

Untersuchungen zur Entwicklung einer wassersparenden Methode
für die streifenförmige Beregnung von Dammkulturen im
Feldgemüsebau

Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

vorgelegt am Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften der Universität Kassel
von Daniela Schwarz aus Wriezen/Brandenburg

Witzenhausen, April 2019

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich für Ökologische Agrarwissenschaften, Fachgebiet Agrartechnik der Universität Kassel als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Agrarwissenschaften angenommen.

Tag der mündlichen Prüfung: 12.07.2019

Erster Gutachter: Prof. Dr. Oliver Hensel Zweiter Gutachter: Prof. Dr. Stephan Peth

Mündliche Prüfer: Prof. Dr. Peter von Fragstein und Niemsdorff, Dr. Christian Krutzinna

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Texten und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne Zustimmung des Autors urheberrechtswidrig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung sowie die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen. © 2019

Vorwort

Im Mittelpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit standen Untersuchungen zur Entwicklung einer wassersparenden Methode für die Beregnung von Dammkulturen. Die neue Methode sollte unter Nutzung der Düsenwagentechnik Dämme im Feldgemüsebau streifenförmig beregnen. Die Entwicklungsarbeit fand im Rahmen des vom Innovationsprogramm der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) geförderten Forschungsprojektes „Entwicklung eines wassersparenden Bewässerungsverfahrens durch mehrphasige Streifenapplikation“ von 2012 bis 2016 im Förderbereich „Effizienter und nachhaltiger Umgang mit der Ressource Wasser in der Landwirtschaft“ statt. Ziele des oben genannten Projektes waren neben der Einsparung von Wasser die Reduzierung von Wassererosion und die Verbesserung der Bestandsführung der Feldkultur.

Die Projektkoordination war am Fachgebiet Agrartechnik (Leitung Prof. Dr. O. Hensel) der Universität Kassel, Fachbereich 11 Ökologische Agrarwissenschaften in Witzenhausen, angebunden. Projektpartner war die Firma Beinlich Agrarpumpen und –maschinen GmbH aus Ulmen, ein auf die Herstellung von mobilen Beregnungsmaschinen spezialisiertes Familienunternehmen. Der Projektzeitraum umfasste insgesamt drei Vegetationsperioden. In Versuchen an der Universität Kassel in Witzenhausen wurde von 2013 bis 2015 unter Labor- und Praxisbedingungen ein Zusatzmodul für einen Düsenwagen konstruiert und optimiert, mit dem eine mehrphasige Streifenapplikation auf Dämmen möglich ist. Zusammen mit der Firma Beinlich fanden in den Jahren 2013 und 2014 auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, dem Lehr-, Versuchs- und Transferzentrum für Ökologische Landwirtschaft und Nachhaltige Regionalentwicklung der Universität Kassel, Feldversuche statt. Im Jahr 2015 wurde auf der Versuchsanlage für Solar- und Bewässerungstechnik der Universität Kassel in Witzenhausen die Wirksamkeit der Applikation mehrerer, zeitversetzter Teilwassergaben mit dem Prototyp eines Dammschlittens untersucht.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Grundlagen der Bewässerung und Beregnung	5
2.1	Bewässerungslandwirtschaft in Deutschland	5
2.1.1	Wasserbedarf.....	5
2.1.2	Wasser im Boden	10
2.1.3	Bewässerungs- und Beregnungsverfahren	13
2.1.4	Auswirkungen der Beregnung.....	16
2.1.5	Entwicklungstendenzen in der Beregnungstechnik.....	19
2.2	Dammkultur als Anbaumethode.....	20
2.2.1	Technik der Anbaumethode	21
2.2.2	Bewässerungspraxis beim Dammanbau	23
2.2.3	Möhrenanbau auf Dämmen	25
3	Entwicklung einer Dammkronenberegnung.....	30
3.1	Problemstellung.....	30
3.2	Grundlagen zur Dammkronenberegnung	31
3.2.1	Prozesse und Einflussfaktoren.....	32
3.2.2	Anforderungen und Entwicklungsschritte.....	34
3.3	Design eines Applikationssystems mit Führung am Damm.....	35
3.4	Material und Methoden der Feldversuche.....	39
3.4.1	Standort	39
3.4.2	Versuchsaufbau und Datenerhebung Feldversuch 2013	40
3.4.3	Versuchsaufbau und Datenerhebung Feldversuch 2014	42
3.5	Ergebnisse der Dammkronenberegnung	44
3.5.1	Wirksamkeit der Dammkronenberegnung	44
3.5.2	Verteilgenauigkeit auf der Dammkrone	45
3.5.3	Durchfeuchtung der Dammkrone.....	47
3.6	Diskussion zur Dammkronenberegnung	48

4	Mehrteilige Wasserapplikation	53
4.1	Problemstellung.....	53
4.2	Weiterentwicklung der Dammkronenberegnung	53
4.2.1	Reduzierung der Beregnungsintensität.....	54
4.2.2	Teilung der Wassergabe	57
4.2.3	Konstruktion des Dammschlittens.....	59
4.3	Material und Methode des Feldversuchs.....	60
4.3.1	Standortbeschreibung	60
4.3.2	Doppelschlitten als Applikationsmodul für den Feldversuch	63
4.3.3	Versuchsanordnung Feldversuch 2015	67
4.3.4	Datenerhebung zur Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm	69
4.3.5	Datenerhebung zur Bodenerosion durch Wasser	70
4.3.6	Datenerhebung zur Bestandsentwicklung der Möhre.....	76
4.4	Ergebnisse zur Teilung der Wassergabe	78
4.4.1	Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm	78
4.4.2	Bodenerosion durch Wasser.....	89
4.4.3	Bestandsentwicklung der Möhre.....	91
4.5	Diskussion zur Teilung der Wassergabe	94
4.5.1	Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm	94
4.5.2	Bodenerosion durch Wasser.....	96
4.5.3	Bestandsentwicklung der Möhre.....	97
5	Übergreifende Diskussion	98
6	Schlussfolgerung und Ausblick.....	103
7	Zusammenfassung.....	105
8	Literaturverzeichnis.....	IX

Abkürzungsverzeichnis

AI	Alluvium (Schwemmlandböden)
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
BBCH	Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt und Chemische Industrie
BI	Beregnungsintensität
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
CA	Contact angle
DIN	Deutsche Industrienorm
DITSL	Deutsches Institut für Tropische und Subtropische Landwirtschaft
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETP	Potentielle Evapotranspiration
ETR	Reale Evapotranspiration
FG	Fachgebiet
FK	Feldkapazität
GPS	Geographisches Positionierungssystem
GWN	Grundwasserneubildung
IAASTD	International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IR	Interzeptionsverdunstung
KA	Kartieranleitung
KI	Konfidenzintervall
KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
LfL	Bayerische Landesversicherungsanstalt für Landwirtschaft
LK	Landwirtschaftskammer
LLH	Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen
MANOVA	Multivariate Varianzanalyse
N	North (Norden)
NI	Niederschlagsintensität
N E	North east (Nordost)
nFK	Nutzbare Feldkapazität
NN	Normalnull
PE	Polyethylen
PV	Porenvolumen
PVC	Polyvinylchlorid
PWP	Permanenter Welkepunkt
SI	Anlehmiger Sand
TR	Transpiration
UGT	Umwelt-Geräte-Technik (Firma in Müncheberg, Deutschland)
UN	United Nations
UBA	Umweltbundesamt
UNESCO	United Nation Educational Social Cultural Organisation
WDPT	Water Drop Penetration Time
WHGL	Wasserhaushaltsgleichung
WS	Wassersäule
WWAP	World Water Assessment Programme

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Düsenwagen bei der Beregnung auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen ...	14
Abb. 2: rotierende Düse mit Druckminderer am Ausleger des Düsenwagens, Schematische Darstellung der Draufsicht auf das Gestänge des Düsenwagens mit sich überlappenden Spritzbildern der Düsen	14
Abb. 3: Trapezförmige Dämme beim Möhrenanbau	21
Abb. 4: Sonneneinstrahlung beim Flachanbau und beim Dammanbau	22
Abb. 5: Tropfbewässerung bei Kartoffeldämmen	24
Abb. 6: Entwicklung der Möhre vom keimenden Saatkorn bis zur erntereifen Rübe.....	25
Abb. 7: Flächendeckende Beregnung versus streifenförmige Beregnung der Dammkronen ...	31
Abb. 8: Lage des zu befeuchtenden Dammbereichs	32
Abb. 9: Einflussfaktoren und Prozessgrößen beim Auftreffen einer Wassergabe auf die Dammkrone	33
Abb. 10: Schematische Darstellung eines Düsenwagens mit an den Auslegern über jeden Damm einzeln montierten Applikationssystemen	35
Abb. 11: Entwicklungsstufen der Dammkronenführung (1) Drahtarme, (2) Führungsarme aus Stahlrohr mit Streichblechen, (3) Führungsarme mit Bällen, (4) Doppelarmkonstruktion mit Bällen, (5) Dammschlitten.....	36
Abb. 12: Tropfer an einer Tropfschiene, Tropfschiene mit Führungsarmen bei der Dammkronenberegnung, Schaumbildung auf der Dammkrone	37
Abb. 13: Sicht auf den reduzierten Auslassquerschnitt eines Gießkopfs, beim Test am Düsenwagen, Düse SprayMax® bei der Beregnung der Dammkrone	38
Abb. 14: Klimadiagramm 2014, Wetterstation Frankenhausen	39
Abb. 15: Versuchsdämme mit Beregnungsvarianten beim Feldversuch 2013.....	40
Abb. 16: Messschema zur Messung der Bodenfeuchte bei Dammprofilen	41
Abb. 17: Versuchsdämme mit Beregnungsvarianten beim Feldversuch 2014.....	42
Abb. 18: Regenmesser im Feld und Messschema Regenmesser.....	43

Abb. 19: Ergebnisse der Bodenfeuchteverteilung im Damm ohne Beregnung/direkt nach der Beregnung sowie nach 2 und 6 Tagen, für die Nullvariante ohne Beregnung, die Dammkronenverteilung durch Tropfschiene, Nebeldüse und Gießkopf sowie die Simulation eines natürlichen Niederschlags mit der Rotatordüse	44
Abb. 20: Vergleich zwischen den Abweichungen von der Soll-Regengabe (9 mm) für die Düse SprayMax [®] , Gießkopf (red.) und Rotatordüsen.....	46
Abb. 21: Änderung der Mittelwerte der Bodenfeuchte nach einer niedrigen Beregnungsgabe (9 mm) über einen Zeitraum von drei Tagen beim Einsatz verschiedener Applikatoren für die Dammkronenberegnung beim Feldversuch 2014.....	47
Abb. 22: Modellhafte Betrachtung für die mobile, streifenförmige Beregnung bei rechteckiger Benetzungsfläche und kreisförmiger Benetzungsfläche	54
Abb. 23: Vergrößerung der Benetzungsfläche durch Schrägstellung des Applikators durch Änderung des Montagewinkels von 90° auf 40°	55
Abb. 24: Benetzungsfläche verschiedener Intensitäten bei 40° Schrägstellung der Düse SprayMax [®]	56
Abb. 25: Teilung der Gesamtwassergabe in zwei Teilwassergaben	57
Abb. 26: Sicht von oben auf die Dammkrone mit Benetzungsflächen einer fünfteiligen Wassergabe	58
Abb. 27: CAD-Konstruktionszeichnung des Prototyps eines Dammschlittens	59
Abb. 28: Lage der Versuchsparzelle 5 (weiß gestrichelte Umrandung) auf dem Versuchsgelände "Am Sande"	60
Abb. 29: Klimadaten 2015, Wetterstation Neu-Eichenberg.....	61
Abb. 30: Doppelschlitten bestehend aus zwei Dammschlitten mit zweigeteilter Wassergabe sowie simulierte Einzelwassergabe.....	63
Abb. 31: Spritzbilder bei geteilter Wassergabe sowie bei simulierter Einzelwassergabe.....	64
Abb. 32: Messung der Wassermengen mit Messgefäßen bei einer simulierten Einzelwassergabe von 31 mm, sowie schematische Darstellung der Aufstellung der Messgefäße für die Beregnungstypen	66
Abb. 33: Versuchsaufbau mit Beregnung Typ 1 (Damm 1 und 3) sowie Beregnung Typ 2 (Damm 2 und 4)	67
Abb. 34: Überblick über die von Juni bis August stattfindenden Überfahrten mit Angabe der Beregnungsmengen.....	67

Abb. 35: Lage der Messpositionen für verschiedene Messgrößen mit (B) Bodenfeuchte der Dammkrone, (I) Infiltration, (G) Bedeckungsgrad, (S) Bodenfeuchte im Dammkörper und (T) Saugspannung	68
Abb. 36: Aufnahme mit Messrahmen in der Furche und bearbeitetes Foto mit der Abfolge der Arbeitsschritte zur Bestimmung des nassen Flächenanteils in der Furche	71
Abb. 37: Nasssiegung und Schlämmanalyse der Feinbodenfraktion im Labor	73
Abb. 38: Schematische Darstellung eines Minidisk-Infiltrometers	74
Abb. 39: Messrahmen mit Digitalaufnahmen vom 16.6.15 und vom 8.8.15	76
Abb. 40: Änderungen der Bodenfeuchte im Versuchszeitraum von 72 Stunden bei unterschiedlich hohen Wassergaben, aufgliedert in die Beregnungstypen	78
Abb. 41: Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) der Mittelwerte der Bodenfeuchte für niedrigen Wassermengen an vier verschiedenen Messterminen.....	79
Abb. 42: Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) der Mittelwerte der Bodenfeuchte bei hohen Wassergaben an vier verschiedenen Messterminen.....	80
Abb. 43: Änderungen der Bodenfeuchte bei geringer Beregnungsgabe (9 mm) über vier Messtermine mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen	81
Abb. 44: Änderungen der Bodenfeuchte bei hoher Beregnungsgabe (31 mm) über vier Messtermine mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen	81
Abb. 45: Änderungen der Bodenfeuchte bei geringer Wassergabe (9 mm) in drei Tiefen an vier Messterminen nach der Beregnung.....	82
Abb. 46: Änderungen der Bodenfeuchte bei hoher Wassergabe (31 mm) in drei Tiefen an vier Messterminen.....	83
Abb. 47: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) für zwei Messtermine bei einer geringen Wassergabe (9 mm) in drei Tiefen für die Beregnungstypen	84
Abb. 48: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) für zwei Messtermine bei einer hohen Wassergabe (31 mm) in drei den Tiefen 1 für die Beregnungstypen.....	84
Abb. 49: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Änderung der Bodenfeuchte für drei Messtermine nach der Beregnung mit Gegenüberstellung einer niedrigen Wassergabe (9 mm) und einer hohen Wassergabe (31 mm) und Unterscheidung der Beregnungstypen	85
Abb. 50: Änderung der Bodenfeuchte in der Dammkrone bei drei Überfahrten mit der Wassergabe 31 mm, Gegenüberstellung der Beregnungstypen.....	86

Abb. 51: Änderung der Bodenfeuchte in der Dammkrone bei drei Überfahrten mit der Wassergabe von 35 mm, Gegenüberstellung der Berechnungstypen.....	87
Abb. 52: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) Änderung der Bodenfeuchte nach der Beregnung für die Wassermenge von 31 mm.....	88
Abb. 53: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) Änderung der Bodenfeuchte nach der Beregnung für die Wassermenge von 35 mm.....	88
Abb. 54: Darstellung der Mittelwerte der Anteile der Feinbodenfraktion bei unterschiedlichen Beregnungsvarianten	89
Abb. 55: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Anteile der Feinbodenfraktion bei unterschiedlichen Beregnungsvarianten	90
Abb. 56: Darstellung der Fehlerbalken (95% KI) der Mittelwerte der Messwerte der gesättigten Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Beregnungstypen.....	91
Abb. 57: Darstellung der Mittelwerte als Fehlerbalkendiagramm (95% KI) für den Bedeckungsgrad an drei Messterminen für die Beregnungstypen.....	92
Abb. 58: Fehlerbalkendiagramme (95% KI) mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen für Gewicht , Länge und Durchmesser des Ernteguts Möhre.....	93

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Arbeitsthesen für die Untersuchungen zur Entwicklung einer wassersparenden Methode für die streifenförmige Beregnung von Dammkulturen im Feldgemüsebau	3
Tab. 2: Bodenfeuchtebereiche und Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung.....	8
Tab. 3: kc-Werte für Möhren in verschiedenen Wachstumsstadien.....	9
Tab. 4: Gegenüberstellung von Damm- und Flachanbau in gemäßigten Gebieten.....	20
Tab. 5: BBCH Codes Wurzel- und Knollengemüse, Makrostadien 1-4	26
Tab. 6: Die Wasseraufnahme beeinflussende Prozesse und Faktoren	32
Tab. 7: Anforderungen an die Applikatoren der Dammkronenberegnung.....	34
Tab. 8: Vermessungen des Spritzbildes bei unterschiedl. Schrägstellung des Applikators	56
Tab. 9: Bodendaten der Versuchsparzelle 5 entsprechend der Horizontabfolge mit Angabe der Bodencharakteristika, Anteil der Kornfraktionen und Stufen der Durchlässigkeit	62
Tab. 10: Übersicht über Ritzel, Geschwindigkeitsstufen und Wassergaben pro Dammschlitten bei Montage von zwei Düsen des Typs SprayMax®	65
Tab. 11: Messtermine der Überfahrten bei den Feldversuchen zur Teilung der Wassergabe....	68

1 Einleitung

Der nachhaltige Umgang mit Wasser stellt eine große Herausforderung für die Menschheit dar, da die Süßwasservorräte begrenzt sind. Im UNESCO-Weltwasserbericht von 2015 wird eine Steigerung des Trinkwasserverbrauchs um 55 % bis zum Jahr 2050 prognostiziert. Die Wasserversorgung für den Agrarsektor spielt dabei weltweit eine entscheidende Rolle. Für die landwirtschaftliche Produktion werden ca. 70 % des globalen Trinkwassers genutzt (UNESCO, 2014; WWAP, 2015). Demnach wird der größte Teil des Wasserverbrauchs in der Landwirtschaft für die Bewässerung benötigt. Weltweit werden 20 % der Anbauflächen bzw. 300 Millionen Hektar bewässert, wobei mehr als 40 % aller Nahrungsmittel mithilfe künstlicher Bewässerung hergestellt werden (IAASTD, 2009). Die Bewässerungslandwirtschaft muss sich einer wachsenden Weltbevölkerung anpassen. Damit steigt der Bedarf für zusätzliche Bewässerung bei der Nahrungsmittelproduktion stark an.

