überkopfberegnung durchgeführt. Das Verlegen der Tropfschläuche zwischen den Dämmen wurde deshalb erst nach den letzten Bekämpfungsmaßnahmen vorgenommen.

Die Ertragsergebnisse (Tab. 17) waren gegenüber der konventionellen Beregnung zu nur einem Termin unbefriedigend. Beim Dammkronenverfahren wurden die positiven Effekte der Tropfbewässerung durch einen deutlich höheren Besatz an Beikräutern ins Gegenteil umgekehrt. Die resultierenden Erträge lagen im Schnitt um 45 dt/ha unter dem Niveau der Praxisvariante mit Überkopfberegnung. In den Zwischendammverfahren konnte durch das spätere Verlegen der Tropfschläuche die zwingend erforderliche mechanische Unkrautbekämpfung entsprechend der Praxisvariante durchgeführt werden. Die resultierenden Erträge lagen 10 dt/ha höher als bei der praxisüblicher Bewässerung.

Tab. 17: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung, Standort Fürstenfeldbruck 2010

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag	Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		165		
Dammkrone	nFK < 60 % = 4 mm/d	195	30	18
Zwischendamm	nFK < 60 % = 4 mm/d	250	85	52
Praxisbetrieb	Überkopfberegnung betriebsüblich	240	75	45

Es ist zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse dieses Teilversuchs auf Erhebungen ohne Wiederholung beruhen. Die Aussagekraft ist deshalb in Bezug auf die Ertragsrelationen unterschiedlicher Varianten eingeschränkt.

Am Standort Schrobenhausen wurden im Jahr 2014 zwei weitere Versuche mit Tropfbewässerung im Ökologischen Landbau in Frühkartoffeln und Kartoffeln mit normalem Legetermin durchgeführt. Zum Einsatz kamen stabile mehrjährige Tropfschläuche in der Dammkrone und zwischen jedem zweiten Damm. Der Versuchsaufbau wurde in einem Streifenversuch mit einer Länge von 100 m ohne Wiederholungen realisiert.

Die Tropfschläuche wurden im Frühkartoffelversuch erst in der zweiten Aprilhälfte nach dem Abräumen des Kartoffelvlieses mit einer vorangegangenen Beikrautregulierung in der Dammkrone verlegt. Kühle Temperaturen und deutliche Niederschläge ab der dritten Aprildekade, die bis Ende Mai anhielten, versorgten die Kartoffelbestände bis zu diesem Termin ausreichend mit Wasser und machten Bewässerungsmaßnahmen nicht notwendig. Erst die steigenden Temperaturen ab Anfang Juni erschöpften durch verstärktes Wachstum der Kartoffelpflanzen die Bodenwasservorräte und es wurde mit der Bewässerung am 2. Juni begonnen.

Beobachtungen und Aufgrabungen im Juni zeigten, dass die bewässerten Kartoffelbestände auf diese tägliche Zufuhr von Zusatzwasser bis zum 19. Juni ausgesprochen positiv reagierten. Es wurde aber auch deutlich, dass Tropfbewässerung das Keimen und Wachstum der begleitenden Flora anregt und fördert, die im ökologischen Kartoffelanbau weitere frühzeitige Regulierungsmaßnahmen zwingend notwendig machen. Die Bewässerung wurde am 19. Juni beendet, da es im ökologischen Frühkartoffelanbau aus betriebswirtschaftlichen Gründen sinnvoll ist, die Kartoffeln möglichst früh zu vermarkten und daraus entstehende Ertragsnachteile im Vergleich zu einem späteren Erntetermin in Kauf zu nehmen.

Das Ertragsgeschehen im Frühkartoffelversuch ist in Tabelle 18 und 19 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mit Bewässerungsmaßnahmen am Standort Schrobenhausen nicht nur der Ertrag gesteigert werden konnte, sondern auch Einfluss auf die Größenverteilung genommen wurde. Der Anteil vermarktungsfähiger Ware war deutlich höher.

Tab. 18: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung (Frühkartoffeln), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag		Ertragseffekt	
		dt/ha	dt/ha	%	
unbewässerte Kontrolle		215			
Dammkrone	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	260	45	21	
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	350	135	63	

Tab. 19: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung (Frühkartoffeln), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014

		Gewicht 0 < 40 mm in %	Gewicht 40 < 50 mm in %	Gewicht 50 < 60 mm in %	Gewicht 60+ mm in %
unbewässerte Kontrolle		15,7	35,4	25,0	23,9
Dammkrone	nFK < 70 % = 2 mm/d	10,1	24,2	39,5	26,2
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	8,2	19,9	36,1	35,8

Mit der Bewässerung im zweiten Versuch wurde ebenfalls Anfang Juni begonnen. Sie wurde bis Anfang Juli fortgesetzt. Beobachtungen und Aufgrabungen zeigten auch hier positive Wirkungen durch die Verabreichung von Zusatzwasser. Gleichzeitig wurde, wie in den Frühkartoffeln, ein beschleunigtes Keimen und Wachstum der begleitenden Ackerflora im bewässerten Kartoffelbestand beobachtet. Deutliche Niederschläge im Juli und August machten eine weitere Verabreichung von Zusatzwasser ab dem 7. Juli nicht mehr notwendig und sorgten vor allem im Juli nach Berechnungen mittels Bodenwassermodell für eine verstärkte Sickerwasserbildung. Hohe Temperaturen und der ständig feuchte Boden im Juli förderte eine stärkere Verunkrautung der Kartoffelbestände, die in ihrem erreichten Ausmaß, nach Aussagen des Landwirtes vor Ort, als ungewöhnlich hoch eingeschätzt wurde.

Mit einem Ertrag von 185 dt/ha (Tab. 20) und einem Anteil von fast 55 % Kartoffeln die kleiner als 40 mm waren (Tab. 21), fiel die Ernte in der unbewässerten Variante gering aus. Mit Bewässerung in der Dammkrone konnte dieser Ertrag um 190 dt/ha gesteigert werden, wobei sich nur geringfügige Unterschiede in den Varianten mit gesteigerter Bewässerungsintensität zeigten. In der Variante mit Schlauchpositionen zwischen jedem zweiten Damm wurde mit 300 dt/ha ein Ertragszuwachs von 62 % gegenüber der unbewässerten Kontrollvariante erreicht. Die Größenverteilung in den mit Zusatzwasser versorgten Varianten deutet darauf hin, dass die fehlgeschlagene Beikrautregulierung in diesem Jahr durch Nährstoffkonkurrenz einen negativen Einfluss auf das Ertragsgeschehen in allen Varianten hatte.

Tab. 20: Ertragseffekte durch Tropfbewässerung (normaler Legetermin), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014

Schlauchposition	Bewässerung	Ertrag		
		dt/ha	dt/ha	%
unbewässerte Kontrolle		185		
Dammkrone	(1) ab nFK < 70 % = 2 mm/d	375	190	103
	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	365	180	97
	(3) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 6 mm	375	190	103
red. Zw.-Damm	(2) ab nFK < 70 % = 2 mm/d; nFK < 50 % = 4 mm	300	115	62

Tab. 21: Einfluss auf die Größenverteilung durch Tropfbewässerung (normaler Legetermin), Ökologischer Landbau, Standort Schrobenhausen 2014

		Gewicht	Gewicht	Gewicht	Gewicht
		0 < 40 mm in %	40 < 50 mm in %	50 < 60 mm in %	60+ mm in %
unbewässerte Kontrolle		54,9	33,2	11,1	0,7
Dammkrone	nFK < 70 % = 2 mm/d	29,4	29,0	33,4	8,2
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	29,4	44,3	20,3	6,0
	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 6 mm/d	31,9	40,6	20,8	6,6
red. Zw.-Damm	nFK < 70 % = 2 mm/d nFK < 50 % = 4 mm/d	40,9	39,5	16,6	3,0

5.7 Flüssigdüngung über Tropfschläuche (Fertigation)

In den Jahren 2010 bis 2013 wurde auf allen Standorten mit Parzellenversuchsanlagen der Einfluss von zielgerichteter Flüssigdüngung untersucht. Der im Wasser aufgelöste Spezialdünger wurde in Verbindung mit den Tagesgaben der Bewässerung verabreicht, die beim Unterschreiten des betreffenden Bodenfeuchtegrenzwertes notwendig waren. Sofern zum festgelegten Düngungstermin keine Bewässerungsmaßnahmen erforderlich waren, erfolgte die Ausbringung der Flüssigdüngung über Tropfschläuche trotzdem. In diesen Fällen wurden die Wassergaben auf das zur Ausbringung notwendige Maß in Höhe von 2 mm je Termin reduziert (MÜLLER ET AL., 2013).

Nach Müller (2013) haben Kartoffelpflanzen ihren Hauptnährstoffbedarf während des Krautwachstums und die Düngung sollte aus diesem Grund bis zum Ende der Kartoffelblüte abgeschlossen sein. Wird bei der N-Düngung ein stabilisierter Stickstoffdünger verwendet, besteht keine Notwendigkeit die Gaben aufzuteilen (WENDLAND ET AL., 2012).

In der konventionellen Variante wurde der granuliert Dünger kurz vor der Bodenbearbeitung gestreut und mit den folgenden Bearbeitungsmaßnahmen gleichmäßig in den Oberboden eingearbeitet. Da Phosphat, Kalium und Ammonium-N eine geringe Mobilität

besitzen, sollte dadurch sichergestellt werden, dass die Nährsalze im späteren Hauptwurzelbereich den heranwachsenden Kartoffelpflanzen bereits im Jugendwachstum zur Verfügung stehen. In den Varianten mit nachfolgender Fertigation wurde die vor dem Kartoffellegen ausgestreute Düngermenge reduziert und die übrige Menge nach einem festgelegten Plan über die Tropfschläuche in 15 Einzelgaben ausgebracht (Tab. 22 und 23).

Tab. 22: Düngung nach guter fachlicher Praxis der LfL (Konventionell) und Aufteilung der Düngung bei Fertigation, 2010

Düngerart	Konventionell	Mit Fertigation	Termin
	in kg/ha	in kg/ha	der Düngung
Entec 26 (N=26)	101 N		zum Legen
Diammonphosphat (N/P=18/46)	39 N, 100 P ₂ O ₅	15 N, 39 P ₂ O ₅	zum Legen
Kalimagnesia (K=30)	300 K ₂ O	150 K ₂ O	zum Legen
Kalkammonsalpeter (26%N)		54 N	zum Legen
Monammonphosphat (N/P=12/61)		12 N, 61 P ₂ O ₅	Jugendwachstum
Calciumnitrat (N=15,5)		15 N	Auflaufen - Abreife
Kaliumnitrat (N/K=13,5/46)		44 N, 150 K ₂ O	Auflaufen - Abreife
Summe	140 N	140 N	
Summe	100 P ₂ O ₅	100 P ₂ O ₅	
Summe	300 K ₂ O	300 K ₂ O	

Tab. 23: Düngung nach guter fachlicher Praxis der LfL (Konventionell) und Aufteilung der Düngung bei Fertigation, 2011-2013

Düngerart	Konventionell	Mit Fertigation	Termin
	in kg/ha	in kg/ha	der Düngung
Entec 26 (N=26)	133 N	67 N	zum Legen
Diammonphosphat (N/P=18/46)	47 N, 120 P ₂ O ₅	37 N, 95 P ₂ O ₅	zum Legen
Kalimagnesia (K=30)	380 K ₂ O	255 K ₂ O	zum Legen
Kalkammonsalpeter (26%N)		0	zum Legen
Monammonphosphat (N/P=12/61)		5 N, 25 P ₂ O ₅	Jugendwachstum
Calciumnitrat (N=15,5)		34 N	Auflaufen - Abreife
Kaliumnitrat (N/K=13,5/46)		37 N, 125 K ₂ O	Auflaufen - Abreife
Summe	180 N	180 N	
Summe	120 P ₂ O ₅	120 P ₂ O ₅	
Summe	380 K ₂ O	380 K ₂ O	

Da durch Bewässerungsmaßnahmen die Verfügbarkeit von Wasser grundsätzlich gewährleistet und deshalb nicht als ertragsbegrenzend angesehen wurde, lag der Düngung eine hohe Ertragserwartung von 650 dt/ha (2010) bis 850 dt/ha (2011 bis 2013) zugrunde (Tab. 24 u. 25) (MÜLLER ET AL., 2013). Die Höhe der Einzelgaben bei Fertigation wurde dementsprechend angepasst und ab 2011 leicht verändert.

Tab. 24: Zeitlich gestaffelte Ausbringung des Düngers durch Fertigation, 2010

Termin	Düngerart	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		in kg/ha	in kg/ha	in kg/ha
Mai, 2. Woche	MAP	6	31	0
Mai, 3. Woche	MAP	3	15	0
Mai, 4. Woche	Ca-Nitrat	4	0	0
Juni, 1. Woche	MAP, Ca-Nitrat	7	15	0
Juni, 2. Woche	K-Nitrat	3	0	12
Juni, 3. Woche	Ca-Nitrat	2	0	0
Juni, 4. Woche	K-Nitrat	7	0	23
Juli, 1. Woche	Ca-Nitrat	2	0	0
Juli, 2. Woche	K-Nitrat	10	0	35
Juli, 3. Woche	Ca-Nitrat	2	0	0
Juli, 4. Woche	K-Nitrat	10	0	35
August, 1. Woche	Ca-Nitrat	2	0	0
August, 2. Woche	K-Nitrat	7	0	23
August, 3. Woche	K-Nitrat	3	0	12
August, 4. Woche	K-Nitrat	3	0	12
	Summe	71 N	61 P ₂ O ₅	150 K ₂ O

Tab. 25: Zeitlich gestaffelte Ausbringung des Düngers durch Fertigation, 2011-2013