Dem Wasserbedarf steht ein Wasserdargebot gegenüber, das vom Klima beeinflusst wird. „Im Zuge des Klimawandels verändern sich in Deutschland Niederschlagsmenge und -verteilung. Dies wirkt sich direkt auf die zeitliche und die regionale Verfügbarkeit von Wasser aus. Veränderte Niederschläge führen zu Schwankungen im Bodenwasser- und im Grundwasserhaushalt. Dadurch werden Bodengüte sowie Produktivität von Agrarflächen beeinflusst. Steigen gleichzeitig die Temperaturen, werden die Folgen für die landwirtschaftliche Produktion noch verstärkt“. Damit weist das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU, 2015) auf anstehende Veränderungen und auf die Notwendigkeit von Klimaanpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft hin. Der Bewässerung kommt dabei eine besondere Rolle zu. Durch die Weiterentwicklung von Verfahren sowie einer optimierten Steuerung soll die Ressource Wasser in Zukunft effektiver eingesetzt werden. Dabei geht es insbesondere um eine teilflächenspezifische, auf die aktuellen Bodenverhältnisse sowie die entwicklungsbedingten Bedürfnisse der Pflanzen angepasste, präzise Bewässerung.

Problemstellung

Bewässerung spielt auch in Deutschland eine immer wichtigere Rolle in der Landwirtschaft. Sie dient insbesondere in trockenen Jahren der Ertragssicherung. Mit zusätzlicher Bewässerung können Ertrag und Qualität von Nutzpflanzen gesteigert werden. In Deutschland nehmen sowohl der Anteil beregnungsbedürftiger Flächen als auch die Anzahl beregnungswürdiger Kulturen im Zuge des Klimawandels zu (RIEDIGER, 2014). Neben Gemüse werden auch Kartoffeln, Zuckerrüben, Braugerste, Winterweizen und Winterroggen bewässert. Im Feldgemüsebau ist eine ausreichende Durchfeuchtung des Bodens für ein gleichmäßiges Auflaufen und damit für die einheitliche Entwicklung des Bestands notwendig. Aufgrund zunehmender Frühjahrstrockenheit sind Kulturpflanzenbestände immer öfter gefährdet. Die Folgen dieser Entwicklung reichen von Ernteeinbußen bis hin zum Totalausfall für den Landwirt. Mit zusätzlicher Bewässerung kann das wirtschaftliche Risiko für den landwirtschaftlichen Betrieb reduziert werden. Der Erwerb von Bewässerungstechnik sowie der Wasserbereitstellung ist mit hohen Investitionskosten verbunden.

Hinsichtlich der Betriebskosten (Energie-, Wasser-, Arbeitskräfte- und Maschinenkosten) unterscheiden sich die einzelnen Verfahren teils erheblich. Einsparungen der Ressourcen Wasser und Energie werden sowohl aus betriebswirtschaftlichen als auch aus ökologischen Gründen angestrebt. In Deutschland ist die Beregnung das mit Abstand am meisten verbreitete Bewässerungsverfahren im Feldgemüsebau, wobei stationäre und mobile Beregnungsanlagen unterschieden werden. Während Kreis- und Linearberegnungsmaschinen als (halb)stationäre Anlagen zum Einsatz kommen, sind Weitwurfregner und Düsenwagen als mobile Beregnungsverfahren weit verbreitet. Charakteristisch für Beregnungsverfahren ist die flächendeckende Ausbringung von Wasser. Hohe Beregnungsintensitäten stellen für die meisten Beregnungsverfahren ein Problem dar und führen als Folge zur Bodenschädigung wie Splash-Erosion (SOURELL, 2014). In der Praxis führen hohe Wassergaben oftmals zu Nährstoffauswaschungen und gefährden damit das Grundwasser.

Feldkulturen werden meist im streifenförmigen Anbau kultiviert. Das ist insbesondere beim Anbau von Kulturen auf Dämmen, dem Dammanbau, der Fall. Bei in Deutschland verbreiteten Dammkulturen wird lediglich die Dammkrone kultiviert, während die Dammflanken und die Furchen pflanzenfrei gehalten und als Fahrspur für landwirtschaftliche Maschinen genutzt werden. Bei der Beregnung von Dammkulturen im Feldgemüsebau kommen zumeist mobile Beregnungsverfahren zum Einsatz. Dabei wird beispielsweise ein Düsenwagen von einer am gegenüberliegenden Feldrand stationierten Beregnungsmaschine mit Trommeleinzug über den wasserführenden Schlauch eingezogen. Mit am Gestänge des Düsenwagens rotierenden Düsen wird dabei die gesamte Fläche gleichmäßig beregnet. Speziell bei Dammkulturen wird das Wasser jedoch lediglich auf der kultivierten Dammkrone benötigt. Mit den bisherigen Beregnungsverfahren ist es nicht möglich, nur die Dämme zu beregnen und dabei die Furchen auszusparen. Im Vergleich zum Flachanbau können sich Dämme aufgrund der größeren Oberfläche schneller erwärmen. Bei hohen Außentemperaturen und während Trockenperioden trocknen Dämme jedoch schneller aus. Das stellt insbesondere im Spätfrühling und im Frühsommer ein Problem dar, wenn die Bestände der Dammkulturen noch nicht geschlossen sind. Besonders gefährdet sind direkt in die Dammkrone gesäte Kulturen, wie beispielsweise Möhre und Rote Bete. Eine ausreichende Durchfeuchtung der Dammkrone und des darunterliegenden Wurzelraums ist vor allen Dingen für ein gleichmäßiges Auflaufen und während der Jugendphase wichtig und beeinflusst maßgeblich die Bestandsentwicklung und den Ertrag (WONNEBERGER, 2004).

Zielsetzung und Arbeitsthesen

Im Mittelpunkt der vorliegenden Forschungsarbeit stehen Untersuchungen zur Entwicklung einer wassersparenden, streifenförmigen Beregnungsmethode speziell für Dammkulturen. Mit der neuen Methode soll ausschließlich die Dammkrone beregnet und dabei Dammflanken und Dammfurchen ausgespart werden. Dabei wird die zu bewässernde Fläche auf $\frac{1}{3}$ reduziert, wodurch der Wasserverbrauch pro Flächeneinheit und damit der Energieeinsatz erheblich reduziert werden können.

In den Untersuchungen soll herausgefunden werden, welche Einflussfaktoren und Prozesse für den Bodenwasserhaushalt eines Dammes eine Rolle spielen. Basierend auf den daraus entwickelten Anforderungen für die neue Beregnungsmethode soll untersucht werden, mit welcher Applikationstechnik das Wasser bodenschonend und gleichförmig auf die Dammkrone appliziert werden kann. Es soll herausgefunden werden, ob Erosion durch Wasser im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren reduziert werden kann. Vor allem soll geklärt werden, ob durch die Dammkrone genügend Wasser aufgenommen werden kann, um den Bodenwasservorrat im durchwurzelteten Bodenraum im Damm aufzufüllen. Zusätzlich soll untersucht werden, ob durch die Applikation mehrerer, zeitversetzter Teilwassergaben die Wasseraufnahme durch die Dammkrone verbessert werden kann. Abschließend soll geklärt werden, welche Auswirkung eine Teilung der Wassergabe auf die Bestandsentwicklung hat. Dabei soll gezeigt werden, dass sich die Teilung der Wassergabe positiv auf die Durchlässigkeit der Dammkrone und den Bodenabtrag auswirkt.

Für die Untersuchungen wurden folgende Arbeitsthese aufgestellt:

Tab. 1: Arbeitsthese für die Untersuchungen zur Entwicklung einer wassersparenden Methode für die streifenförmige Beregnung von Dammkulturen im Feldgemüsebau

These 1	Mit der Methode der Dammkronenberegnung wird das Wasser streifenförmig ausschließlich auf die Dammkrone appliziert. Die von der Dammkrone aufgenommenen Beregnungsgaben füllen den Bodenwasservorrat in der durchwurzelteten Bodenzone für einen Zeitraum von mehr als drei Tagen auf. Dabei wird gegenüber herkömmlichen Methoden Wasser eingespart.	
	1a	Mit der neu entwickelten Methode der Dammkronenberegnung erfolgt eine streifenförmige und gleichförmige Wasserapplikation mittig und gleichförmig auf die Dammkrone.
	1b	Durch die streifenförmige Beregnung der Dammkrone werden die applizierten Beregnungsgaben vollständig aufgenommen. Es treten keine Wasserverluste durch Oberflächenabfluss oder Tiefenversickerung auf.
	1c	Mit der neu entwickelten Methode der Dammkronenberegnung können $\frac{2}{3}$ der applizierten Wassermenge eingespart werden.
These 2	Die Teilung einer Gesamtwassergabe in zwei Teilwassergaben bewirkt im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe eine effektivere Wasseraufnahme und eine verbesserte Bestandsentwicklung. Gleichzeitig werden Wasserverluste und Wassererosion minimiert.	
	2a	Die Teilung der Wassergabe bewirkt im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe im Mittel höhere Bodenfeuchtwerte in der Dammkrone und im Dammkörper.
	2b	Bei niedrigeren Ausgangswerten der Bodenfeuchte vor der Beregnung bewirkt die Teilung der Wassergabe im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe im Mittel einen stärkeren Anstieg der Bodenfeuchte als bei höheren Ausgangswerten.
	2c	Die Teilung der Wassergabe bewirkt im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe im Mittel weniger Oberflächenabfluss und Bodenabtrag von der Dammkrone in die Dammfurche sowie eine höhere Durchlässigkeit der Dammkrone.
	2d	Die Teilung der Wassergabe bewirkt im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe im Mittel eine verbesserte Bestandsentwicklung.

Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit werden Fakten und Zusammenhänge zum Stand der Bewässerungslandwirtschaft in Deutschland, zu verbreiteten Berechnungstechniken und zur Anbaumethode der Dammkultur erörtert. Anschließend werden Grundlagen zur streifenförmigen Berechnung von Dämmen und Anforderungen hinsichtlich der neuen Methode beschrieben. Die einzelnen Entwicklungsschritte bis hin zur Konstruktion eines Prototyps werden im Folgenden dargestellt. Die Methode der Dammkronenberechnung wird in Labortest und Feldversuchen untersucht und deren Ergebnisse werden beschrieben. Den Untersuchungen zur mehrphasigen Applikation durch die Teilung einer Wassergabe in mehrere Teilwassergaben ist ein extra Kapitel gewidmet. Nach der Diskussion der Ergebnisse werden Schlussfolgerungen für den Einsatz der neuen Methode der Dammkronenberechnung gezogen sowie Möglichkeiten zur Weiterentwicklung und zum Forschungsbedarf aufgezeigt.

2 Grundlagen der Bewässerung und Beregnung

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Beregnung von Dammkulturen in den gemäßigten Breiten. In diesem Kapitel wird eine Einführung in die Bewässerungslandwirtschaft mit dem Schwerpunkt Überkopf-Bewässerung (Beregnung) sowie in die Dammkultur als Anbaumethode im Feldgemüsebau gegeben. Des Weiteren wird die Möhre (*Daucus carota L. ssp. sativus*) als Versuchskultur vorgestellt. Sie wird im ökologischen Landbau zunehmend auf Dämmen angebaut, wobei ihr Saatgut direkt in den Damm dicht unter die Bodenoberfläche gesät wird. Daher ist die Möhre insbesondere während der Keimung und der ersten Wachstumsphase im Spätfrühling auf eine optimale Wasserversorgung angewiesen. Neben dem Stand der Bewässerungstechnik werden aktuelle Forschungsergebnisse bei der Bewässerung von Dammkulturen im Allgemeinen und speziell beim Möhrenanbau aufgezeigt.

2.1 Bewässerungslandwirtschaft in Deutschland

In den gemäßigten Breiten wird Witterungsunsicherheiten beim Freilandanbau mit zusätzlicher Bewässerung bei Trockenheit begegnet und damit das betriebliche Risiko minimiert. Im Vordergrund steht eine Ertragssteigerung durch höhere Qualitäten und Erntemengen. Durch Bewässerung kann die Anbauperiode ausgedehnt und die Düngeeffizienz verbessert werden. Eine optimale Wasserversorgung im Boden steigert nicht nur die Nährstoffverfügbarkeit, sondern auch das Nährstoffaneignungsvermögen der Pflanzen (EHLERS, 1996).

Vorrangiges Ziel der Bewässerung ist es, einen ausreichenden Wasservorrat im Boden für ein günstiges Pflanzenwachstum bereitzustellen und Trockenstress für die Kulturpflanzen zu vermeiden. Bewässerungsmaßnahmen sind in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Kulturpflanze dem aktuellen Wasserbedarf anzupassen. Das Wasser soll möglichst effizient an die Pflanze gebracht und Verluste durch Abdrift, Verdunstung und Versickerung minimiert werden. Neben dem sparsamen Einsatz der Ressource Wasser steht eine Reduzierung von Energieverbrauch sowie Arbeitskräfte- und Maschineneinsatz im Mittelpunkt der Weiterentwicklung der Bewässerungstechnik und des Managements.

2.1.1 Wasserbedarf

In Deutschland wird lediglich auf 3,3 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche bewässert (FRICKE, 2010). Insgesamt 6 % der landwirtschaftlichen Betriebe haben die Möglichkeit, Bewässerung bei Bedarf einzusetzen (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2016a). Regional gibt es in Deutschland große Unterschiede. So hat Niedersachsen mit 7,6 % mit Abstand den größten Anteil tatsächlicher Beregnungsfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche, gefolgt von Hessen und Rheinland-Pfalz (FRICKE, 2010). Die am intensivsten bewässerten Flächen befinden sich im Rhein-Main-Gebiet (Hessisches Ried) und in Niedersachsen (Uelzener Becken), wo es bereits heute im Sommer zu einer intensiven Nutzung bis hin zur Übernutzung des Grundwassers kommt (LK NIEDERSACHSEN, 2012). 85 % des Wassers für Bewässerungszwecke werden in Deutschland aus

dem Grundwasser gewonnen, die restlichen 15 % aus Oberflächenwasser (UBA, 2018). Die Wasserentnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung in Deutschland sind mit etwa 0,3 Mrd. m³ bezogen auf eine Gesamtmenge von 25 Mrd. m³ als gering einzuordnen (UBA, 2015). Die klimatische Wasserbilanz in einigen Gebieten Deutschlands ist bereits heute negativ, da die jährliche Verdunstung in Abhängigkeit von den Temperaturen zwischen 525 und 650 mm pro Jahr beträgt. Dem gegenüber stehen Niederschlagsjahresmittelwerte von weniger als 600 mm pro Jahr. Zu diesen Gebieten gehören weite Teile der Länder Brandenburg, Sachsen-Anhalt sowie Mecklenburg-Vorpommern und Thüringen (UBA, 2017).

Auswirkungen von Klimaänderungen

Die globale Erwärmung führt in vielen Gebieten zu extremen Wetterereignissen, wie häufigere Starkregen oder Hitzeperioden. Es ist davon auszugehen, dass es in Zukunft weniger oft leichte und mittlere Niederschläge geben wird. Dafür ist mit einer Zunahme von Starkregen mit erosivem Charakter zu rechnen (SAUERBORN, 1999; ZHANG et al., 2010; PANAGOS et al., 2017). Auch für Deutschland wird eine Änderung der Niederschlagsmuster prognostiziert. Tendenziell wird dies zu mehr Niederschlägen im Winter und weniger Niederschlägen im Sommer führen, verbunden mit längeren Trockenperioden (UBA, 2013). Trockene Böden sind anfälliger für Erosion durch Wasser und Wind, steigende Temperaturen führen gleichzeitig zu höheren Verdunstungsraten. Während Trockenperioden nimmt der Wasserbedarf zu. Das zur Verfügung stehende Wasser wird neben der Verteilung der Niederschläge und Temperaturen im Jahresverlauf insbesondere durch Speichereigenschaften und Durchwurzelungstiefen des Bodens bestimmt (MIEGEL, 2014). Für den Landwirt bedeutet die Zunahme von Hitzeperioden ein erhöhtes Risiko für Ernteschäden.