Termin	Düngerart	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
		in kg/ha	in kg/ha	in kg/ha
Mai, 2. Woche	MAP	5	25	0
Mai, 3. Woche	Ca-Nitrat	7	0	0
Mai, 4. Woche	K-Nitrat	7	0	24
Juni, 1. Woche	Ca-Nitrat	7	0	0
Juni, 2. Woche	K-Nitrat	7	0	24
Juni, 3. Woche	Ca-Nitrat	7	0	0
Juni, 4. Woche	K-Nitrat	7	0	24
Juli, 1. Woche	Ca-Nitrat	4	0	0
Juli, 2. Woche	K-Nitrat	4	0	13
Juli, 3. Woche	Ca-Nitrat	4	0	0
Juli, 4. Woche	K-Nitrat	4	0	13
August, 1. Woche	Ca-Nitrat	4	0	0
August, 2. Woche	K-Nitrat	4	0	13
August, 3. Woche	Ca-Nitrat	4	0	0
August, 4. Woche	K-Nitrat	4	0	13
	Summe	79 N	25 P ₂ O ₅	125 K ₂ O

In der Tabelle 26 sind die Ergebnisse der unbewässerten Kontrollvariante und die bewässerten Varianten mit und ohne Fertigation zusammengefasst. Ein positiver Einfluss auf den Ertrag und die Qualität von zeitversetzter Flüssigdüngung über die vorhandenen

Tropfschläuche konnte gegenüber den konventionell gedüngten Varianten im Versuchszeitraum nicht festgestellt werden.

Tab. 26: Ertragseffekte durch Bewässerung und Fertigation

Jahr	Standort	Ertrag unbewässert	Ertrag bewässert	Ertrag bewässert mit Fertigation
		dt/ha	dt/ha	dt/ha
2010	Roth	470	690	610
2010	Regensburg	515	685	640
2010	Freising	770	770	790
2011	Roth	860	1000	910
2011	Regensburg	675	770	640
2011	Neuburg	730	820	770
2012	Roth	500	940	940
2012	Aichach	860	900	900
2012	Pförring	640	660	650
2013	Aichach	725	775	705

6 Versuchsbegleitende Bodenfeuchtemessungen

6.1 Messverfahren und Laboruntersuchungen

Um den Bodenfeuchteverlauf und dessen Beeinflussung durch die Bewässerung zu erfassen, wurden in der unbewässerten Kontrolle sowie in ausgewählten Varianten Sensoren zur kontinuierlichen Messung in verschiedenen Tiefen installiert. Die Messdaten wurden stündlich von Datenloggern erfasst und konnten über ein Mobilfunknetz abgerufen werden. Als Messsonden kamen zunächst wassergefüllte Tensiometer und Matrixsensoren (SIS) zur Messung der Bodensaugspannung zum Einsatz. Nachteil dieser Messmethode war, dass die Tensiometer bei geringer Bodenfeuchte immer wieder trockenfielen, was einen hohen Wartungsaufwand und Datenausfälle zur Folge hatte. Aus diesem Grund wurde das Messsystem für 2013 auf volumetrische Bodenfeuchtesensoren (Typ FDR, SMT-100) umgerüstet bzw. durch eine neue Messstation erweitert. Vorteilhaft sind hier der geringe Wartungsaufwand und das schnelle Ansprechverhalten auf Bodenfeuchteänderungen. Nachteilhaft ist, dass nicht mehr die Saugspannung direkt angegeben werden kann. Hierfür mussten erst ungestörte Stechzylinderproben zur Bodenartenbestimmung und zur Erstellung von Saugspannungskurven im Labor gezogen werden. Wichtige physikalische Kennwerte wie (nutzbare) Feldkapazität und Totwasservolumen sowie die Bodenart wurden so bestimmt. Bei einer Messanlage wurden zusätzlich wartungsfreie Matrixsensoren zur Bodensaugspannungsmessung installiert. Durch gravimetrische Wassergehaltbestimmungen an Bodenproben wurden die Sensormesswerte von Zeit zu Zeit überprüft.

6.2 Beurteilung der Bodenfeuchtemessungen

Die Bewässerungssteuerung erfolgte auf Grundlage des Bewässerungsmodells und ab 2013 in Anlehnung an die Sensormesswerte. Diese konnten täglich stundenaktuell online abgerufen werden und dienten in Kombination mit der Wettervorhersage und nach Rücksprache mit dem Landwirt als Entscheidungsgrundlage für die Steuerung.

Um einen Bodenfeuchteverlauf abbilden zu können, wurden in 2 Tiefenstufen je 2 FDR und 1 Matrixsensor installiert. Der 1. Messpunkt befand sich ca. 15 cm und der 2. Messpunkt 40 cm unterhalb der Dammkrone. Beim M-Dammverfahren wurde dieses Schema im Zwischendammbereich (dort, wo der Tropfschlauch liegt) wiederholt (Abb. 18 und 19).



Abb. 18: Aufbau der Bodenfeuchtemessanlagen auf 2 Standorten

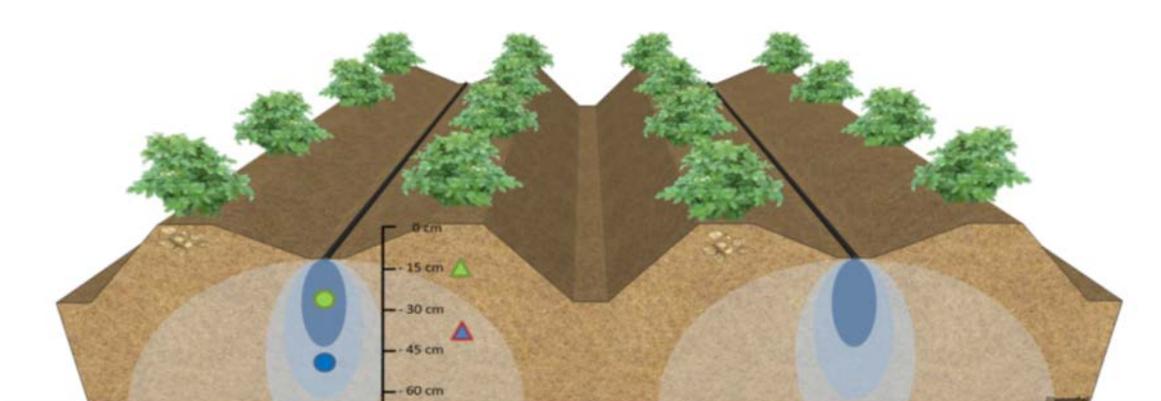


Abb. 19: Lage der Sensoren hier beim M-Dammverfahren

Die Messergebnisse zeigen, dass die Sensoren sehr gut auf Wassergehaltsänderungen reagieren. Anhand der Messwerte lässt sich sehr gut beurteilen, ob der Wassergehalt im Boden zu- oder abnimmt. Um allerdings zu beurteilen, inwieweit die Sensormesswerte dem tatsächlichen Wassergehalt entsprechen, ist es notwendig, eine gravimetrische Bestimmung durchzuführen. Gerade nach dem Sensoreinbau sind größere Abweichungen möglich. So bedarf es immer noch einer Begutachtung vor Ort, um die Messergebnisse richtig einschätzen zu können.

Abbildung 20 zeigt exemplarisch den mittleren volumetrischen Wassergehalt in der unbewässerten Kontrolle. Nach ausbleibenden Niederschlägen und hohen Temperaturen Ende Mai nimmt der Wassergehalt schnell ab und erreicht bald den Totwasserbereich. Gleichzeitig steigt die Bodensaugspannung stark an (Abb. 21).

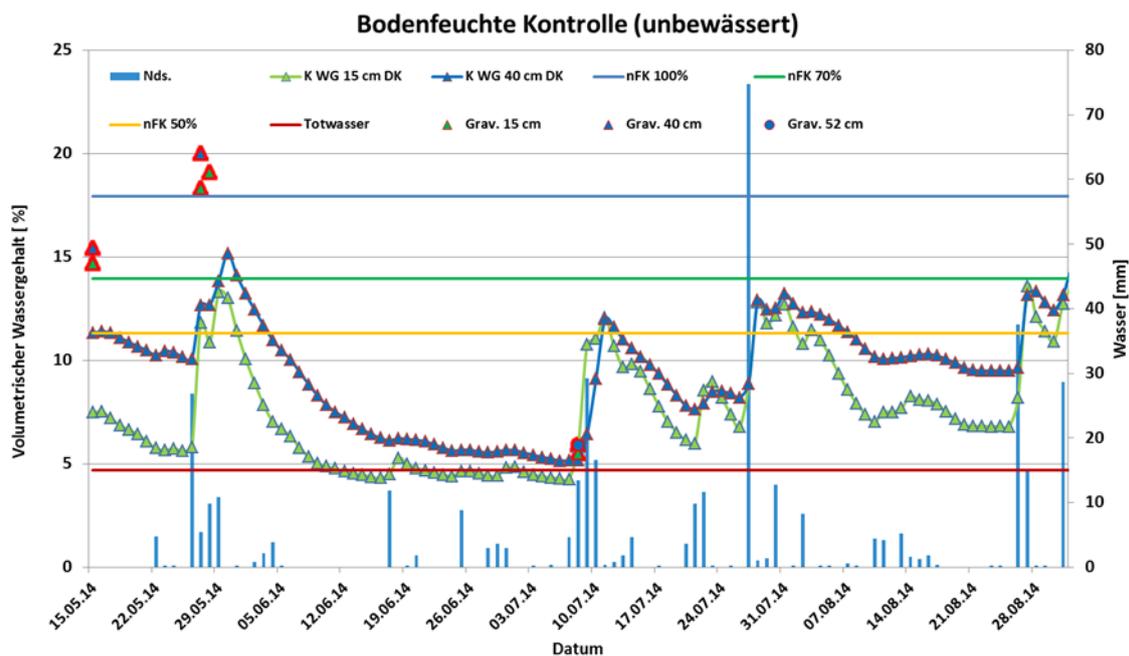


Abb. 20: Bodenfeuchteverlauf der unbewässerten Kontrolle in 15 und 40 cm Tiefe im Jahr 2014

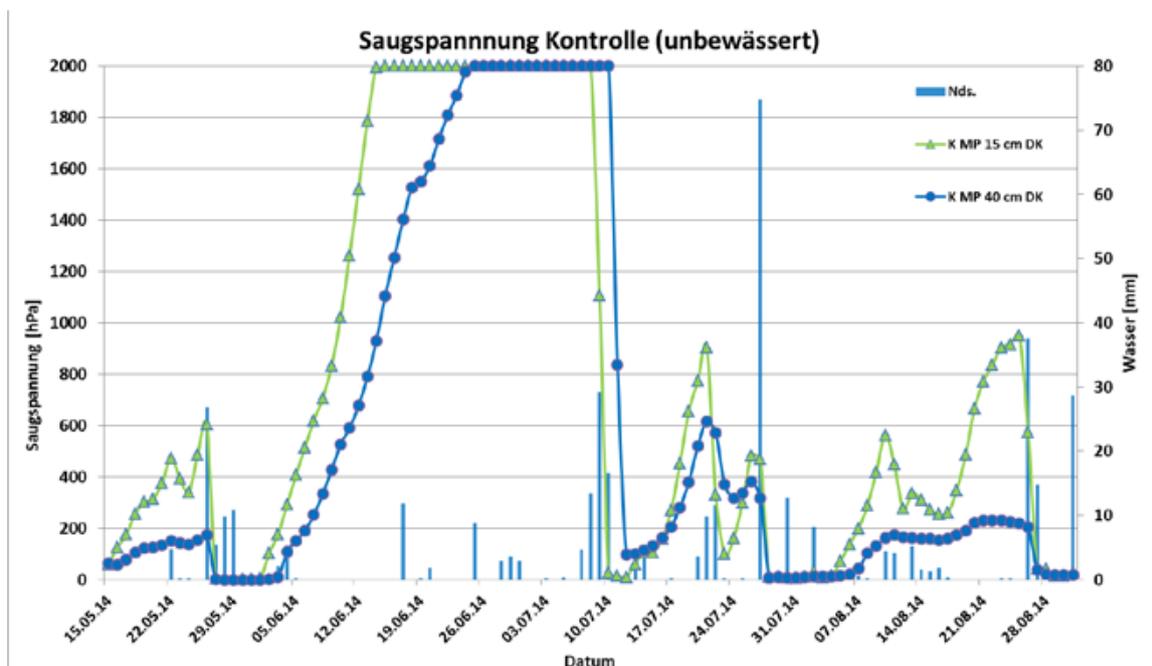


Abb. 21: Saugspannungsverlauf der unbewässerten Kontrolle in 15 und 40 cm Tiefe

Im Gegensatz dazu verhindern die Bewässerungsgaben von 2 bzw. 4 mm die schnelle Austrocknung, der Bodenwassergehalt steigt wieder an. Lediglich in 15 cm Tiefe reichen die Wassergaben nicht aus, um den Oberboden feucht zu halten (Abb. 22). Dies kann erst durch höhere Niederschlagsmengen erreicht werden. Durch die Bewässerung gelingt es die Saugspannungswerte in 40 cm auf einem niedrigen Niveau zu halten (Abb. 23). Gravimetrische Wassergehaltsbestimmungen zeigen, dass die Sensoren insbesondere kurz nach dem Einbau zu geringe Wassergehalte messen. Wie auch schon bei anderen Messungen festgestellt, dürfte die Hauptursache in der geringen Lagerungsdichte des Bodens zu

diesem Zeitpunkt liegen. Zum einen beeinflussen viele luftgefüllte Poren das Messergebnis, zum anderen kann der Boden/Sensorkontakt gestört sein.