Als Folge sind Anpassungsstrategien sowohl in der Land- als auch in der Wasserwirtschaft erforderlich (RIEDIGER et al., 2014). Dazu zählt die Anpassung der Bewässerungspraxis, beispielsweise durch häufigere Einzelgaben, veränderte Ausbringungszeitpunkte sowie veränderte mittlere Jahresgaben. Eine weitere Anpassungsmaßnahme sind veränderte Fruchtfolgen und der Anbau neuer Sorten. Laut IPCC (PACHAURI, 2007) führen phänologische Veränderungen auch in Mitteleuropa zu einem früheren Vegetationsbeginn. Gleichzeitig steigen die Risiken durch Spät- und Frühfröste. Das führt in zunehmendem Umfang zum Einsatz von Frostberegnung bei frostempfindlichen Kulturen, beispielsweise bei Frühkartoffeln. Durch seltenen und selten anhaltenden Bodenfrost im Winter bleibt dem Boden weniger Zeit für die Bodengare, womit eine Zunahme von phytosanitären Problemen verbunden sein kann.

Der künftige Bewässerungsbedarf in Deutschland wird nicht nur von klimatischen Bedingungen bestimmt. Eine besondere Rolle kommt der Einschätzung der Bewässerungswürdigkeit landwirtschaftlicher Nutzflächen zu. Dafür ist neben einer veränderten Bewirtschaftungsstrategie (frühere Aussaattermine, neue Sorten) auch die Rentabilität der Bewässerung ausschlaggebend. Hierbei spielen insbesondere die Wasserverfügbarkeit aus Oberflächenwasser und Grundwasser sowie gesellschaftliche Rahmenbedingungen (Personal-, Energie- und Wasserkosten) eine entscheidende Rolle (MIEGEL, 2014).

Wasser als Standortfaktor

Wasser ist einer der wichtigsten Faktoren eines Pflanzenstandorts und beeinflusst neben dem Wachstum auch die Nährstoffaufnahme der Pflanzen und die Umsetzung organischer Substanz. Die beiden wichtigsten Komponenten des Wasserhaushalts eines Standorts sind Niederschlag und Verdunstung. Sie sind Glieder der Wasserhaushaltsgleichung (WHGL), in der beide Komponenten zusammen mit weiteren bilanziert werden. Die Summe aller Komponenten der WHGL ergibt Null (siehe Gleichung 1). Mit zusätzlicher Bewässerung kann die Wasserzufuhr je nach Bedarf erhöht und der Wasserhaushalt eines Standorts optimiert werden (SOURELL, 2014). Für einen mit Pflanzen bewachsenen und bewässerten Standort lautet die WHGL wie folgt:

$$P + Bew - ETR + Kap - GWN - \Delta S = 0 \quad \text{Gleichung 1}$$

mit	P	Freilandniederschlag (<i>precipitation</i>)
	Bew	Bewässerung
	ETR	Aktuelle Evapotranspiration
	Kap	Kapillarer Aufstieg in die Bodenzone
	GWN	Versickerung aus der Bodenzone (Grundwasserneubildung)
	ΔS	Änderungen des Bodenwasservorrats

Unter Freilandniederschlag P wird dabei der Niederschlag direkt über dem Pflanzenbestand verstanden. Die Bewässerung stellt eine zusätzliche Komponente des Wasserhaushalts dar und fließt mit der Höhe der Zusatzwassergabe in die WHGL ein. Bei der Verdunstung fließt lediglich die tatsächlich erfolgte Verdunstung (ETR, reale Evapotranspiration) als Anteil der möglichen Verdunstung (ETP, potentielle Evapotranspiration) ein. Die ETR setzt sich aus Evaporation (ER, Verdunstung von der Bodenoberfläche), Transpiration (TR, Verdunstung der Pflanzen aufgrund biotischer Prozesse) und Interzeptionsverdunstung (IR, Verdunstung des Wassers von der Pflanzenoberfläche) zusammen. Letztere spielt insbesondere bei der Bemessung von Beregnungsgaben eine Rolle, da ein Teil des Wassers beispielsweise auf den Blättern gespeichert wird und nicht in den Boden zur Auffüllung des Bodenwasservorrats gelangt. Die mögliche Verdunstung an einem Standort ist von verschiedenen Faktoren abhängig, wie beispielsweise dem Blattflächenindex, der Durchwurzelung oder der Verfügbarkeit von Bodenwasser. Durch die Komponente Kap fließt die unter Wirkung von Kapillarkräften in den Wurzelraum aufsteigende Wassermenge in die WHGL ein. Sie ist von der Lage des Grundwasserspiegels abhängig und daher für grundwasserferne Böden vernachlässigbar. Die Komponente GWN ist die Wassermenge, die aufgrund der Schwerkraft aus dem Wurzelraum nach unten versickert und den Grundwasservorrat auffüllt. Die Änderung der im Boden gespeicherten Wassermenge fließt in die WHGL als Änderung des Bodenwasservorrats ΔS in einem betrachteten Zeitraum ein. Der Bodenwasservorrat wird neben der Zufuhr von Wasser (Niederschlag, Beregnung, kapillarer Aufstieg) insbesondere von den Wasserspeicher- und Wassertransporteigenschaften des Bodens bestimmt (MICHEL, 2014).

Pflanzenwasserbedarf und Wasserverbrauch

Das Wachstum und die Entwicklung der Pflanzen hängen stark vom Wasser ab, denn Wasser ist ein Hauptbestandteil der Pflanze und beeinflusst alle Stoffwechselforgänge. Eine stetige Wasserabgabe der Pflanze durch Transpiration sollte durch eine entsprechende Wasseraufnahme kompensiert werden. Die Hauptmenge des Wassers wird von den Pflanzen über die Wurzeln aufgenommen. Dafür entscheidend ist der pflanzenverfügbare Anteil des Bodenwasservorrats im durchwurzelten Bodenraum. Der Grad der Auffüllung des Bodens mit pflanzenverfügbarem Wasser kann als aktuelle Bodenfeuchte beschrieben und in Prozent der nutzbaren Feldkapazität [% nFK] angegeben werden. In Tabelle 2 sind Bereichen der Bodenfeuchte die entsprechenden Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung gegenübergestellt.

Tab. 2: Bodenfeuchtebereiche und Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung [geändert, nach DWD, 2018]

Bodenfeuchte [% nFK]	Auswirkung auf die Pflanzenentwicklung
30	die Pflanze steht unter Trockenstress, mit Ertragseinbußen ist zu rechnen
30 - 50	noch ausreichende Wasserversorgung der Pflanze
> 50 - 80	optimales Wasserangebot
> 80 - 100	erste Anzeichen von leichtem Sauerstoffmangel
> 100	Übersorgung und Sauerstoffmangel

Trockenstress kann bei Kulturpflanzen zu Entwicklungsverzögerungen und niedrigen Erträgen bis hin zu einem Totalausfall führen. Je nach Pflanze sind einige phänologische Phasen besonders anfällig für Trockenstress. In diesen Phasen ist der Wasserbedarf erhöht (SCHUHMAN, 2014). Die Kartoffel beispielsweise reagiert bei Trockenstress während der Knollenbildung sensibel. Hauptbewässerungsperiode ist zwischen der Blüte und der Krautreife. Bei Zuckerrüben wird eine Auflaufberegnung bei starker Trockenheit empfohlen, wenn sich eine Auflaufverzögerung sowie mangelnde Jugendentwicklung abzeichnet. Hauptberegnungszeit ist vom Bestandsschluss bis Ende August. Mais reagiert in der Phase der beginnenden Blüte sensibel. Eine Bewässerung zwischen Fahnenschieben und Milch- bzw. Teigreife wirken sich besonders ertragswirksam aus. EHLERS (1996) weist darauf hin, dass ein zu früher Einsatz der Bewässerung zu Einschränkungen im Wurzelwachstum führen kann und daher vermieden werden sollte. Ein leichter Wassermangel am Anfang des Wachstums fördert das Wurzelwachstum und vergrößert dadurch den effektiven Wurzelraum. Dadurch steht bei Trockenheit mehr Bodenwasser zur Verfügung.

Der Wasserbedarf einer Pflanze hängt insbesondere von der Pflanzenart und vom Entwicklungsstadium der Pflanzen ab. Bei der Ermittlung des Wasserumsatzes zwecks Bemessung der Bewässerungsgabe sollte immer die aktuelle Wurzeltiefe berücksichtigt werden, die im Laufe des Vegetationszeitraums bei den meisten Kulturpflanzen zunimmt (PASCHOLD, 2010). Bei der Berechnung des Wasserverbrauchs der Pflanze ist es gängige Praxis, den Vegetationskoeffizient (k_c - Wert) einer Pflanze zu berücksichtigen. Er stellt einen kultur- und entwicklungspezifischen Korrekturfaktor der potentiellen Evapotranspiration (ETR) dar.

Die Hochschule Geisenheim hat für zahlreiche Gemüsearten und landwirtschaftliche Kulturen k_c -Werte ermittelt. In Tabelle 3 sind die k_c -Werte für die Möhre dargestellt.

Tab. 3: k_c -Werte für Möhren in verschiedenen Wachstumsstadien [geändert nach PASCHOLD, 2010]

Möhre	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3
Entwicklung	ab Auflaufen BBCH 09 	ab 5. Blatt BBCH 15 	ab Bestandsschluss BBCH 43 
k_c -Wert	0,3	0,6	0,8

Mithilfe der klimatischen Wasserbilanz kann der aktuelle Wasserbedarf beispielsweise nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerungsmethode ermittelt werden, indem Tagesbilanzen zu einer Gesamtbilanz aufsummiert werden. Dabei berechnet sich die Tagesbilanz wie folgt:

$$(ETR \cdot k_c) - P = \text{Tagesbilanz} \quad \text{Gleichung 2}$$

mit: ETR = potentielle Evapotranspiration k_c = Vegetationskoeffizient P = Niederschlag

Bei negativer Bilanz findet durch zusätzliche Wassergaben ein Auffüllen des Bodenwasservorrats statt. Neben der klimatischen Wasserbilanz sind weitere Methoden zur Bewässerungssteuerung entwickelt worden, die beispielsweise auf Mehrschichten-, Bodenfeuchte- und Evapotranspirationsmodellen beruhen. Ziel ist eine dem aktuellen Pflanzenwasserbedarf ausgerichtete Wasserversorgung, um ein optimales Pflanzenwachstum zu sichern. Gleichzeitig soll eine bewässerungsbedingte Verlagerung von Nährstoffen und damit eine Belastung des Grundwassers vermieden werden (PASCHOLD, 2010).

Berechnungsbedürftigkeit von Standorten

Damit ein Boden auf Trockenheit und Starkregenereignisse vorbereitet ist, benötigt er ein ausgewogenes Verhältnis von Grob-, Mittel- und Feinporen. Je feinkörniger ein Boden ist, desto höher ist sein Anteil an Feinporen. Da leichte, sandige Böden nach SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL (2010) einen hohen Anteil an Grobporen haben (ca. 30 %, im Vergleich zu Schluffen ca. 15 %), versickert überschüssiges Wasser schnell in den Untergrund. Durch den geringen Anteil an mittleren Poren bei sandigen Böden (ca. 7 %, Schluffe ca. 15 %) kann im Vergleich zu bindigen Böden weniger Wasser gegen die Schwerkraft gehalten werden. Daher

sind leichte, sandige Böden in Trockenzeiten häufig auf zusätzliches Wasser angewiesen. Beim Bewässern werden die feinen Poren im Boden vor den mittleren Poren aufgefüllt. Das bedeutet: Je stärker ein Boden austrocknet, desto länger dauert es, bis die Feinporen aufgefüllt sind und pflanzenverfügbares Wasser vorhanden ist. Daher sollte der Speicher des pflanzenverfügbaren Wassers im Boden zu 50 bis 60 % nFK gefüllt bleiben (SOURELL, 2014). Durch Bewässerungsgaben kann der Vorrat im Speicherraum des Bodens auf 80 bis 90 % nFK aufgefüllt werden. Bei einer Auffüllung auf über 90 % ist kein Puffer für die Aufnahme natürlicher Niederschläge vorhanden (LABER et al., 2004) und fördert somit oberflächlichen Abfluss.

2.1.2 Wasser im Boden

Der Boden ist ein wichtiger Speicher für Wasser, Luft und Temperatur. Modellhaft wird der Boden als poröser Körper bzw. als ein Dreiphasensystem beschrieben. Nach SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL (2010) besteht die Bodenmatrix „aus Mineralien, organischer Substanz, Wurzeln und Bodenorganismen und dem Porenraum.“ Als Porenraum werden die Räume zwischen der festen Phase (Bodenpartikeln) bezeichnet. Sie sind mit gasförmiger Phase (Bodenluft) und flüssiger Phase (Bodenlösung) gefüllt. Die Anteile und die räumliche Verteilung der drei Phasen beeinflussen maßgeblich die Eigenschaften eines Bodens.

Bodenporensystem

Die feste Phase des Bodens besteht aus Bodenpartikeln, die einzeln als Körner oder in aggregierter Form vorliegen. Je nach Größe werden die Körner nach Äquivalentdurchmessern in Korngrößenfraktionen aufgeteilt. Die Bodenpartikel sind in jedem Boden unterschiedlich gelagert. Neben der Lagerungsdichte der Körner ist die Größe des Porenvolumens (PV) für die Erklärung von Prozessen des Wasser-, Luft- und Wärmehaushalts ausschlaggebend. Sandböden haben ein relativ stabiles Porenvolumen und liegen mit 36 – 56 % PV etwas niedriger als Schluffe. Das höchste Porenvolumen haben Tonböden. Dieses ist jedoch instabil und stark vom Wasser abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010).

Die Poren im Boden sind miteinander verbunden und bilden durchgängige Hohlräume, die Kapillaren. In ihnen können sich Luft und Wasser bewegen. In sandigen Böden haben Kapillaren einen größeren Durchmesser. Dadurch kann das Wasser in diesen Kapillaren nicht gut gegen die Schwerkraft gehalten werden. Als Folge sickert Wasser in sandigen Böden schneller in tiefere Schichten als in bindigen Böden. Letztere weisen aufgrund der kleinen Durchmesser der Kapillaren eine höhere Kapillarität auf. Durch die engen Kapillaren kann auch Wasser aus tieferen Zonen in die oberste Bodenschicht gezogen werden (HARTGE & HORN, 2014).

Oftmals lagern sich einzelne Bodenpartikel (z.B. Sandkörner, Tonminerale, organische Stoffe) zu Aggregaten zusammen, die durch unterschiedliche Größe, Form und Stabilität gekennzeichnet sind. Während Einzelkorngefüge aus Sandkörnern bestehen, kommen Kohärentgefüge vorwiegend in Schluff-, Lehm- und Tonböden vor. Das Bodengefüge beeinflusst die Struktur des Porensystems. Es werden körnungsbedingte Primärporen und Sekundärporen unterschieden, beispielsweise Wurzel- und Tierröhren sowie Schrumpfrisse. Aufgrund der größeren

Äquivalentdurchmesser, ihrer vertikalen Länge und ihrem hohen Anteil haben die Sekundärporen einen starken Einfluss auf den Wasser- und Lufthaushalt im Boden (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010). Mit der Tiefe sinkt der Einfluss des Sekundärporensystems, während der Einfluss des Primärporensystems steigt.

Bodenwasser und relevante Kennwerte

Aufgrund seines Porenraums und den physikalisch-chemischen Eigenschaften des Wassers kann der Boden die Bodenlösung in seinen Poren sowohl leiten als auch speichern. Die Bodenlösung ist eine schwache Lösung von Salzen und organischen Stoffen und wird nachfolgend vereinfacht als Bodenwasser bezeichnet. Dieses ist über Bindungskräfte an die Festsubstanz des Bodens gebunden. Kohäsions- und Adhäsionskräfte beeinflussen die Wasserbewegung in den Poren des Bodens und in den Pflanzen.

Nach BLUM (2012) kann das Bodenwasser je nach Form und Vorkommen wie folgt eingeteilt werden: Wasser, das auf den Boden trifft, kann entweder oberflächlich abgeführt werden oder es dringt in den Boden ein. Als Sickerwasser bewegt sich das Wasser nach unten und bildet Stau- oder Grundwasser. Während Oberflächenwasser nicht in den Boden eindringt, sondern oberflächlich abfließt, kann es zu Bodenabtrag durch Wassererosion kommen. Das Haftwasser wird dagegen im Boden gespeichert und in den Poren durch Adsorptions- und Kapillarkräfte gegen die Gravitationskraft gehalten. Das Adsorptionswasser setzt sich zum einen aus dem Hydratationswasser und zum anderen aus dem osmotisch gebundenen Wasser zusammen. Es umgibt die Bodenkolloide und Nährstoff-Ionen an deren Oberfläche, indem Wassermoleküle angelagert werden. Aufgrund der starken Bindungskräfte ist dieses Wasser nicht pflanzenverfügbar. Für die Benetzung der Oberflächen der Bodenkolloide sowie das Eindringen und Speichern von Wasser spielt dieses Wasser jedoch eine wichtige Rolle. Das Kapillarwasser ist der Teil des Haftwassers, der in den Bodenporen durch die Ausbildung von Menisken gegen die Schwerkraft gehalten wird. Während das Kapillarwasser in mittleren Poren pflanzenverfügbar ist, wird es in feinen Poren festgebunden und kann nicht über die Wurzeln aufgenommen werden.