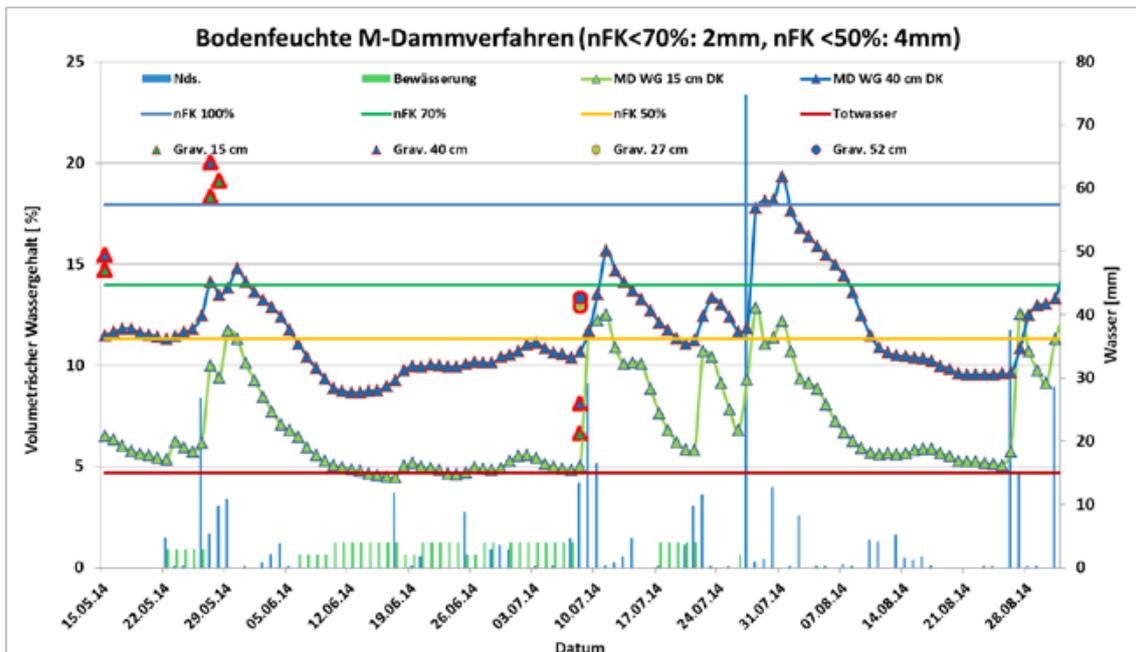


Abb. 22: Bodenfeuchteverlauf der bewässerten Variante (2/4 mm) im M-Dammverfahren in 15 und 40 cm Tiefe

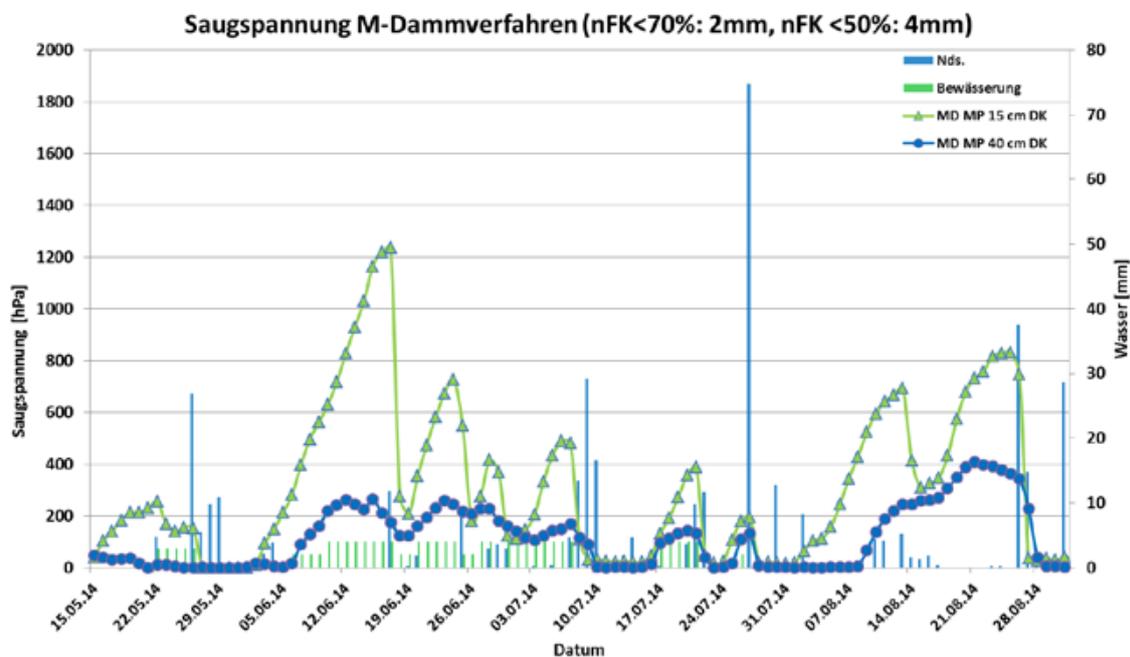


Abb. 23: Saugspannungsverlauf der bewässerten Variante (2/4 mm) im M-Dammverfahren in 15 und 40 cm Tiefe

Sensormessungen und Bodenprofile zeigen, dass es beim Dammkronenverfahren gelingt, den Damm optimal zu befeuchten. Beim M-Dammverfahren gelingt es zwar, den Damm vor dem Austrocknen zu bewahren, eine gleichmäßige Durchfeuchtung kann aber bei einem Sandboden nicht erreicht werden. Im Bereich des Knollennestes trocknete der Boden hier stärker aus (Abb. 24).



Abb. 24: Links: Wasserverteilung im Dammkronenverfahren: Der komplette Damm ist bis in die Tiefe gut durchfeuchtet. Rechts: Wasserverteilung im M-Damm: Im sandigen Boden reicht die Kapillarität nicht aus, um den Damm im Bereich des Knollennestes ausreichend zu durchfeuchten

7 Diskussion der Ergebnisse

Mit Tropfbewässerung wird nur ein Teil des durchwurzelten Bodens durchfeuchtet (Abb. 25). Je sandiger das Bodensubstrat, desto schmäler sind die Durchfeuchtungszonen unter den Tropfstellen. Werden zu hohe Einzelgaben verabreicht, kann das Wasser nicht in den Poren festgehalten werden und sickert durch den Bodenkörper. Mit steigendem Ton- und Schluffanteil verbessert sich die waagrechte Wasserverteilung, man kommt mit weniger Tropfstellen je Flächeneinheit aus. Das mindert die Verfahrenskosten.

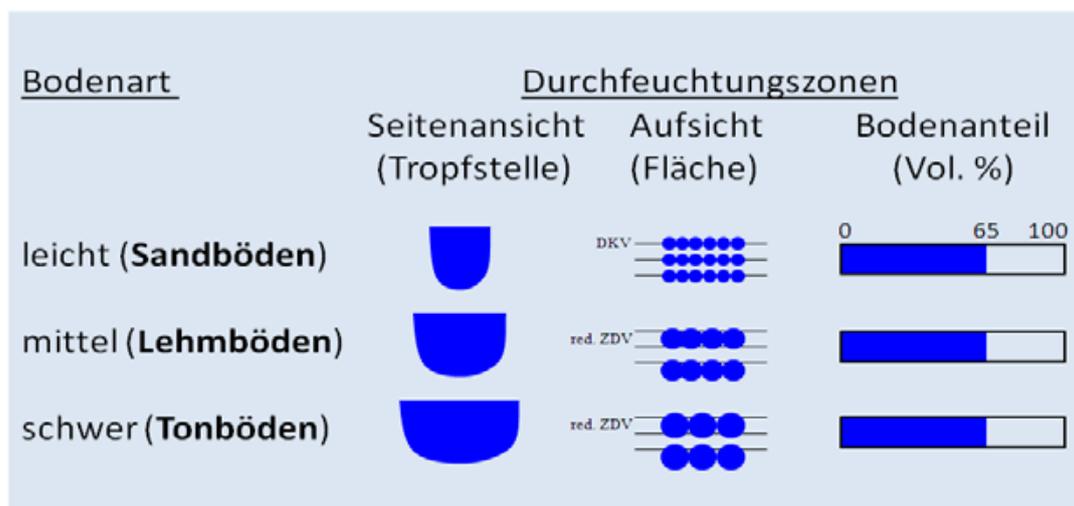
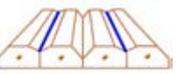


Abb. 25: Grundprinzip der Tropfbewässerung (Modellhafte Darstellung)

Beim Dammkronenverfahren wird der Hauptwurzelbereich unmittelbar durchfeuchtet und gekühlt (Tab. 27). Daraus ergibt sich ein wesentlicher Vorteil dieser Schlauchposition. Bei den Zwischendammverfahren besteht ein größerer Abstand zwischen den Durchfeuchtungszonen unter den Dammenzwischenräumen und dem Dammkern. Die Tropfstellen befinden sich damit nicht nur seitlich versetzt zur gepflanzten Mutterknolle, sondern liegen auch deutlich tiefer. Das verkleinert das Volumen des Bodenraumes, der verabreichte

Wassergaben pflanzenverfügbar speichern kann und durchwurzelt ist. Das reduzierte Zwischendammverfahren hat nur die Hälfte an Tropfstellen pro Flächeneinheit. Hierbei verringert sich die Speicherkapazität des für die Pflanzen verfügbaren Bodenwassers zusätzlich. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass nur die Hälfte an Tropfschläuchen verwendet werden muss. Des Weiteren sinken bei dieser Art der Bewässerung die Arbeitserledigungskosten für das Verlegen und Bergen der eingesetzten Tropfschläuche im Vergleich zum Dammkronenverfahren erheblich.

Tab. 27: Verfahren der Tropfbewässerung (Beispiel: Sandboden, nFK = 10 Vol.-% Bewässerungsstart bei nFK = 50 %)

				
Schlauchposition	Dammkrone	Zw.-Damm	red. Zw.-D.	M-Damm
Tropferabstand / cm	30	30	30	30
Schlauchabstand / cm	75	75	150	150
Anzahl Tropfstellen / m ²	4,4	4,4	2,2	2,2
Wurzeltiefe in Feuchtezone / cm	60	45	45	52
Anteil durchfeuchteter Boden / %	31	24	12	14
Mögliche Einzelwassergabe / mm	9	3,5	3,5	4,3
Arbeitsbelastung	hoch	etwas geringer	geringer	geringer

Im M-Dammverfahren ist beabsichtigt, die Vorteile der Tropfbewässerung in der Dammkrone mit den positiven Eigenschaften der reduzierten Zwischendammvariante zu verbinden. Hier werden kompakte, doppelte Kartoffeldämme mit einem erhöhten Zwischendambereich geformt, der es ermöglicht, die Tropfschläuche höher abzulegen. Durch diese erhöhte Position des Tropfschlauches, die über der gepflanzten Mutterknolle liegt, verbessert sich die Wasserverteilung im Damm und es vergrößert sich das Bodenvolumen, in dem pflanzenverfügbares Wasser entgegen der Schwerkraft festgehalten wird.

8 Internet-gestütztes Bewässerungsmodell

8.1 Rahmenbedingungen und Zielsetzungen der Bewässerung

Grundsätzlich sollte jede Bewässerung, ob durch Überkopfberegnung oder Tropfbewässerung, an den Bedarf der Pflanzenbestände und an die freien Wasserspeicherkapazitäten der Böden angepasst werden. Nur bei dieser Vorgehensweise können die Wassergaben in der Durchwurzelungszone vollständig pflanzenverfügbar gehalten werden, ohne dass Sickerwasser entsteht. In der Regel wird der Bewässerungsstart bei Unterschreitung der Bodenfeuchte in Höhe von 50 % der nutzbaren Feldkapazität empfohlen. Die Höhe der Einzelgaben soll nicht größer sein als die freien Speicherkapazitäten der Böden.

Unter Berücksichtigung der einzelbetrieblichen Situation sind häufig noch weitere Faktoren maßgeblich, die auf das gewählte Bewässerungskonzept Einfluss haben. Bei begrenzten Beregnungskapazitäten oder einer limitierte Brunnenleistung empfiehlt es sich, mit der Bewässerung früher zu beginnen. Erfolgt der Start bei der Unterschreitung einer nutzbaren

Feldkapazität von 70 %, können anfänglich reduzierte Gaben helfen, einen abzusehenden Engpass zu einem späteren Zeitpunkt zu vermeiden.

8.2 Bodenwasser-Modell Weihenstephan

Um Praxisbetriebe bei der Planung, Umsetzung und Dokumentation von Bewässerungsmaßnahmen zu unterstützen, wurden zwei Online-Anwendungen entwickelt. Ausgangspunkt der Betrachtung ist bei beiden Anwendungen jeweils der Beregnungsbetrieb mit seinen spezifischen Rahmenbedingungen, seinen Möglichkeiten und individuellen Zielsetzungen. Darauf aufbauend können vom Anwender geeignete Bewässerungskonzepte erarbeitet werden. Die Programme dienen darüber hinaus als Werkzeug zur Bewertung der Bodenfeuchte, der Bewässerungsbedürftigkeit der Pflanzenbestände und der Höhe geeigneter Wassergaben. Entscheidungen (Termine, Gabenmengen) werden vom Anwender getroffen.

Beide, im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Online-Anwendungen werden seit dem Projektende auf der Internet-Seite der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V. (ALB Bayern e.V.) kostenfrei angeboten unter www.alb-bayern.de/De/Themen/Aussenwirtschaft/BodenwasserModell/be-waesserungs-app-bodenwasser-modell-weihenstephan_BewaesserungsApp.html.

Mit der Bewässerungs-App lässt sich der Vorrat des im Boden pflanzenverfügbaren Wassers berechnen. Die tägliche Verdunstung wird mit Rechenmodellen bestimmt und die jeweils ermittelte Verdunstungsmenge vom Bodenwasserwert des Vortages abgezogen. Wird ein zuvor festgelegter Bodenfeuchtegrenzwert unterschritten, erfolgt die Empfehlung zu bewässern. Bewässerungsgaben und gefallene Niederschläge werden dem Bodenwasser hinzu addiert, sofern diese vom durchwurzelten Boden pflanzenverfügbar zwischengespeichert werden können. Wassereinträge, die darüber hinausgehen, werden als „versickert“ gewertet.