Für einen Vegetationsstandort ist somit der pflanzenverfügbare Anteil des Bodenwassers ausschlaggebend. Er wird maßgeblich vom Bodenwassergehalt und der Saugspannung beeinflusst. Der Wassergehalt gibt an, wieviel Wasser im Boden insgesamt enthalten ist. Bei einer volumetrischen Messung bezieht sich der Wassergehalt auf eine Volumeneinheit des Bodens und gibt den volumetrischen Wassergehalt [Vol. %, mm l⁻¹, mm m⁻³] an. Als Saugspannung [cm Wassersäule (WS); bar] wird die Spannung bezeichnet, unter der das Bodenwasser in den Bodenporen steht. Sie ist daher von der Kapillarität des Korngerüsts abhängig (SCHEFFER & SCHACHTSCHNABEL, 2010). Die Saugspannung wird durch den logarithmischen Wert pF beschrieben:

$$pF = \log cm WS \qquad \text{Gleichung 3}$$

mit: pF = dekadischer Logarithmus des Betrags der Wasserspannung WS = Wassersäule

Die Feldkapazität (FK) eines Bodens umfasst Adsorptions- und Kapillarwasser und entspricht dem Wassergehalt eines natürlich gelagerten Bodens, der sich zwei bis drei Tage nach voller Wassersättigung an einem Standort einstellt (DIN 19682 Teil 6, 1989). Es ist die Menge Bodenwasser, die in den Poren mit einem Äquivalentdurchmesser $> 50 \mu\text{m}$ (oder bei einer definierten Saugspannung $pF \geq 1,8$) im Boden gebunden ist (SPONAGEL, 2005). Die Feldkapazität eines Bodens unterscheidet sich teils stark und ist von mehreren Faktoren (Körnung, Bodengefüge, Gehalt an organischer Substanz) abhängig. Leichte Böden mit einem hohen Anteil an Sand haben eine geringere Feldkapazität als bindige Böden mit einem hohen Schluffanteil. Ein Grund dafür sind die unterschiedlichen Korngrößenverteilungen der Böden und die daraus resultierende Porengrößenverteilung. Mit den Größen der Poren variieren die Bindungskräfte, mit denen das Wasser an der Bodenmatrix gebunden ist. In Poren $> 50 \mu\text{m}$ wird kein Wasser gegen die Schwerkraft gehalten und sickert in tiefere Bodenschichten. Gebundenes Bodenwasser mit einer definierten Saugspannung pF 1,8 bis 4,2 wird als nutzbare Feldkapazität (nFK) bezeichnet, da das Wasser aus diesen Poren ($0,2$ bis $50 \mu\text{m}$) pflanzenverfügbar ist. Wasser aus Poren $< 2 \mu\text{m}$ (Feinporen) ist für die Pflanzen dagegen nicht verfügbar. Beim Permanenten Welkepunkt (PWP) beträgt die Saugspannung pF 4,2. Das in den Feinporen fest gebundene Wasser wird auch als Totwasser bezeichnet. Bei einem volumetrischen Wassergehalt von 30 Vol. % Wasser würde sich ein Tonboden nahe des PWP befinden, während ein Sandboden bis über seine Feldkapazität mit Wasser gefüllt wäre (MICHEL, 2014).

Die Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt kann als Wasserretentionskurve dargestellt werden. Bei niedrigem Wassergehalt ist die Saugspannung höher. Für Sand-, Lehm- und Tonböden sind unterschiedliche, charakteristische Kurvenverläufe typisch. Bei Kenntnis des Wassergehalts können Rückschlüsse auf die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit des Bodenwassers gezogen werden und Maßnahmen zur Auffüllung des Bodenwasserspeichers ergriffen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die im Boden gespeicherte Wassermenge erheblich schwankt. Von einer Wassersättigung spricht man, wenn alle Poren vollständig mit Wasser gefüllt sind. Ist in den Grobporen Luft statt Wasser vorhanden, ist der Boden wasserungsättigt. Befindet sich keine Luft in den Poren, herrscht für die Wurzeln Sauerstoffmangel, der bis zum Absterben der Wurzeln führen kann (EHLERS, 1996).

Wasserbewegung im Boden

Für die Bewegung des Wassers im Boden sind insbesondere die Porenformen und vor allem die Porenkontinuität ausschlaggebend. Die Wasserleitfähigkeit (oder Wasserdurchlässigkeit) eines Bodens als Kennwert beeinflusst die Bewegung des Wassers und wird durch den Leitfähigkeitskoeffizienten k (auch k_r -Wert) gekennzeichnet. Ausschlaggebend für die Wasserbewegung ist neben der Leitfähigkeit das Potentialgefälle zwischen zwei Punkten mit unterschiedlichen Energiepotential. Aus den Druckunterschieden resultiert eine entsprechende Fließgeschwindigkeit. Dabei bewegt sich das Wasser immer vom höheren Potential (höhere potentielle Energie) zum niedrigeren.

Im Zustand der Wassersättigung eines Bodens sind alle Poren gefüllt. Je durchgängiger und größer die Poren sind, desto höher ist der k_f -Wert. Für gut durchlässige Sande liegt der k_f -Wert im gesättigten Zustand $\geq 5 \text{ cm h}^{-1}$ (BLUM, 2012). Bei dicht gelagerten Tonen ist der k_f -Wert im besonderen Maße von der Strukturierung abhängig und kann bis $0,5 \text{ cm h}^{-1}$ betragen. In einem nicht wassergesättigten Zustand des Bodens sind dagegen nicht alle Poren mit Wasser gefüllt. Sinkt der Wassergehalt, geht die Wasserleitfähigkeit stark zurück, wobei sich zuerst die großen Poren entleeren. Die Durchlässigkeit wird in diesem Zustand neben dem Wassergehalt durch die Saugspannung bestimmt. Prinzipiell ist bei höheren Potentialgefällen mit höheren k_f -Werten zu rechnen, allerdings tritt der Einfluss des Potentialgefälles bei höheren Saugspannungen zurück. Dabei entleeren sich die Grobporen, doch das restliche Wasser verbleibt in den Feinporen. Während die Wasserleitfähigkeit im gesättigten Bereich eine Bodenkonstante ist, schwankt dieser im ungesättigten Bereich mit der Bodenfeuchte. Einen großen Einfluss auf die Durchlässigkeit von Böden haben Makroporen (Sekundärporen), durch die sehr viel höhere Leitfähigkeiten zu beobachten sind (HARTGE & HORN, 2014).

2.1.3 Bewässerungs- und Beregnungsverfahren

Nach SOURELL (2014) lassen sich die in Deutschland verbreiteten Bewässerungsverfahren in zwei Gruppen unterscheiden: in die Mikrobewässerung und in die Beregnung. Bei der Mikrobewässerung wird das Wasser oberirdisch oder unterirdisch direkt an die Pflanze gebracht. Dazu zählen Anlagen zur Tropfbewässerung, Sprühbewässerung und Unterflur-bewässerung. Bei der unterirdischen Mikrobewässerung werden Tropfrohren oder -schläuche im Boden verlegt, die das Wasser direkt in die Wurzelzone der Pflanzen bringen. Je nach Bedarf sind verschiedene Verlegtiefen möglich. Die Vorteile der Mikrobewässerung im Vergleich zur Beregnung liegen im geringeren Wasserverbrauch und in geringen Wasserverlusten, beispielsweise durch Verdunstung. Durch den niedrigen Betriebsdruck ($< 2 \text{ bar}$) wird weniger Energie verbraucht. Die Terminierung der Wassergaben ist durch Steuerungselemente bedienerfreundlich gestaltet. Dem gegenüber stehen sehr hohe Investitionskosten, aber auch ein hoher Arbeitszeitaufwand beim Auf- und Abbau der Anlage, insbesondere bei einjährigen Kulturen (SOURELL, 2014).

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht das Verfahren der Beregnung, das in den gemäßigten Klimagebieten am weitesten verbreitet ist. Unter Beregnung werden Verfahren verstanden, bei denen künstlich Wasser auf die Pflanzen „über Kopf“ mithilfe einer Beregnungsanlage ausgebracht wird. Ungefähr 80 % der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland, die Bewässerung als Betriebsmittel einsetzen, nutzen Anlagen zur Beregnung (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2016a). Die Beregnungsverfahren werden hinsichtlich Anlagenart in ortsfeste Reihenregner, teilmobile und mobile Anlagen (SOURELL, 2014).

Mobile Beregnung und Düsenwagentechnik

Die mobile Beregnung ist in Deutschland weit verbreitet. Bei mobilen Beregnungsanlagen sind vorwiegend Maschinen mit Regnereinzug im Einsatz. Eine Beregnungsmaschine steht dabei am Feldrand. Sie besteht aus einer Turbine sowie einer Rohrtrommel, auf die ein bis zu 600 m langes

flexibles PE-Rohr aufgewickelt werden kann. Die Beregnungsmaschine wird mit einem Regner, beispielsweise einem Düsenwagen oder einem Weitwurfregner, über das PE-Rohr gekoppelt. Mit einem Traktor wird der Regner an das gegenüberliegende Feldende gezogen. Gleichzeitig wird dabei das PE-Rohr von der Trommel abgerollt und auf dem Ackerboden abgelegt.

Für den Beregnungsvorgang wird Wasser beispielsweise von einer Pumpstation zur Beregnungsmaschine gepumpt. Mit dem Wasserdruck wird eine Turbine angetrieben, die das entstehende Drehmoment auf die Rohrtrommel überträgt. Über das PE-Rohr gelangt das Wasser zum Regner, an dem je nach Regnertyp zwischen 2 und 5 bar benötigt werden. Das Wasser wird über am Düsenwagen montierte Düsen abgegeben und trifft aus einer Höhe von ca. 2 m auf den Boden. Gleichzeitig zieht die Beregnungsmaschine das PE-Rohr ein und rollt es auf die Rohrtrommel auf. Dadurch wird der Düsenwagen in Richtung Beregnungsmaschine bewegt. Die Höhe der Beregnungsgabe wird über die Einzugsgeschwindigkeit geregelt (SOURELL, 2014). Der Düsenwagen besteht aus verzinkten, selbsttragenden Rohrelementen, die von einem mittig montierten Fahrgestell mit Rädern getragen werden (siehe Abb. 1).



Abb. 1: Düsenwagen bei der Beregnung auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen [Foto D. Schwarz]

Die beiden Ausleger, die aus mehreren zusammenklappbaren Segmenten bestehen, überspannen je nach Bauart bis zu 60 m. An den Segmenten sind in gleichen Abständen 360°- Rotatordüsen (siehe Abb. 2, links im Bild) montiert, deren Spritzbilder sich überlappen (siehe Abb. 2, rechts im Bild). Dadurch wird die überfahrene Fläche bis auf die Randbereiche gleichmäßig beregnet.

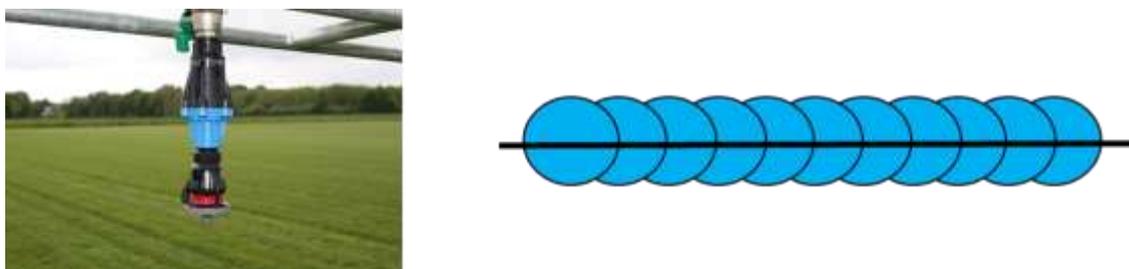


Abb. 2: Rotierende Düse mit Druckminderer am Ausleger des Düsenwagens (Bild links), Schematische Darstellung der Draufsicht auf das Gestänge des Düsenwagens mit sich überlappenden Spritzbildern der Düsen (Bild rechts) [Foto D. Schwarz links, eigene Darstellung rechts]

Die rotierenden Düsen (\varnothing 6 bis 7 mm) arbeiten mit einem Betriebsdruck von 1,4 bis 2 bar. Bei einer Montagehöhe von ca. 2 m sind Wurfweiten bis 12 m möglich. Das Ergebnis ist eine gleichförmig bewässerte, rechteckige Fläche. Der Betriebsdruck am Düsenwagen liegt bei 4 bis 5 bar und je nach gewünschter Beregnungshöhe liegen die Einzugsgeschwindigkeiten zwischen 30 m h^{-1} und 120 m h^{-1} . Für die Beregnung eines ca. 60 bis 70 m breiten Streifens eines Schlags werden je nach Länge des Schlags und Höhe der Beregnungsgabe zwischen sechs und zehn Stunden benötigt. Anschließend müssen sowohl die Beregnungsmaschine als auch der Düsenwagen auf die nächste zu beregnende Teilfläche mit einem Traktor und einer Arbeitskraft umgesetzt werden. Die Steuerung der Beregnungsmaschinen ist über Mobilfunk möglich.

Der Vorteil des Düsenwagens gegenüber dem Weitwurfregner mit Einzeldüse (Kanone) ist der geringere Betriebsdruck (2 statt 5 bar) am Regner. Damit einher geht ein niedriger Energieverbrauch. Aufgrund der geringen Fallhöhe des Wassers auf den Boden ($< 2 \text{ m}$) ist die Düsenwagentechnik gegenüber dem Weitwurfregner weniger anfällig für Windabdrift. Das Wasser wird rechteckig und relativ gleichförmig auf der Fläche verteilt, wobei die im Vergleich zur Weitwurfdüse geringere Tropfengröße eine vergleichsweise boden- und pflanzenschonendere Applikation ermöglicht. Der Wasserbedarf beim Düsenwagen ist gegenüber dem Weitwurfregner um 25 % niedriger (KTBL, 2013).

Beregnungsintensität und Grenzwerte

Parallel zur Niederschlagsintensität NI wird in der Beregnungstechnik die Beregnungsintensität BI als Kennwert verwendet. Sie ergibt sich aus dem Volumendurchfluss pro Regner ($\text{m}^3 \text{ h}^{-1}$) und der beregneten Fläche und wird vereinheitlicht in mm h^{-1} angegeben. Nach DIN 4047-6 wird zwischen Schwachregnern ($< 7 \text{ mm h}^{-1}$), Mittelstarkregnern ($8 - 20 \text{ mm h}^{-1}$) und Starkregnern ($> 20 \text{ mm h}^{-1}$) unterschieden. Schwachregner haben eine geringere Flächenleistung, benötigen dafür aber einen vergleichsweise niedrigen Betriebsdruck an der Düse (2 – 4 bar). Zum Vergleich zwischen den Beregnungsintensitäten von Weitwurfdüse und Düsenwagen gibt es verschiedene Quellen. KRUG (2002) gibt für den Düsenwagen eine mittlere Intensität ($15 - 25 \text{ mm h}^{-1}$) gegenüber der hohen Beregnungsintensität bei Weitwurfregnern ($25 - 40 \text{ mm h}^{-1}$) an. Im Vergleich hat ein Starkregen der Stufe 1 eine $\text{NI} > 10 \text{ mm h}^{-1}$ und Starkregen der Stufe 2 $\text{NI} > 25 \text{ mm h}^{-1}$ (DWD, 2018). Eine zu hohe Beregnungsintensität kann ähnlich wie Starkregen zu negativen Folgen führen. Bedeckter Boden ist weniger gefährdet als Boden ohne Bewuchs, der den Tropfen direkt ausgesetzt ist. Insbesondere für Bestände in der Auflaufphase sowie noch nicht geschlossenen Beständen wird eine geringe Beregnungsintensität empfohlen, um eine Schädigung des Bodens durch Erosion zu verhindern.

2.1.4 Auswirkungen der Beregnung

Mit der Beregnung soll ein natürliches Regenereignis simuliert werden. Aus den Eigenschaften der Tropfen und dem Aufprall auf den Boden lässt sich eine mögliche Schädigung der Oberflächenstruktur ableiten. Die Aufnahme des Wassers durch Boden und Pflanzen bestimmen den Erfolg einer Beregnung. Dabei spielen die Wasseraufnahmefördernden und -hemmenden Faktoren eine wichtige Rolle. Wasser, das nicht infiltriert, fließt oberflächlich ab und bewirkt oftmals einen irreversiblen Bodenverlust. Zum Schutz des Bodens sollten negative Auswirkungen der Beregnung, wie Oberflächenabfluss und Bodenabtrag, vermieden werden.

Tropfenaufprall und Splash-Erosion

Der durch Wasserdruck und Düsen geschaffene „künstliche“ Regen soll möglichst einem natürlichen Landregen ähneln. Während Sprüh- oder Nieselregen aus kleinen, feinen und dicht verteilten Wassertropfen (Durchmesser 0,1 - 0,5 mm) bestehen, können die Tropfen bei Stark- und Gewitterregen einen Durchmesser bis 5 mm erreichen. Bei entsprechender Fallhöhe besitzen größere Tropfen aufgrund ihres höheren Gewichts eine höhere kinetische Energie. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der Oberfläche, auf die die Tropfen aufschlagen, ist die Wirkung des Aufpralls verschieden. Treffen Tropfen beispielsweise auf schwankende Blätter, wird ein Teil der Aufprallenergie in Bewegungsenergie umgewandelt. Auf humosen Auflagen dagegen werden Tropfen abgefedert. Treffen Tropfen direkt auf den Boden, wirkt der Aufprall, je nach Oberflächenzustand, unterschiedlich stark. Während sich der Tropfen auf einer weichen Bodenoberfläche eingräbt, zerplatzt er dabei. Beim Tropfenaufprall können Bodenaggregate zerstört und Bodenpartikel umgelagert werden. Diese können dabei bis zu 1,50 m weit fortgeschleudert werden (AUERWALD, 1998). Den als Plansch (*splash*) bezeichneten Prozess gilt es bei der Beregnung zu minimieren.

Insbesondere bei bindigen Böden können auftreffende Wassertropfen zur Splash-Erosion führen. In Folge davon tritt eine Schädigung der Bodenoberflächenstruktur durch Verschlammung ein. Dabei werden Bodenteile so umgelagert, dass kleinere Bodenpartikel die Poren zwischen größeren verstopfen. Bei nachfolgender Austrocknung durch Sonneneinstrahlung oder Wind kann die Bodenoberfläche eine verdichtete Kruste ausbilden. Auftreffendes Wasser kann dadurch nicht in den Boden eindringen und fließt oberflächlich ab. Durch das Überfließen verschlämmt der Boden weiter. Werden durch Oberflächenabfluss Bodenpartikel abgetragen und wegtransportiert, findet Wassererosion statt. Beim Bodenabtrag werden bevorzugt Feinmaterial und Humuspartikel abgetragen.

Nach WALLING (1983) wird der Boden durch selektive Erosion grobkörniger und nährstoffärmer. Nicht nur verschlammte und verdichtete Oberflächen führen laut KTBL (2013) zum Oberflächenabfluss. Auch wenn die Wasseraufnahmefähigkeit (Regenverdaulichkeit) eines Bodens nicht ausreicht, um das Wasser aufzunehmen, führt dies zu Abfließen von Wasser auf der Bodenoberfläche. SOURELL (2014) gibt folgende bodenbedingte Grenzwerte für die Aufnahme von Wasser in Böden an: für Löß- und Lehmböden 10 mm h^{-1} , für sandige Lehme 12 mm h^{-1} , für lehmige Sande 15 mm h^{-1} und für Sandböden 20 mm h^{-1} . Pflanzenbestände wirken sich nach HARTGE & HORN (2014) erosionsreduzierend aus. Dabei sind geschlossene Bestände, die den Boden vollständig bedecken, als Erosionsschutz höher zu bewerten als solche mit einem geringen Bedeckungsgrad.

Wasseraufnahme und Infiltration

Durch Infiltration kann der Boden mit Wasser aufgefüllt werden. Nach EHLERS (1996) bezeichnet Infiltration „den Eintritt des Wassers aus Niederschlag oder Beregnung durch die Bodenoberfläche in den Boden“. Die Infiltration wird durch die Infiltrationsrate i [mm h^{-1} , cm d^{-1}] beschrieben. Sie gibt an, wieviel Wasser in einer bestimmten Zeit in den Boden infiltriert. Übersteigt die Regenrate die maximal mögliche potentielle Infiltrationsrate, bildet sich Oberflächenabfluss. Im Infiltrationsprozess wird nach EHLERS (1996) zwischen einer preponding-Zeit und einer ponding-Zeit unterschieden. Infiltriert Wasser in einen trockenen Boden, wird der Boden zunächst aufgesättigt. Das führt zu Änderungen des Wassergehalts, der Saugspannung und der Leitfähigkeit. Bei konstanter Niederschlagsintensität ist die Infiltrationsrate eine Funktion der Zeit. Während in der preponding-Phase die Regenrate dem Durchfluss entspricht, geht der Durchfluss in der ponding-Phase zurück. Nach einiger Zeit wird die Endinfiltrationsrate erreicht, die der gesättigten Leitfähigkeit k_s entspricht. Infiltration und Bodenfeuchte beeinflussen sich gegenseitig. Eine höhere Ausgangsbodenfeuchte ermöglicht eine höhere Infiltrationsrate. Daneben wird die Infiltrationsrate von weiteren Faktoren, wie Hangneigung, Bedeckung, Vegetation und Makroporosität beeinflusst, wodurch es zu kleinräumigen Unterschieden und damit starken Schwankungen kommen kann (EHLERS, 1996).

Bei der Infiltration dringt das Wasser nicht als geschlossene Front in den Boden, wie DEKKER & RITSEMA (1994, 2000) für Sandböden zeigten, sondern in Form von Fingern. Diese sind weitestgehend zufällig verteilt und umso stärker ausgeprägt, je höher die Regenmenge ist. Bei niedrigen Niederschlagsintensitäten bilden sich weniger, dafür aber tiefere Finger aus. Auch Makroporen (Sekundärporen) führen zu einer heterogenen Infiltration. Unter Makroporenfluss (auch präferentieller Fluss) werden diejenigen Wasserbewegungen zusammengefasst, die Risse, Grabgänge von Regenwürmern, Wurzelgänge o.ä. nutzen. Nach SYMADER (2004) kann Makroporenfluss Schicht- und Strukturgrenzen durchbrechen.

Einfluss der Benetzungshemmung

Wie sich ein Boden gegenüber Wasser verhält, lässt sich durch seine Benetzungseigenschaft charakterisieren. Sie kann über den Kontaktwinkel (CA), der sich an der 3-Phasen-Grenze (fest, flüssig und gasförmig) ausbildet, bestimmt werden. Als hydrophil gilt ein Boden bei $CA = 0$, von einer subkritischen Benetzungshemmung spricht man bei einem $0 < CA < 90^\circ$. Bei einem $CA \geq 90^\circ$ erfolgt eine Tropfenbildung. Bezogen auf den Boden spricht man von hydrophoben Verhalten gegenüber Wasser, wenn es nicht in den Boden eindringt. Das hat insbesondere Auswirkungen auf die Infiltration und Wasserverteilung im Boden. Benetzungshemmung von Mineralpartikeln wird beispielsweise durch organische Bodensubstanz und durch mikrobielle Aktivitäten hervorgerufen (WALLIS & HORNE, 1992), indem sich auf Porenoberflächen biologische Filme bilden. Mit zunehmendem Zersetzungsgrad der organischen Substanz steigt die Benetzungshemmung (BACHMANN, 1988). Die Benetzbarkeit des Bodens unterliegt einem starken Einfluss sowohl durch die Bodenfeuchte als auch durch die Bodentemperatur. Bei geringen Bodenwassergehalten wirkt die Benetzungshemmung stärker. Die Benetzbarkeit der Böden verläuft in typisch jahreszeitlicher Dynamik und wird vor allem durch den Bodenwassergehalt gesteuert (DOERR, 2006). Mit beginnender Austrocknung und der Erwärmung des Bodens im Frühjahr sinken die Wassergehalte. Gleichzeitig steigt die Benetzungshemmung. Durch heterogene, mosaikartige Verteilung der Wassergehalte im oberflächennahen Bodenbereich ist auch die Benetzungshemmung unterschiedlich ausgeprägt und variiert stark (DEKKER & RITSEMA, 2000). DOERR et al. (2006) zeigte eine inverse Korrelation zwischen Bodenwassergehalt und Benetzungsgrad auf. Bereits 1994 hatten DEKKER & RITSEMA einen kritischen Bodenwassergehalt als Grenzwert zwischen hydrophoben und hydrophilen Verhalten für untersuchte Dünen sands festgestellt. Für die Bodentiefe zwischen 5 und 10 cm betrug der volumetrische Wassergehalt 5 Vol. %. Bei einer Unterschreitung wurde die Benetzungshemmung verstärkt gemessen. Bei Untersuchungen von Sandböden im norddeutschen Tiefland fand WOCHÉ et al. (2005) heraus, dass diese häufiger als andere Böden zur Benetzungshemmung neigen. Als Grund dafür führt sie die geringere spezifische Oberfläche von Sandkörnern und die in Sandböden oft eher sauren pH-Werte an.

Durch Benetzungshemmung kann die Infiltrationsrate sinken und Oberflächenabfluss sowie Verschlammung der Bodenoberfläche zur Folge haben (WANG et al., 2000; FERREIRA et al., 2000). Die Wirkung des Regentropfenaufpralls auf einen hydrophob wirkenden Boden untersuchten TERRY & SHAKESBY (1993). Die Ergebnisse decken sich mit denen von DEKKER et al. (2000). Demnach bilden hydrophobe Böden an der Oberfläche einen Wasserfilm, während der Boden unterhalb der Oberfläche trocken bleibt. Erst wenn der Wasserfilm beispielsweise durch das Auftreffen eines großen Tropfens aufreißt, können nachfolgende Tropfen trockene Bodenpartikel mitreißen.

Schlussfolgerungen für eine angepasste Beregnung

Eine Beregnung sollte durch Tropfenaufprall aus den Düsen weder Pflanzen noch Boden schädigen. Besonderes Augenmerk liegt auf der Beregnungsintensität. Eine zu hohe Intensität kann beispielsweise Saatkörner aus dem Saatbeet herauspülen oder Keimlinge verletzen. Die Folgen für den Boden sind aufgrund der verschiedenen Erscheinungsformen der Bodenerosion vielfältig. Sie kann zu einer teils irreversiblen Schädigung der Bodenoberfläche und gegebenenfalls zu Bodenverlust führen. Hohe Beregnungsgaben können zu hohen Sickerwasserverlusten und zu Nitratverfrachtung aus dem Wurzelraum in tiefer gelegene Schichten führen und somit das Grundwasser gefährden. Für die Beregnungspraxis auf leichten, sandigen Böden werden daher mehrere kleine Beregnungsgaben empfohlen. Durch Maßnahmen der Bodenbearbeitung und des Bodenschutzes sollte eine hohe Infiltrationsleistung von Böden gewährleistet werden, um Wassergaben möglichst effizient aufzunehmen und den Ertrag der Kultur durch Beregnung zu steigern.

2.1.5 Entwicklungstendenzen in der Beregnungstechnik

Im Mittelpunkt der Optimierung von Beregnungstechnik steht die Effizienzsteigerung durch sparsamen Einsatz von Ressourcen und gleichzeitig eine optimierte Bewässerungssteuerung. Eine hohe Präzision bei der Wassergabe zum richtigen Zeitpunkt in der am aktuellen Tagesbedarf ausgerichteten Menge ist für die Effizienz der Bewässerung in hohem Maß entscheidend. Auch eine Verringerung des Betriebsdrucks durch optimierte Dimensionierung von Rohrleitungen und Pumpen senkt den Energieverbrauch.

Eine neuere Entwicklung ist die Kombination aus Tropfbewässerung und mobiler Beregnung, die mobile Tropfbewässerung. Dafür werden Tropfschläuche an handelsübliche Kreis- und Linearberegnungsmaschinen oder Düsenwagen angeschlossen. Dieses Verfahren ist insbesondere für die Beregnung von empfindlichen Reihenkulturen geeignet, da das Wasser direkt über Schläuche auf die Bodenoberfläche abgegeben wird. Verluste durch Winddrift und Verdunstung werden so reduziert. Der erforderliche Druck von 0,7 bar an den Schleppschläuchen liegt unter dem von herkömmlichen Düsen am Düsenwagen. Ein weiterer Ansatz zur Effizienzsteigerung ist die teilflächenspezifische Beregnung in der Bewässerungstechnik. Hierbei werden Innovationen aus der Beregnungstechnik und dem Beregnungsmanagement kombiniert. Während bei früheren Entwicklungen eine gleichförmige Beregnung über die gesamte Feldfläche im Vordergrund stand, werden mit der teilflächenspezifischen Beregnung die Bodenheterogenität und die immer größer werdende Schlaggröße berücksichtigt (SOURELL, 2014). Dazu sind automatisierte Messpunkte von Bodenparametern auf den zu bewässernden Flächen sowie die Digitalisierung dieser Daten in Form von Bodenzustandskarten für eine optimale Steuerung der Bewässerungstechnik im Praxistest. Für den landwirtschaftlichen Betrieb ist eine einfache Handhabung der Beregnungstechnik und -steuerung mit einem geringen Arbeitsaufwand vorteilhaft.

2.2 Dammkultur als Anbaumethode

Die Dammkultur (auch Dammsaat oder Dammanbau) ist ein altes Bodenbearbeitungssystem. Bei dieser Anbaumethode wird der Boden so geformt, dass ein erhöhtes Saat- und Keimbett oberhalb der natürlichen Oberfläche entsteht. Der vergrößerte Wurzelraum bietet den Kulturen gute Wachstumsbedingungen. Nach EGHBAL (2017) ist der Dammanbau daher für Wurzelgemüse in der gemäßigten Klimazone besonders geeignet.

Ursprünglich entwickelte sich das Dammkultur-System in ariden und semiariden Gebieten. Inzwischen ist der Anbau auf Dämmen überall auf der Welt verbreitet. Dabei gibt es sehr unterschiedliche Ausprägungen in Form und Größe, im Reihenabstand, aber auch in der Dauer der Anlage des Dammsystems. Im Norden Amerikas werden beispielsweise permanente Dämme für die Kultivierung von Sojabohne und Mais, aber auch von Gemüse über Permafrostböden erfolgreich genutzt. In den gemäßigten Gebieten Europas dagegen werden auf einjährigen Dämmen vorwiegend Hackfrüchte und Ölsaaten kultiviert. Hauptanreiz für den Anbau auf Dämmen sind verbesserte Wachstumsbedingungen, die oftmals mit Ertrags- und Qualitätssteigerungen einhergehen. Durch den Dammanbau ist auch eine Kultivierung von schwierig nutzbaren Standorten möglich, beispielsweise bei zu Staunässe neigenden Böden oder bei Dauerfrost des Unterbodens. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Vorteile, aber auch Nachteile des Dammanbaus gegenüber dem Flächenbau (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Gegenüberstellung von Damm- und Flächenbau in gemäßigten Gebieten [geändert, nach LABER, 2014]

	Dammanbau	Flächenbau
Vorteile	auf schweren Böden besseres Wachstum; schnellere Erwärmung im Frühjahr; bessere Durchlüftung des Pflanzenbestandes; genügend Erde für das Anhäufeln; bessere und gleichmäßigere Qualität des Ernteguts durch lockeres Profil; Ernte leichter; oftmals höhere Erträge	einfacher und kostengünstiger Anbau, auf leichten Böden sicherer
Nachteile	intensive Bodenbearbeitung, dadurch negative Auswirkung auf Struktur und Regenwurmbestand; auf leichten Böden schnellere Austrocknung der Dämme; Spezialgeräte für Dammformung und Hacken erforderlich	auf schwereren Böden Probleme mit Qualität und Ernte

2.2.1 Technik der Anbaumethode

Im Deutschland werden in Dammkultur vorwiegend Kartoffeln und Gemüse (z.B. Möhre, Rote Bete, Schwarzwurzel, Spargel, Meerrettich, Chicorée) angebaut. Darüber hinaus spielt die Dammkultur im Ackerbau auch bei Zuckerrüben, Steckrüben, Mais, Soja und Raps eine zunehmende Rolle. Dämme werden sowohl im Herbst als auch im Frühjahr geformt. Herbstdämme setzen sich über den Winter und benötigen vor der Einsaat im Frühjahr eine intensive Beikrautkur. Für die Formung von Frühjahrsdämmen muss abgewartet werden, bis der Boden abgetrocknet und mit Maschinen befahrbar ist. Anschließend benötigen die Dämme je nach Bodentyp ungefähr drei Wochen Zeit, um sich zu setzen, bevor eine Aussaat erfolgen kann. Dies fördert einen guten Bodenschluss des Saatguts und damit eine optimale Keimung. Während Herbstsaaten mit Keimung im Frühjahr bei Steckrüben verbreitet sind, werden Frühjahrssaaten beispielsweise im Möhrenanbau praktiziert (WONNEBERGER, 2004).

Dammformung

Je nach Kultur unterscheiden sich die Dämme hinsichtlich der verwendeten Technik zur Dammformung und damit in der Form. Trapezförmige Dämme mit ebener Oberfläche, wie in Abbildung 3, werden beispielsweise beim Anbau von Möhren und Zuckerrüben genutzt.