Die Ermittlung des täglichen Wasserbedarfs basiert auf der Auswertung von Wetterdaten. Es stehen die Daten von 126 bayerischen Wetterstationen zur Verfügung. Die Auswahl erfolgt durch Anklicken in einer Karte oder durch Markieren einer dem eigenen Standort benachbarten Station in einem Auswahlfenster (Abb. 26, Bild links). Gerade in den Sommermonaten sind Regenfälle häufig lokal begrenzt. Bereits auf kleinem Raum treten immer wieder große Unterschiede auf. Deshalb ist es in der Online-Anwendung möglich, die Niederschläge am Standort der jeweiligen Wetterstationen durch die vom Nutzer vor Ort gemessenen Niederschläge unter dem Menüpunkt Korrekturen anzupassen.

Die Fähigkeit von Böden, Wasser entgegen der Schwerkraft festzuhalten, ist stark von der jeweiligen Bodenart abhängig. Der Anteil des pflanzenverfügbaren Bodenwassers wird als nutzbare Feldkapazität (nFK) gekennzeichnet und üblicherweise in Vol.-% angegeben. Bei der Bewässerungs-App lassen sich landwirtschaftlich genutzte Flächen aus einem Untermenü in eine von 8 Bodenarten einstufen. Den unterschiedlichen Bodenarten sind in der Praxis häufig anzutreffende Eigenschaften zugeordnet. Durch optionale Eingaben lassen sich diese Einstellungen für den betreffenden Standort weiter präzisieren (Abb. 26 Bild rechts).

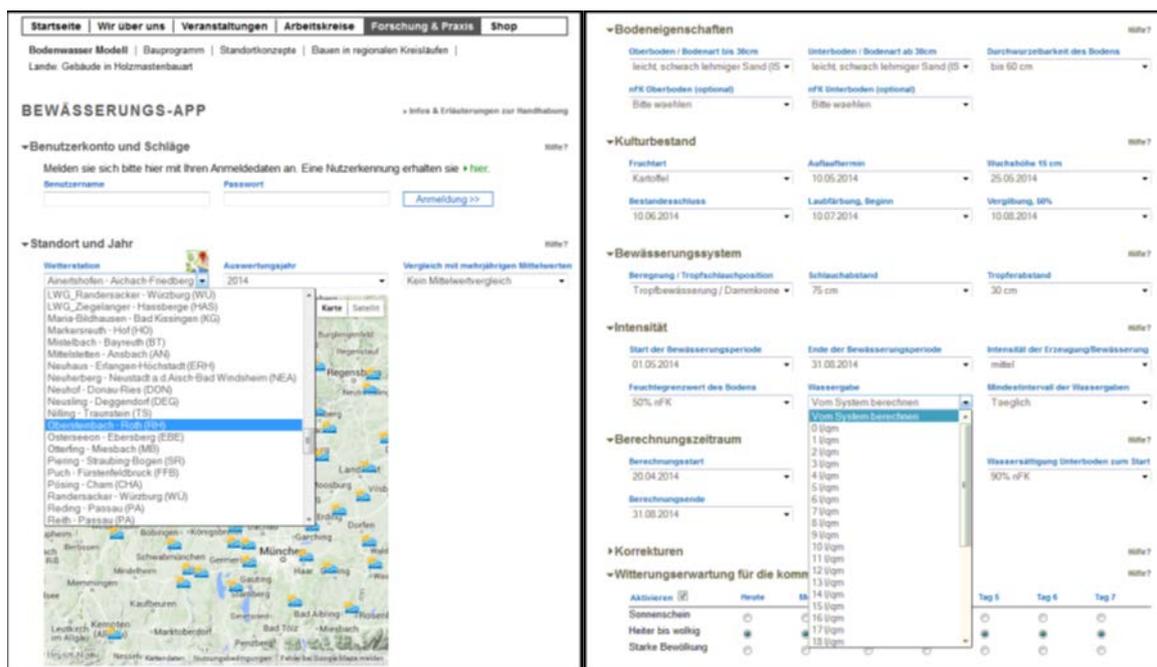


Abb. 26: Online-Anwendung zur Unterstützung bei der Planung, Umsetzung und Dokumentation von Bewässerungsmaßnahmen, ALB Bayern e.V.

Vergleichbar den beschriebenen Einstellungen zum Boden und der nutzbaren Feldkapazität können weitere Eingaben zum Entwicklungsstadium des Kulturbestandes (z. B. Aufpflanztermin, Datum Bestandesschluss und Laubverfärbung), dem Bewässerungssystem (z. B. Überkopfberegnung flächig, Tropfbewässerung Dammkrone) sowie der Bewässerungsintensität und dem Berechnungszeitraum der Bewässerung gemacht werden. Zusätzlich zu Kartoffeln wurde die Bewässerungs-App auf Basis von Versuchsergebnissen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen für die Anwendung in fünf weiteren landwirtschaftlichen Kulturarten angepasst.

In der Ergebnisauswahl kann der Nutzer individuell festlegen, mit welchen Informationen die Auswertung in tabellarischer und graphischer Form vorgenommen werden soll. Die darauf basierende Darstellung der Berechnungen des Bodenwassermodells ermöglicht es dem Anwender, sich einen sofortigen Überblick über die Summenwerte, den Witterungsverlauf, den Verlauf des Bodenwassers und die klimatische Wasserbilanz auf seinem Standort zu verschaffen. Gleichzeitig bieten diese aufbereiteten Informationen dem Nutzer durch die Darstellung des Istzustandes eine Hilfestellung bei der Beurteilung, ob und in welcher Höhe sofortige Bewässerungsmaßnahmen vorgenommen oder unterlassen werden sollten.

In die Online-Anwendung wurde als weitere Entscheidungshilfe eine „Witterungserwartung für die kommenden Tage“ eingearbeitet, welche den zukünftigen Verlauf prognostiziert. Grundsätzlich stehen dem System Wetterdaten (Messwerte) für Tage in der Vergangenheit zur Verfügung. Um Bewässerung dennoch vorausschauend planen zu können, lässt sich die vom Nutzer zu erwartende Witterung für die kommenden Tage in drei Klassen einteilen. Die Einstufungen haben Einfluss auf die veranschlagte Intensität der Verdunstung und bedingen die Höhe des täglich zu kalkulierenden Wasserbedarfs. Sind für die Planungen zusätzlich „zu erwartende Niederschläge“ zu berücksichtigen, können diese unter dem Menüpunkt Korrekturen ergänzt werden. Mit fortschreitender Zeit werden die

den Erwartungswerten zugeordneten Wetterdaten automatisch mit täglich gemessenen Werten am Standort der ausgewählten Wetterstation überschrieben.

Die Einzelgaben-App ist eine Spezialanwendung und dient der Ermittlung der maximalen Höhe von Einzelwassergaben, die vom durchwurzelten Bodenraum gerade noch vollständig aufgenommen werden können, damit kein Sickerwasser entsteht. Es werden die Bodeneigenschaften, kulturartspezifische Faktoren zum Wurzeltiefenwachstum und Kennzahlen zur verwendeten Bewässerungstechnik berücksichtigt. Kennwerte der Tropfbewässerung finden besondere Beachtung.