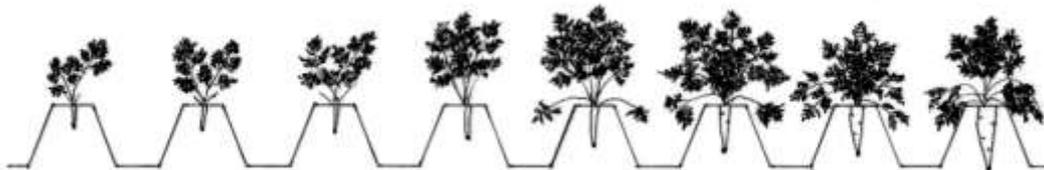


Abb. 3: Trapezförmige Dämme beim Möhrenanbau [eigene Darstellung]

Für eine Saatbettbereitung mit gewölbter, halbrunder Oberfläche, wie sie beim Anbau von Kartoffeln genutzt wird, werden häufig Schare eingesetzt. Eine besondere Form stellt der Häufelpflug von Julian Turiell dar, dessen Verwendung auf eine minimale Bodenbearbeitung abzielt (MÜLLER, 2009). Im Gegensatz dazu stellt die verbreitete Form der Dammkultur mit einjährigen Dämmen eine intensive Form der Bodenbearbeitung dar (LABER, 2014).

Für das Anlegen von Dämmen im Feldgemüsebau wird für alle Böden eine tiefgründige Grundbodenbearbeitung im Herbst, beispielsweise mit einem Pflug, empfohlen (EGHBAL, 2017). Dabei wird die Erde zunächst bis zu 20 cm tief gelockert. Bei der Zerkleinerung der Kluten werden die ursprüngliche Bodenstruktur und die Bodengare zerstört. LABER (2014) weist auf die Gefahr hin, dass durch Tiefenlockerung vorhandene Regenwurmgänge o.ä. zerstört werden. Im Herbst oder im Frühjahr nach dem Abtrocknen des Bodens erfolgt der Aufbau der Dämme. Beim Fräsen wird der Boden durchmengt und es entsteht eine fein gekrümelte Struktur, die ideal für das Einbringen von Saatgut ist. Es gelangt mehr Sauerstoff in den Boden, wodurch organisches Material besser abgebaut wird.

Nach der Formung durch einen mehrreihigen Dammmformer werden die Dämme durch Walzen und Bleche abgestrichen und festgewalzt, um eine gute Rückverfestigung des Saatbeets zu erreichen. Die Furchen zwischen den Dämmen dienen teilweise als Fahrspur und sind bei einer Reihenweite von 75 cm zwischen den Dämmen ca. 30 cm breit. Die Höhe der Dämme beträgt ca. 30 – 35 cm, die Breite der Dammkrone 20 - 25 cm. Aufgrund der Witterung und der Pflegemaßnahmen flachen und runden die Dämme im Laufe der Vegetationsperiode ab, wodurch die Dämme breiter und die Furchen schmaler werden. Für die Pflege von Dammkulturen kommen neben dem Einsatz von Pestiziden im konventionellen Anbau insbesondere beim ökologischen Anbau mechanische Verfahren zum Einsatz. Durch die Damngeometrie haben Hacken und Häufelkörper eine gute Führung, so dass die Kulturpflanzen auf den Dämmen geschont werden.

Eine besondere Herausforderung stellt die Bestandspflege auf der Dammkrone bis zum Bestandsschluss der Kulturpflanze dar. Neben kostenintensiver Handjäte kommt insbesondere im Ökolandbau die Abflammtchnik im Voraufbau von Dammsaaten zum Einsatz. Unter Abflammen versteht man ein thermisches Verfahren, bei dem die aufgelaufenen Beikräuter durch starke Hitzeeinwirkung zum Absterben gebracht werden. Dieses Verfahren findet vor und nach der Aussaat der Kulturpflanze, längstens bis zu deren Auflaufen Anwendung. Durch späteres Häufeln der Dämme werden beispielsweise bei Kartoffeln oder Möhren grüne Schultern verhindert und gleichzeitig das Beikrautwachstum durch Überschütten unterdrückt. Der Dammanbau erleichtert auch die Ernte durch moderne Erntetechnik. Dabei greifen Roder in die Dammunterseite und heben das Erntegut hoch, wodurch die Dämme zerstört werden. Das Erntegut wird jedoch geschont.

Auswirkungen auf Boden und Pflanzen

Die Vorteile des Dammanbaus kommen im gemäßigten Klima insbesondere bei lehm- und lößhaltigen Böden zum Tragen. Während beim Anbau in Flachkultur durch die schräge Sonneneinstrahlung gleiche Temperaturen in allen Bereichen herrschen, ist beim Anbau auf Dämmen die Einstrahlungsintensität auf der sonnenzugewandten Flanke höher (siehe Abb. 4).

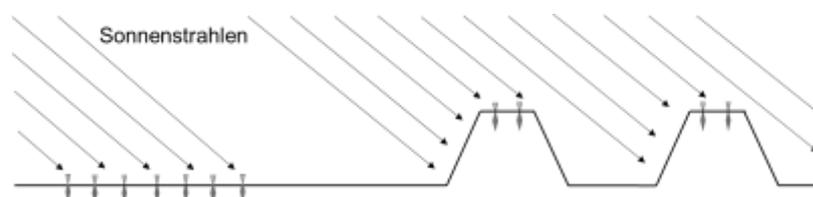


Abb. 4: Sonneneinstrahlung, links im Bild beim Flächenbau, rechts im Bild beim Dammanbau [eigene Darstellung]

Somit entsteht neben und auf den Dämmen ein unterschiedliches Mikroklima mit Luftbewegung durch Temperaturunterschiede. Insgesamt ist die Oberfläche beim Dammanbau größer, so dass sich die Dämme im Frühjahr schneller erwärmen. Die höhere Bodenwärme wirkt sich positiv auf Keimung und Pflanzenwachstum aus. Bei einigen Kulturen ermöglichen höhere Temperaturen im Boden eine Vorverlegung des Aussaattermins (LABER, 2014). Das bestätigte KRAUSE (2007)

bei Untersuchungen zum Dammanbau von Zuckerrüben. Bereits eine Erhöhung der Temperaturen um ca. 1° C im Damm führte bei zeitiger Aussaat zu einem beschleunigten Feldaufgang und einem Mehrertrag von 7 – 9 % gegenüber dem Flachanbau.

Auch im Hinblick auf die Wasserversorgung der Dämme bieten sich Vorteile. Bei Dämmen ist ein schnelleres Abtrocknen nach Niederschlägen zu beobachten. Bei Trockenheit ist der Wasserstrom aufwärtsgerichtet und ermöglicht durch kapillaren Aufstieg insbesondere bei bindigen Böden eine gute Wasserversorgung (LABER, 2014). Bei zur Nässe neigenden Standorten werden die Kulturen durch das erhöhte Saatbeet vor Staunässe geschützt. Dem gegenüber stehen einige Nachteile. Die Dämme trocknen durch die größere Oberfläche schneller aus. Bei ausbleibenden Niederschlägen im Frühjahr ist mit einem ungleichmäßigen Saataufgang zu rechnen (EGHBAL, 2017). Daher wird ein Bereithalten von Bewässerungstechnik zur Deckung des Wasserbedarfs empfohlen.

Eine hohe Aggregatstabilität wirkt sich positiv auf die Infiltration von Wasser im Boden aus. Durch intensive Bodenbearbeitung, wie dem Dammaufbau, können Aggregate zerstört werden. Beim Fräsen der Dämme wird der Boden fein gekrümelt. Dabei besteht die Gefahr einer Entmischung von Kornfraktionen. Das kann negative Auswirkungen auf den Wassertransport sowohl bei der Infiltration als auch beim kapillaren Aufstieg haben. Auf der anderen Seite herrscht durch das lockere Bodengefüge im Damm ein verbesserter Gasaustausch (Sauerstoff, Kohlendioxid). Das wirkt sich positiv auf die Pflanzenwurzeln und im Boden lebende Mikroorganismen aus (EGHBAL, 2017). Vorsicht ist wegen der höheren Stickstoffmineralisierung in Dämmen in Bezug auf Nitratanreicherung im Erntegut geboten. Zur Verhinderung später Mineralisierungsschübe ist ein Austrocknen des Dammkörpers zu verhindern. Durch Starkregen oder zu hohe Bewässerungsgaben besteht auf der anderen Seite die Gefahr der Nitratauswaschung über das Sickerwasser in das Grundwasser (LABER, 2014). Positiv dagegen wirkt sich der Anbau in Dammkultur auf die Phytosanität aus. Die bessere Durchlüftung der Kulturpflanzenbestände auf den Dämmen kann beispielsweise den Befall mit pilzlichen Erregern reduzieren.

2.2.2 Bewässerungspraxis beim Dammanbau

Durch Bewässerung lässt sich neben der Erntemenge vor allem die Qualität steigern. Ziel ist die gleichmäßige Entwicklung des Kulturpflanzenbestandes. Dafür müssen die Schwankungen der Bodenfeuchte im Dammkörper möglichst geringgehalten werden. Beim Austrocknen des Dammkörpers können anfällige Kulturen Verformungen oder Wachstumsrisse ausbilden, was sich negativ auf die Qualität des Ernteguts auswirkt. Neben Temperatur und Durchlüftung beeinflusst die Bewässerung ebenso die Intensität der Mineralisation im Damm, die insbesondere im Ökolandbau für die Stickstoffversorgung der Kulturpflanzen eine wichtige Rolle spielt.

Traditionell wird zur Bewässerung in subtropischen und semiariden Gebieten üblicherweise das Wasser zwischen die Dämme in die Furchen geleitet und angestaut. Dieses Verfahren ist auch als Furchenbewässerung bekannt und in der kleinbäuerlichen Landwirtschaft weltweit die am meisten praktizierte Bewässerungsmethode. Zunehmende Verbreitung findet beim Dammanbau die Tropfbewässerung. Dafür werden Tropfschläuche entweder in die Dammkörper selbst, auf

der Dammkrone oder zwischen den Dämmen in den Furchen verlegt. Durch die Vermeidung der Blattbenetzung wird beispielsweise bei der Kartoffel die Gefahr von Krautfäule reduziert. In Abbildung 5 wurden Tropfschläuche in jede zweite Furche zwischen den Dämmen verlegt.

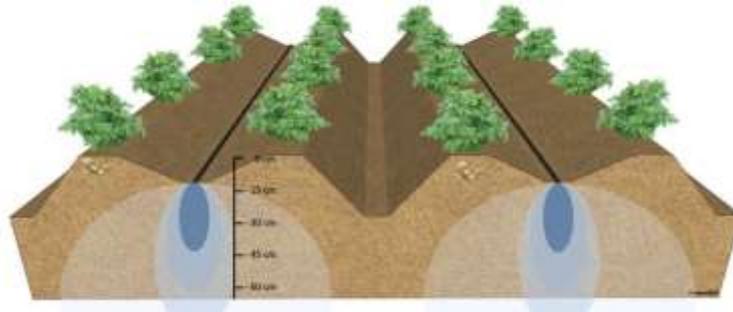


Abb. 5: Tropfbewässerung bei Kartoffeldämmen [LfL, 2016]

Das Wasser breitet sich unter den Furchen aus und wird von den trockenen Dämmen über Kapillartransport angesogen. Da die Wurzeln zur Feuchtigkeit hinwachsen, muss der zu durchfeuchtende Bodenraum in Abhängigkeit vom Entwicklungsstand der Kulturpflanze definiert werden und die Bewässerungsgaben entsprechend bemessen werden. Je nach Bodenart und Schlauchposition ist eine gute Terminierung und Dosierung notwendig, um das Wasser im Boden pflanzenverfügbar zu speichern und eine Sickerwasserbildung zu verhindern. Bei der Tropfbewässerung wird ein frühzeitiger Beginn der Bewässerung, bereits ab Unterschreiten einer nutzbaren Feldkapazität von 80 % nFK empfohlen (LfL, 2016). Gleichzeitig ist über die Tropfschläuche eine Flüssigdüngung (*fertigation*) möglich.

Auch bei Dammkulturen sind die Bewässerungsverfahren der mobilen und teilmobilen Beregnung im Feldgemüsebau am Verbreitetsten. Die gesamte Fläche (Dammkronen, -flanken und -furchen) wird dabei gleichermaßen beregnet. Anschließend sind neben den Dämmen auch die Furchen vernässt, so dass die Befahrbarkeit auf dem Feld bei bindigen Böden bis zu drei Tagen eingeschränkt ist. Überschüssiges Wasser kann in prädestinierten Lagen zu Erosion führen.

Risiko und Gegenmaßnahmen

Bei Hangneigung sollen Dämme aufgrund der Erosionsgefahr prinzipiell quer zum Gefälle angelegt werden. Gerade im Frühjahr sind Dämme wegen der geringen Bodenbedeckung exponiert. Durch Starkregenereignisse aber auch durch intensive Beregnung kann die Bodenoberfläche bei bindigen Böden verschlämmen. Durch unmittelbares Austrocknen im Anschluss können sich Krusten bilden, die als Sperrschichten fungieren und ein Auflaufen von Keimlingen erschweren oder verhindern können. Durch eine gezielte Beregnung der Dämme kann die Kruste auf der Dammkrone aufgeweicht werden. Bei bindigen Böden bilden sich oftmals Trockenrisse, durch die die Evaporationsrate ansteigt. Gleichzeitig kann auftreffendes Wasser unmittelbar in tiefere Schichten versickern und für die Pflanzen verloren gehen.

2.2.3 Möhrenanbau auf Dämmen

Im Feldgemüsebau wird die Möhre überwiegend als Hauptfrucht angebaut (LABER, 2014). Dabei wird das Saatgut der Möhre nach der Bodenvorbereitung direkt ins Feld ausgesät. Typisch für den Möhrenanbau ist eine einjährige Nutzung der Anbaufläche, wobei ein Fruchtwechsel mit anderen landwirtschaftlichen Kulturen, beispielsweise mit Getreide, Kartoffeln oder Zwischenfrüchten, praktiziert wird. Die Möhre sollte nicht direkt auf Klee gras oder Luzerne folgen, da die hohen Stickstoffmengen nicht verwertet werden und zu einer Akkumulation von Nitrat führen können. Aufgrund der Übertragung von Krankheitserregern sowie Schädlingsbefall sollte die Möhre nicht häufiger als im Abstand von vier bis fünf Jahren angebaut werden (WONNEBERGER, 2004). Günstig sind windoffene Lagen als Schutz gegen die Möhrenfliege (EGHBAL, 2017).

Die Entwicklungsphasen der Möhre

Die Möhre gehört zu den Wurzelgemüsen. Sie ist eine zweijährige Pflanze, die im Feldgemüsebau einjährig kultiviert wird. Im ersten Jahr bildet sie erst eine Blattrosette aus gefiederten Blättern und dann eine Pfahlwurzel. Im zweiten Jahr verlängert sich die Sprossachse und trägt Blüten. Mit einer durchschnittlichen Wurzeltiefe von über 60 – 100 cm gehört die Möhre zu den „Mitteltief“wurzlern (KRUG et al., 2002). Die eigentliche Möhre ist eine Speicherwurzel, die sich durch Dickenwachstum des oberen Wurzelteils bildet (siehe Abb. 6).

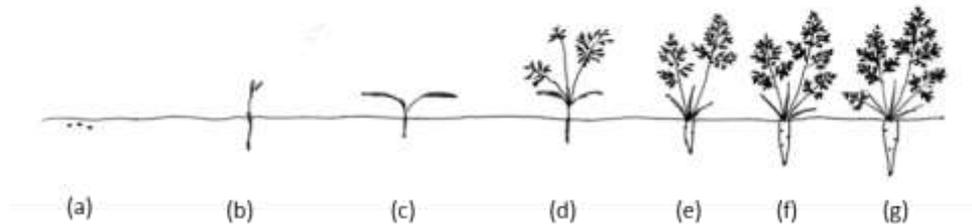


Abb. 6: Entwicklung der Möhre vom keimenden Saatgut bis zur erntereifen Rübe [eigene Darstellung]

Die Entwicklung der Möhre läuft wie folgt ab: Das Saatgut liegt im Boden in einer Tiefe von 1 – 3 cm (a). Wenn es keimt, bildet sich ein Bügel. Aus dem Bügelstadium richtet sich der Keimling auf und schiebt sich durch die ihm aufliegende dünne Bodenschicht nach oben (b) und entfaltet zwei Keimblätter (c). Die Saat ist dann „aufgelaufen“. Anschließend entfalten sich die gefiederten Laubblätter (d), deren Anzahl und Größe mit der Zeit zunimmt (e-g). Parallel schreitet die Entwicklung der vegetativen Pflanzenteile fort. Die Rübe wird nach ca. 16 Wochen geerntet.

Die BBCH-Skala ist eine einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen. In Tabelle 5 ist die BBCH-Codierung von Wurzel- und Knollengemüse dargestellt. Die Entwicklungsstadien werden in neun Makrostadien unterteilt: Keimung/Keimpflanzenentwicklung, Blattentwicklung, Entwicklung vegetativer Pflanzenteile, Erscheinen der Blütenanlage, Blüte, Fruchtentwicklung, Frucht- und Samenreife sowie Absterben. Je nach Sorte läuft die Möhre zum Abschluss der Keimphase nach ca. 2 - 3 Wochen auf. Die Keimblätter sind dann voll entfaltet (BBCH-Code 10). Die Jugendphase endet nach ca. acht Wochen mit dem BBCH-Code 19. Ab dem BBCH-Code 41 beginnt das Dickenwachstum der Rübe (MEIER, 2001).

Tab. 5: BBCH Codes Wurzel- und Knollengemüse, Makrostadien 1-4 [geändert, nach MEIER, 2001]

BBCH-Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien von Wurzel- und Knollengemüse	
Code	Beschreibung
Makrostadium 0: Keimung/ Keimpflanzenentwicklung	
00	Trockener Samen
01	Beginn der Samenquellung
03	Ende der Samenquellung
05	Keimwurzel aus dem Samen ausgetreten
07	Hypokotyl mit Keimblättern hat Samenschale durchbrochen
09	Auflaufen: Keimblätter durchbrechen Bodenoberfläche
Makrostadium 1: Blattentwicklung (Hauptspresse)	
10	Keimblätter voll entfaltet, Vegetationspunkt oder Laubblattansatz sichtbar
11	1. Laubblatt entfaltet
12	2. Laubblatt entfaltet
13	3. Laubblatt entfaltet
1.	Stadien fortlaufen bis ...
19	Neun oder mehrere Laubblätter entfaltet
Makrostadium 4: Entwicklung vegetativer Pflanzenteile (Erntegut)	
41	Beginn des Dickenwachstums der Rübe (Durchmesser > 0,5 cm)

Der Anbau der Möhre

Für den Anbau der Möhre bestehen in Deutschland sehr günstige Wachstumsbedingungen. 2016 wurden auf mehr als 11.200 ha Möhren angebaut (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2016b). In Schleswig-Holstein beispielsweise werden auf 20 % der Gemüseanbaufläche Möhren kultiviert (LK SCHLESWIG-HOLSTEIN, 2018). Der Anteil von kontrolliert biologisch angebauten Möhren ist dabei sehr hoch und lag in Niedersachsen 2016 bei etwa 20 % (ML NIEDERSACHSEN, 2016).

In der gemäßigten Klimazone kann die Möhre bei optimalen Bedingungen sehr hohe Wachstumsleistungen erreichen. Sie ist wenig kälteempfindlich und keimt ab 5 °C. Optimal sind Tagesdurchschnittstemperaturen zwischen 16 und 18 °C (WONNEBERGER, 2004). Besonders gut gedeiht die Möhre in lockeren, durchlässigen, steinfreien und nährstoffreichen Böden (Sand- bis Lehmböden), die nicht zu Vernässung oder zu Verschlammung neigen (KRUG, 2002). Während der Möhrenanbau auf leichten Böden in Flachkultur möglich ist, wird auf mittelschweren Böden ein Anbau in Dammkultur empfohlen und praktiziert. Für den Möhrenanbau günstig sind Humusgehalte bis zu drei oder vier Prozent (EGHBAL, 2017). Gleichzeitig ist für ein optimales Wachstum ein ausreichendes und gleichmäßiges Wasserangebot notwendig. Das trifft nach LABER et al. (2014) insbesondere auf die Keim- und Entwicklungsphase der Jungpflanzen zu.

Für die Aussaat benötigt die Möhre ein lockeres und krümeliges Saatbett. Die Aussaattermine für Möhren sind je nach Sorte unterschiedlich. Bei Frühmöhren wird bereits Mitte Februar mit Fließabdeckung ausgesät, bei Spätmöhren bis in den Sommer. Die Aussaat erfolgt etwa 2 -3 cm tief in ein gelockertes, gut gesetztes Saatbett standardmäßig mit einer pneumatischen Einzelkorn-Sähmaschine (LABER, 2014). Auf Beeten wird die Möhre oftmals als Band in Breitsaat und auf Dämmen in Einzel- oder Doppelreihen eingesät. Dabei sind ein guter Bodenschluss sowie eine ausreichende Bodenfeuchte wichtig, um eine optimale Keimung des Saatguts zu erreichen. Die Keimdauer beträgt je nach Sorte zwischen 14 und 28 Tagen. Damit gehört die Möhre im Gegensatz zu den meisten Beikräutern zu den langsam keimenden Pflanzen. Die Kulturdauer der Möhre variiert und reicht von 80 Tagen bis zu 180 Tagen. Die Bestandsdichten liegen zwischen 100 Pflanzen (je m²) bei Lagermöhren und 200 Pflanzen (je m²) bei Frischmöhren (KRUG, 2002).

Die Möhre ist eine Kultur mit sehr langsamer Jugendentwicklung und hat demzufolge eine geringe Beikrautunterdrückungskraft. Daher sollte der Beikrautdruck auf der Fläche von Anfang an niedrig gehalten werden. Da im Ökolandbau keine Pestizide zur Beikrautregulierung eingesetzt werden, kommt mechanischen und thermischen Verfahren eine besondere Bedeutung zu. Schon im Voraufbau der Möhre wird eine „Beikrautkur“ durch Abflammen empfohlen (EGHBAL, 2017). Anschließend werden die Kulturreihen durch Handjäte bis zur Bestandsdichte weitestgehend beikrautfrei gehalten. Zwischen den Dämmen kann das Beikraut mechanisch eliminiert werden. Durch das Häufeln beim Schließen der Bestände wird ihr Wachstum gehemmt und grünen Köpfen beim Erntegut vorgebeugt (WONNENBERGER, 2004).

Berechnungsempfehlungen für den Möhrenanbau

Beim Anbau von Möhren, die auf leichten Böden besonders gut wachsen, kommt immer häufiger Bewässerungstechnik zum Einsatz. Ausfallende natürliche Niederschläge wirken sich insbesondere auf leichten Böden mit geringer Wasserhaltekapazität negativ auf Keimungsraten und Auflaufdichten aus. Ebenso eine negative Auswirkung hat Starkregen im Frühjahr. Die Oberfläche der Dämme kann bei mittleren Böden verschlammten oder verkrusten, wodurch ein gleichmäßiges Auflaufen im Anschluss erschwert wird.

Durch zusätzliche Anlaufberegnung kann eine optimale Durchfeuchtung der obersten Bodenschicht, in der das Saatgut liegt, während der Keimphase der Möhre sichergestellt werden. Nach Wonneberger (2004) ist die Wasserversorgung gerade in der Keimphase für die spätere Bestandsdichte entscheidend. Eghbal (2017) empfiehlt für den Möhrenanbau eine Auflaufberegnung von 3 – 5 mm in kleinen Gaben. Sie sollte durch 4 mm - Düsen appliziert werden, wodurch eine feintropfige Verteilung des Wassers erreicht wird. Das deckt sich mit der Empfehlung von Wonneberger (2004), der 5 – 6 mm für die Auflaufberegnung empfiehlt. Er warnt vor zu hohen Beregnungsgaben (20 – 25 mm und höher) in der Keimphase wegen der Auswaschgefahr für das Möhrensaatgut. Laber (2014) weist darauf hin, dass durch leichte Beregnung eine Verkrustung der Bodenoberfläche aufgeweicht werden kann, so dass die Keimlinge besser auflaufen können. Andernfalls, so Wonneberger (2004), reißen die Keimlinge und laufen ungleichmäßig auf.

Insbesondere im Ökolandbau kommt die Beregnungstechnik auch zum Zwecke der Beikrautregulierung in der Keimungsphase zum Einsatz. Dafür wird das Beikraut sowohl vor als auch nach der Möhrenaussaat bis kurz vor dem Auflaufen durch geringe Beregnungsgaben gezielt zum Auflaufen gebracht, um es anschließend mittels Abflammtchnik zu eliminieren. Entscheidend dafür ist die im Vergleich zur Möhre kürzere Keimzeit der meisten Beikräuter. Durch eine gezielte Beregnung in der Keimphase und anschließender Eliminierung des Beikrauts kann der Unkrautdruck in der Jungpflanzenphase der Möhre reduziert werden. Durch die Reduzierung des Aufwands für die kostenintensive Handjäte kann der Biolandwirt die Wirtschaftlichkeit steigern.

Während des Fruchtkörperwachstums dienen zusätzliche Beregnungsgaben der optimalen Entwicklung der Speicherwurzel. Hauptberegnungszeiten liegen für Frühmöhren im Juni und Juli mit Beregnungsgaben von insgesamt 60 - 80 mm (pro Saison), bei Spätmöhren dagegen im Juli und September mit Gaben von 80 - 120 mm (EGHBAL, 2017). Bei sandigen Böden werden öfters kleinere Beregnungsgaben auf die Fläche gebracht, während bei Böden mit einem höheren Anteil an Feinboden und damit einer besseren Wasserhaltekapazität seltener beregnet wird. LABER (2014) und KRUG (2002) weisen darauf hin, dass starke Beregnungsgaben während der Trockenheit aufgrund der Feuchteschwankungen im Boden die Fruchtkörper zum Platzen bringen und Beinigkeit begünstigen können. Daher werden mehrere verhaltene Wassergaben empfohlen.

Stand der Forschungen zur Beregnung

Die Beregnung von Dammkulturen in der gemäßigten Klimazone ist Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten. In England wurde untersucht, ob es Unterschiede zwischen natürlichem Regen und künstlicher Beregnung bei Kartoffeldämmen gab. ROBINSON (2009) stellt fest, dass das von einem Düsenwagen applizierte Wasser nicht von den Dämmen aufgenommen wurde und stattdessen über die Flanken in die Furchen floss, wo es infiltrierte. Hauptgrund lag im teils wasserabweisenden sandigen Boden. Dabei war das Wasserdefizit in der Dammkrone am größten und konnte nicht aufgefüllt werden. Während des Wachstums der Kartoffel stieg bedingt durch das umfangreiche Blattwerk die Transpirationsrate und verstärkte die Austrocknung des Damms. DYŚCO et al. (2007) untersuchten den Einfluss von Tropfbewässerung, Anbautechniken und Stickstoffdüngung auf die Ernte und Qualität von Möhren in Zentralpolen. Bei der Dammanbauvariante wurden die Tropfschläuche für die Unterflurbewässerung 5 cm tief mittig im Damm bzw. für die oberflächige Tropfbewässerung genau mittig auf der Dammkrone verlegt. Beide Bewässerungsvarianten führten zu einer höheren Bodenfeuchtigkeit und einer höheren Ernte, wobei diese bei der oberflächigen Methode auf der Dammkrone signifikant höher war. Er konnte außerdem zeigen, dass die Möhren auf Dämmen längere Wurzeln ausbildeten als beim flachen Anbau. Im Jahr 2000 veröffentlichte ROLBIECKI Untersuchungsergebnisse, für die er über mehrere Jahre hinweg den Einfluss von Überkopfberegnung auf unterschiedliche Gemüsesorten in Zentralpolen untersucht hatte. Insbesondere bei lockeren Böden war die Beregnung der wichtigste Anbaufaktor überhaupt. Den höchsten Effekt hatte die Beregnung bei Möhren im Vergleich zu anderen Gemüsen, wie Zwiebel, Kohl oder Zucchini. Der Anstieg des Ertrags aufgrund der Bewässerung (160 mm/ Saison) betrug in den Versuchen 200 %. Die Effizienz der Wassernutzung beim Möhrenanbau betrug 1,4 t Mehrertrag je 10 mm eingesetzter Wassergabe.

FINCH-SAVAGE et al. veröffentlichten 2001 Untersuchungsergebnisse, bei denen die Wirkung von variierenden Umweltfaktoren wie Bodentemperatur und Bodenwassergehalt in der obersten Bodenschicht beim Auflaufen von Möhren untersucht wurde. Aus den Daten wurde ein Modell mit einem Schwellenwert für Temperatur und Wasserpotential im Boden entwickelt, das insbesondere Vorhersagen für das Auflaufen der Saat in suboptimalen Bereichen ermöglicht. Für die Keimung von Saatgut, das dicht unter der Bodenoberfläche abgelegt wurde, ist eine ausreichende Bodenfeuchte eine Grundvoraussetzung. Gerade in der obersten Bodenschicht variiert die Bodenfeuchte enorm. Hinzu kommt, dass kleine Samen, wie die der Möhre, begrenzte Reserven und eine geringe Auflaufkraft haben (TAMET et al., 1996). MATSUBARA et al. stellt bereits 1965 nach Untersuchungen von Möhrensamen heraus, dass der kritische Bodenfeuchtegehalt für Möhren höher liegt als bei anderen Samen und führte das auf eine niedrigere Feuchteanziehungskraft der Möhrensamen zurück. Als sehr wichtig wurden in diesem Zusammenhang die Eigenschaften des umgebenden Bodens herausgestellt, der durch seine Wasserhaltekapazität und die Bodenwasserspannung maßgebend die Entwicklung des Keimlings und das weitere Wachstum beeinflussen. Auch beim anschließenden Wachstum der oberirdischen und unterirdischen Pflanzenteile der Möhre ist der Bodenwassergehalt ein begrenzender Faktor. PIETOLA (2000) untersuchte in Finnland die Auswirkungen von Überkopfberegnung, Bodenverdichtung und Stickstoffdüngung auf den Nährstoffgehalt der Möhre. Auch in diesen Versuchen zeigte sich, dass sich eine höhere Bodenfeuchte positiv auf das Wachstum auswirkt und die Nährstoffaufnahme unterstützt. Auf der anderen Seite führte die Beregnung in dieser Studie zu höheren Nitratgehalten in der Möhre, wobei der Gehalt in der frühen Wachstumsphase etwas höher war als der Gehalt in den erntereifen Möhren.

Aktuelle Forschung in Deutschland

Von 2012 bis 2016 förderte die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) das Modellvorhaben „Demonstrationsbetriebe zur Effizienzsteigerung der Bewässerungstechnik und des Bewässerungsmanagements im Freilandgemüsebau“, das die Hochschule Geisenheim in Kooperation mit der LK Niedersachsen und dem Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH) durchführte. Gegenstand war unter anderem eine in der Praxis getestete Tropfbewässerung für Frischmöhren im Dammanbau. Beim Formen des Damms wurde gleichzeitig ein Tropfschlauch in einer Tiefe von 3 – 5 cm abgelegt. Da Dammformung und Aussaat GPS-gesteuert waren, lag der Tropfschlauch genau mittig zwischen zwei Möhrenreihen. Beim Roden wurde der einjährige Schlauch mit aufgenommen. Er konnte allerdings nicht wiederverwendet werden, so dass pro Hektar 13,3 km Schlauchabfall anfielen. Zum Anregen des Auflaufs wurde zusätzlich ein Mikrosprinkler-System getestet. Dafür wurde ein Schlauch mit Anschlüssen (alle 10 m) in den Furchen zwischen den Dämmen ausgelegt. Darauf wurden dann Mikrosprinkler montiert, deren beregnete Flächen sich überlappten, so dass die gesamte Fläche gleichmäßig beregnet wurde. Nach Angaben von Herrn Meyer (LK Niedersachsen, mündliche Mitteilung vom 6.3.2018) ergaben wirtschaftliche Berechnungen Vorteile gegenüber der Düsenwagentechnik.

3 Entwicklung einer Dammkronenberechnung

In diesem Kapitel wird die Entwicklung einer Dammkronenberechnung beschrieben. Als erstes werden Prinzip sowie Wirkweise erläutert. Anschließend wird auf Prozesse und Faktoren bei der Berechnung eines einzelnen Damms eingegangen. Die daraus resultierenden Anforderungen an die Entwicklung sowie die einzelnen Entwicklungsschritte werden im Anschluss dargestellt. Im Mittelpunkt stehen die Konstruktion einer Führung für das Applikationssystem sowie die Auswahl geeigneter Applikatoren. In Labortests und bei Feldversuchen auf der Hessischen Staatsdomäne in Frankenhausen wurde die Dammkronenberechnung unter Praxisbedingungen beim Dammanbau von Möhren getestet. Eine Beschreibung der Feldversuche und ihrer Ergebnisse sowie weiterer Entwicklungspotentiale des Verfahrens schließen das Kapitel ab.

3.1 Problemstellung

Da Witterungsschwankungen im Zuge des Klimawandels wahrscheinlich zunehmen werden und es gerade im Frühjahr und Sommer öfters zu längeren Trockenphasen kommen kann (siehe Kap. 2.1.1), trägt eine zusätzliche Berechnung zur Risikominimierung bei. Insbesondere bei Kulturen, die auf dem Damm direkt ausgesät werden, ist ein gleichmäßiges Auflaufen in hohem Maße vom Bodenwassergehalt in der obersten Bodenschicht des Damms abhängig. Der Erfolg beim Auflaufen ist bei dicht unter der Dammkrone abgelegtem Saatgut, wie beispielsweise der Möhre, ausschlaggebend für den Bestandsschluss, die einheitliche Größe des Ernteguts und die Erntemengen (BENJAMIN, 1982; EVERS, 1997).