9 Literaturverzeichnis

- ALLEN, R. G., PEREIRA, L. S., RAES, D., SMITH, M., (1998): Crop evapotranspiration - Guide-lines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- BATTY, J. C., KELLER, J., HAMAD, S. N. (1975): Energy inputs to irrigation. Journal of the Irrigation and Drainage Division 101 (4), 293-307.
- CAMP, C. R. (1998): Subsurface drip irrigation: a review. Transactions of the ASAE 41(5), 1353-1367.
- DASBERG, S., OR, D. (1999): Drip Irrigation. Springer Verlag, Berlin.
- DE TAR, W. R., PHENE, C. J., CLARK, D. A. (1994): Subsurface drip vs furrow irrigation: 4 years of continuous cotton on sandy soil. In Beltwide Cotton Conf., 542-545. Memphis, Tenn.: Nat. Cotton Council.
- DE TAR, W. R., BROWNE, G. T., PHENE, C. J., SANDEN, B. L. (1996): Real-time irrigation scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems. In: Camp, C.R., Sadler, E. J. und Yoder, R. E.: Proc. Int'l. Conf. on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, 812-824, ASAE, St. Joseph.
- FAO (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION) (2011): Climate change, water and food security. FAO Water Reports 36.
- KTBL FELDBEWÄSSERUNG, 2009: Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. KTBL, Darmstadt.
- LAMM, F. R., TROOIEN, T. P. (2003): Subsurface drip irrigation for corn production: a review of 10 years of research in Kansas. Irrigation Science 22, 195-200.
- MÜLLER, M.: Ganz nah dran. In: dlz (2011), Nr. 6, S. 39 - 42
- MÜLLER, M., DEMMEL, M., BRANDHUBER, R.: Tropfenweise die Kartoffeln wässern. In: Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt (2011), Nr. 47, S. 43 - 45
- MÜLLER, M., M. DEMMEL, R. BRANDHUBER, KELLERMANN, A.: Tropfbewässerung von Speisekartoffeln - aktuelle Versuchsergebnisse aus Bayern. In: Kartoffelbau (2011), Nr. 4, S. 36 - 42
- MÜLLER, A., HEIMBACH, U., ZELLNER, M. (2013): Bericht zur Internationalen Konferenz zum Diabrotica-Forschungsprogramm vom 14. bis 16. November 2012 im Julius-

- Kühn-Institut in Berlin-Dahlem. Journal für Kulturpflanzen, Band 65, Hrsg.: JKI, S. 27 - 28
- MÜLLER, M., DEMMEL, M., BRANDHUBER, R., KELLERMANN, A. (2013): Erdäpfel tropfengenau bewässern - Tropfenbewässerung statt Trommelberegnung spart Wasser und Energie. Der Pflanzenarzt, 11-12, Hrsg.: Österreichischer Agrar-verlag, S. 16 - 18
- MÜLLER, M., DEMMEL, M., KELLERMANN, A. (2013): Tropfgenaues Düngen lohnt nicht. In dlz agrar magazin, Heft 5/2013, S. 42-46
- MÜLLER, M., DEMMEL, M., BRANDHUBER, R., KELLERMANN, A. (2014): Bewässern mit System. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt (BLW), 20/2014, S. 32 – 33
- MÜLLER, M., DEMMEL, M. (2014): Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen (Bedarf, Verfahren, Internet-gestütztes Bewässerungsmodell). Tagungsband zur landtechnischen Jahrestagung „Neue Techniken im Ackerbau“ am 26.11.2014 in Deggen-dorf. Hrsg.: Dr. G. Wendl, S. 83 - 98 (LfL-Schriftenreihe 7/2014)
- MÜLLER, M., DEMMEL, M. (2014): Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. LfL-Schriftenreihe, Heft 7/2014 S. 92
- NEIBLING, H. UND BROOKS, R. (1995): Potato production using subsurface drip irrigation – Water and nitrogen management. In: Lamm, F. R.: Microirrigation for a Changing World: Conserving Resources, Preserving the Environment. Proc. 5th Int. Microirrig. Congr., 656-663, ASAE, St. Joseph.
- NIR, D. (1982): Drip Irrigation. In: Finkel, H. J. (1982): Handbook of irrigation technology. Volume 1. CRC Press, Florida.
- OPENA, G. UND PORTER, G. (1999): Soil management and supplemental irrigation effects on Potato: II. Root growth. Agronomy Journal 91 (3), 426-431.
- PASCHOLD, P.-J. (2010). Bewässerung im Gartenbau. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- PASCHOLD, P.-J., FRÜHAUF, C., SCHALLER, J., KLEBER, J., MAYER, N. (2011): Geisenheimer Bewässerungssteuerung und FAO-Grasverdunstung. DGG-Proceedings, Vol. 1, No. 5, 1-5.
- PHENE, C. J., DETAR, W. R. UND CLARK, D. A. (1992): Real-time irrigation scheduling of cotton with an automated pan evaporation system. Applied Engineering in Agriculture 8 (6), 787-793.
- RADKE, W. UND RIEKMANN, W. (1990): Krankheiten und Schädlinge der Kartoffel. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen-Buer.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, P., BLUME, H.-P., BRÜMMER, G. W., SCHWERTMANN, U., HORN, R., KÖGEL-KNABLER, I., STAHR, K., AUERSWALD, K., BEYER, L., HARTMANN, A., LITZ, N., SCHEINOST, A., STANJEK, H., WELP, G., WILKE, B.-M. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg und Berlin.
- SCHÜSSELER, P. UND ZABELTITZ C. (2004): Umweltgerechte Techniken in der Pflanzenproduktion. Ulmer Verlag, Stuttgart.
- SHOJI, K. (1977): Drip irrigation. Scientific American 237 (5), 62-68.

- STATISTISCHES BUNDESAMT (2010): Bodenbearbeitung, Bewässerung, Landschaftselemente. Erhebung über landwirtschaftliche Produktionsmethoden (ELPM). Fachserie 3, Heft 5.
- UMWELTBUNDESAMT (2015): Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Climate Change 24/2015, Dessau/Roßlau, 688 S.
- VAN LOON, C.D. (1981). The effect of water stress on potato growth, development and yield. American Journal of Potato Research 58 (1), 51-69.
- WENDLAND, M., FISCHER, A. (2012): Kartoffelschläge brauchen N. Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt, Heft 13/2012, 43-45

Danksagung

Die Autoren danken

- dem Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten für die Förderung des Projekts,
- den Landwirten Bernreuther, Hatzl, Heiß, Kainz, Lichtinger, Moosheimer, Neff und Tyroller für die vertrauensvolle Zusammenarbeit und für die tatkräftige Unterstützung der Projektarbeiten auf ihren Betrieben,
- allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der LfL-Arbeitsgruppen „Bodenphysik, Bodenmonitoring“, „Ackerbau und Prozesstechnik“ und „Pflanzenbausysteme, Züchtungsforschung und Beschaffenheitsprüfung bei Kartoffeln“ für die mit hoher Motivation und Präzision geleistete Arbeit im Feld, im Labor und am Schreibtisch.