Dammkulturen werden bisher flächendeckend beregnet, wobei sowohl Dämme als auch Furchen gleichermaßen mit Wasser versorgt werden (siehe Kap. 2.2.2). Betrachtet man den Dammanbau genauer, wird das Wasser lediglich dort benötigt, wo die Kulturpflanzen wachsen: auf den Dämmen - und nicht in den Furchen. Eine Bewässerung der Dammfurchen zwischen den Dämmen durch Furchenbewässerung ist in der gemäßigten Klimazone wenig verbreitet. Tropfschläuche in Furchen oder Dämmen kommen vereinzelt zum Einsatz. Die häufigste Bewässerungspraxis im Dammanbau ist die Überkopf-Beregnung der gesamten Fläche. Eine streifenförmige Beregnung ausschließlich der Dammkrone war bisher nicht Gegenstand der Forschung. Im Folgenden soll untersucht werden, ob durch den schmalen Streifen der Dammkrone genügend Wasser aufgenommen werden kann, um den Bodenwasservorrat im durchwurzelten Bodenraum wirksam aufzufüllen. Basierend auf der Düsenwagentechnik soll ein Applikationsmodul entwickelt werden, welches das Wasser mittig und gleichförmig auf die Dammkrone appliziert. Es soll geklärt werden, ob mit der neuen streifenförmigen Beregnungsmethode für Dammkulturen im Vergleich zur flächendeckenden Beregnung Wasser eingespart werden kann.

3.2 Grundlagen zur Dammkronenberegnung

Bei der zu entwickelnden Dammkronenberegnung wird lediglich die Dammkrone streifenförmig in Längsrichtung der Dämme beregnet, während die Furchen sowie die Dammfanken ausgespart bleiben (siehe Abb. 7). Ziel ist eine mittige und gleichförmige Benetzung der Dammkrone und eine Durchfeuchtung des Dammkörpers von oben.

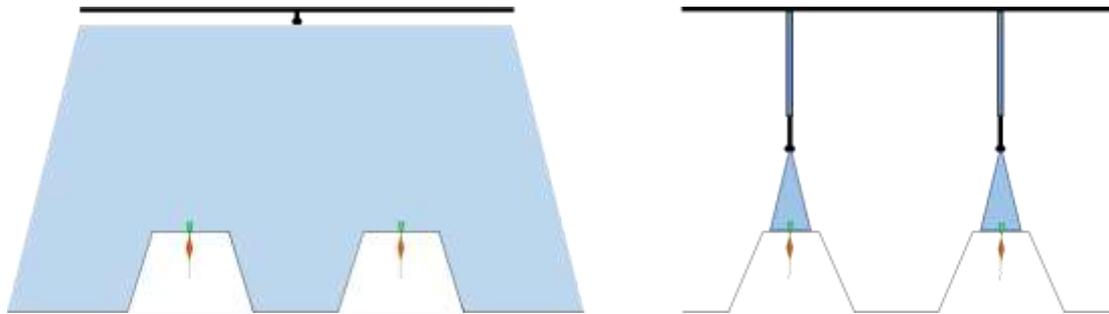


Abb. 7: Flächendeckende Beregnung (Bild links) versus streifenförmige Beregnung der Dammkronen (Bild rechts) [eigene Darstellung]

Die Dammkronenberegnung bietet gegenüber der flächendeckenden Beregnung Vorteile. Durch die Reduzierung der zu beregnenden Fläche auf $\frac{1}{3}$ (bei einer Dammkronenbreite von 25 cm und einem Reihenabstand zwischen den Dämmen von 75 cm) kann Wasser eingespart werden. Die Dammfanken bleiben trocken, wodurch die Bodenerosion durch oberflächlich abfließendes Wasser verringert wird. Durch das Trockenhalten der Furchen ist das Feld sofort nach der Beregnung wieder befahrbar, beispielsweise zur Bestandspflege. Wiederkeimende Beikräuter haben in trockenen Furchen und Dammfanken schwierigere Auflauf- und Wachstumsbedingungen, was zu einem reduzierten Pflegeaufwand führen kann.

Während der Dammkronenberegnung trifft das Wasser von oben auf die Dammkrone, die streifenförmig benetzt wird. Wasser sickert durch die Dammkrone in den Dammkörper und damit in den Wurzelraum der Kulturpflanzen. Während der ersten Entwicklungsphasen bei direkt gesäten Kulturen liegt der durchwurzelte Raum bei wenigen Zentimetern Tiefe und nimmt im Laufe der Bestandsentwicklung zu. Die zu befeuchtende Schicht im Damm beträgt beispielsweise bei der Möhre vor bzw. nach der Aussaat zunächst 3 - 5 cm und dehnt sich in den ersten Wochen bis in eine Tiefe von ca. 10 – 15 cm aus (siehe Kap. 2.2.3). Als zu befeuchtender Wurzelraum bzw. Dammbereich wurde daher halbrunder Bereich in der oberen Hälfte des Dammkörpers direkt unter der Dammkrone definiert (siehe Abb. 8).

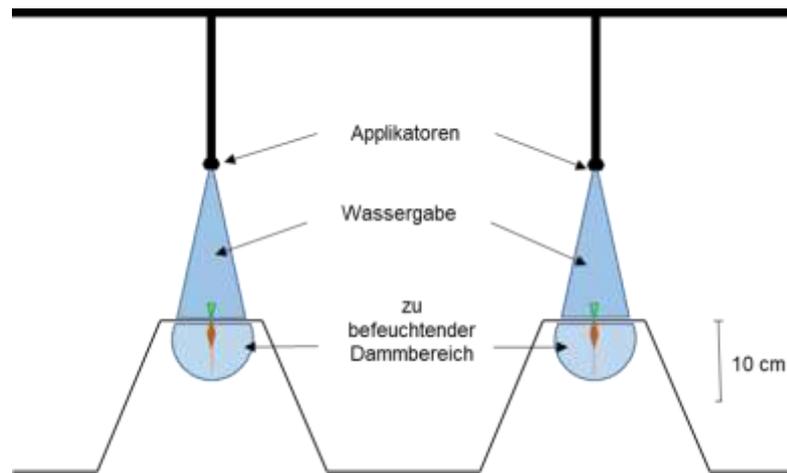


Abb. 8: Schematische Darstellung der Dammkronenberegnung mit Lage des zu befeuchtenden Dammbereichs [eigene Darstellung]

Durch die Auffüllung des Bodenwasserspeichers in diesem Bereich wird eine ausreichende Wasserversorgung in der Keim- und Jugendphase gewährleistet. Gleichzeitig soll eine Überberegnung durch zu hohe Wassergaben vermieden werden, da dadurch Wasser unterhalb des durchwurzeltten Bodenraums versickern kann. Die Durchfeuchtung des durchwurzeltten Bodenraums im Dammkörpers mittels Dammkronenberegnung wird unter Berücksichtigung boden- und pflanzenbaulicher Parameter maßgeblich durch die Wasseraufnahme über die Dammkrone bestimmt. Die Wassermenge kann durch die Höhe der Wassergabe in Abhängigkeit von der Verweilzeit der Applikatoren über einem Dammschnitt reguliert werden.

3.2.1 Prozesse und Einflussfaktoren

Beim Auftreffen der Tropfen (Regen, Beregnung) auf die Bodenoberfläche eines Damms spielen für die Wasseraufnahme und -speicherung unterschiedliche Faktoren und Prozesse eine Rolle.

Tab. 6: Die Wasseraufnahme beeinflussende Prozesse und Faktoren [eigene Darstellung]

Beeinflussende Prozesse	Beeinflussende Faktoren
Plantsch	Größe der Tropfen und ihre kinetische Energie, Struktur und Zustand des Bodens, Rauigkeit der Bodenoberfläche und Bodenbedeckung
Infiltration	Gesamtporengehalt im Boden und Porenverteilung, Ausgangsbodenfeuchte und Wasserhaltevermögen des Bodens, hydraulische Leitfähigkeit und Infiltrationsrate, benetzungshemmende Eigenschaft des Bodens, Anteil organischer Substanz im Boden und Bodenbedeckung
Oberflächenabfluss	Ausgangsbodenwassergehalt, Infiltrationsrate, Ponding der Oberfläche, vorhandene Verschlammung und Verkrustung, Wassermenge und Kontaktzeit
Verschlammung	Tropfenaufprall und Splash-Erosion, Bodentyp und Bodenstruktur, Oberflächenabfluss
Entwicklung der Bestandsdichte	Pflanzenwachstum und Transpiration, Bodentyp, Bodenfeuchte Bodentemperatur, Nährstoffgehalt

In Tabelle 6 wurden einzelnen Prozessen relevante Faktoren zugeordnet: Platsch/Erosion beim Auftreffen der Tropfen, Infiltration, Oberflächenabfluss und Verschlammung. Auch die Entwicklung der Bestandsdichte und die Änderung des Bedeckungsgrades auf der Dammoberfläche beeinflussen Wasseraufnahme und Wasserabgabe (Evaporation, Transpiration). Der Zustand des Bodens nach der Bodenbearbeitung sowie die Bodenstruktur, der Anteil an organischer Substanz und das Wasserhaltevermögen eines Bodens sind ebenfalls wichtige Einflussfaktoren. Die Ausgangsbodenfeuchte beeinflusst die Benetzung und Wasseraufnahme des Bodens.

Trifft natürlicher Regen auf einen Damm, wird das Wasser von oben durch die Dammkrone und von der Seite durch die Dammlanken aufgenommen. Das Wasser dringt von außen in das Innere des Damms, den Dammkern, vor. Auch die Furchen zwischen den Dämmen nehmen Wasser auf. Trifft mehr Wasser auf den Damm, als aufgenommen werden kann, fließt es in die Furchen. Anders bei der Dammkronenberegnung: das applizierte Wasser wird ausschließlich durch die Dammkrone aufgenommen und infiltriert vertikal und lateral in tiefere Schichten im Dammkörper. Trifft mehr Wasser auf die Dammkrone, als von ihr aufgenommen werden kann (z. B. durch hohe Beregnungsgaben), kann es zu Oberflächenabfluss von der Dammkrone in die Dammfurche kommen (siehe Abb. 9). Die Oberfläche der Dammkrone ist bei zur Verschlammung neigenden Böden durch Krustenbildung gefährdet. Das ist insbesondere dann der Fall, wenn der Bewuchs in Abhängigkeit vom Bedeckungsgrad oder der Bestandsdichte gering ist und die Bodenoberfläche direkt den aufprallenden Tropfen ausgesetzt ist.

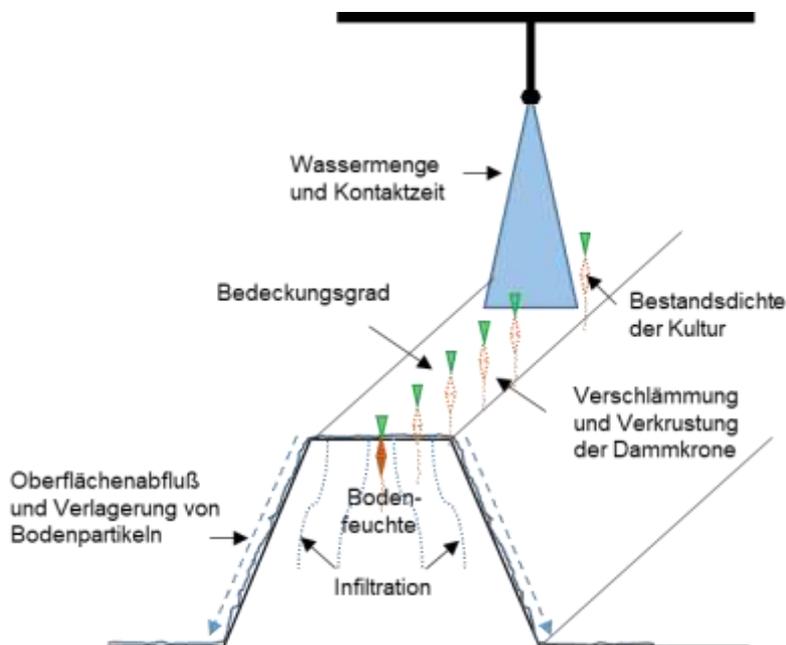


Abb. 9: Einflussfaktoren und Prozessgrößen beim Auftreffen einer Wassergabe auf die Dammkrone [eigene Darstellung]

3.2.2 Anforderungen und Entwicklungsschritte

Bei der Dammkronenberegnung soll Wasser in Tropfen ähnlich einem natürlichen, leichten bis mittleren Regen mittels geeigneter Applikatoren auf die Dammkrone appliziert werden. Bei mittleren Regen liegt die Niederschlagsintensität NI bei $10 \text{ mm h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ und die Tropfengröße bei einem Durchmesser zwischen 1 und 3 mm. Idealerweise werden ähnliche Größen bei der Dammkronenberegnung angestrebt. Sowohl seitens der Technik als auch des Bodens und der Pflanzen treffen unterschiedliche Anforderungen bei der Auswahl geeigneter Applikatoren aufeinander (siehe Tab. 7). Die technischen Anforderungen ergeben sich aus den Randbedingungen des Forschungsprojektes. Demnach soll die Lösung auf der Düsenwagentechnik bestehen, wobei eine Mehrfachnutzung des Düsenwagens angestrebt wird.

Tab. 7: Anforderungen an die Applikation bei der Dammkronenberegnung [eigene Darstellung]

Anforderungen an die Wasserapplikation		
Technik	Boden	Kulturpflanze
möglichst geringer Abstand zwischen Applikator und Boden für eine hohe Zielgenauigkeit auf die Mitte der Dammkrone	möglichst feine Tropfen zur Reduzierung der Verschlammungsgefahr	möglichst feine Tropfen, um Keimblätter im Auflaufstadium zu schützen
möglichst hohe Geschwindigkeit des Düsenwagens für hohe Flächenleistung	möglichst geringe Fallhöhe, um Planschwirkung der Tropfen entgegenzuwirken	möglichst geringe Fallhöhe zur Minimierung der Tropfenenergie beim Aufschlag auf die Keimblätter
möglichst geringer Durchfluss mit großer Benetzungsfläche für niedrige Beregnungsintensitäten	möglichst kleine Wassergaben, um Oberflächenabfluss und Bodenabtrag zu minimieren	möglichst angepasste Wassergaben, die an den aktuellen Pflanzenbedarf und an das Entwicklungsstadium angepasst sind
möglichst geringes Gewicht des Applikationssystems, da Gewichtsbelastung der Konstruktion der Ausleger begrenzt ist	möglichst mehrere kleine Wassergaben über eine längere Zeit für eine effektive Wasseraufnahme und Speicherung im Boden	
möglichst einfache Handhabung bei Montage und Umsetzen der Beregnungstechnik und deren Wartung		

Dabei treffen teils gegensätzliche Anforderungen aufeinander. In Bezug auf die Tropfengröße gilt es beispielsweise, einen Kompromiss zu finden. Aus Sicht der Jungpflanzen und aufgrund des Bodenschutzes sind möglichst feine Tropfengrößen erstrebenswert. Mit sinkendem Tropfendurchmesser steigt wiederum das Risiko für Abdrift durch Wind. Ziel der streifenförmigen Dammkronenberegnung ist jedoch eine sehr genaue Applikation mittig auf die Dammkrone. Das schließt feine Tropfen $< 0,1 \text{ mm}$ aus, da diese ein zu hohes Abdriftpotential aufweisen. Ein geringer Abstand zwischen Applikator und Bodenoberfläche der Dammkrone erhöht die Zielgenauigkeit. Ein zu dichter Abstand zwischen Düse und Boden verhindert allerdings ein ideales Spritzbild und schränkt die Tropfenbildung der Düse ein.

Die Entwicklung der Dammkronenberegnung gliederte sich in folgende Entwicklungsschritte, die teilweise parallel verliefen oder sich überschnitten:

- (1) Untersuchungen der Dammeigenschaften in Bezug auf Wasser- und Bodenverhältnisse
- (2) Erarbeitung einer Anforderungsliste für das Applikationssystem
- (3) Identifizierung geeigneter Messinstrumente zur Beschreibung der Messgrößen
- (4) Auswahl geeigneter Applikatoren für die Wassergabe sowie Entwicklung und Konstruktion eines Führungssystems

3.3 Design eines Applikationssystems mit Führung am Damm

Mit dem Applikationssystem soll Wasser vom wasserführenden Rohr des Düsenwagensauslegers, der beispielsweise bei einer Breite von 50 m insgesamt 66 Dämme überspannt, auf jede einzelne Dammkrone mittig appliziert werden. Dafür wurde je eine Schelle mit Schieber und Anschluss einer GK-Kupplung im Abstand von 75 cm am Rohr des Düsenwagensauslegers so angebracht, dass sich diese mittig über der Dammkrone befinden. Über einen flexiblen PE-Schlauch gelangt das Wasser in einen Druckminderer, um einen exakten Druck an den Düsen zu gewährleisten. Dieser ist für die einwandfreie Funktion der Applikatoren und die Ausbildung eines idealen Spritzbildes bzw. der idealen Tropfengröße notwendig. An den Druckminderer wurde ein PE-Rohr montiert, an dessen Ende sich ein Applikator (z.B. Düse, Gießkopf) befindet. In Abbildung 10 geht aus der schematischen Darstellung hervor. Über jedem Damm ist am Ausleger des Düsenwagens ein Applikationssystem positioniert worden.

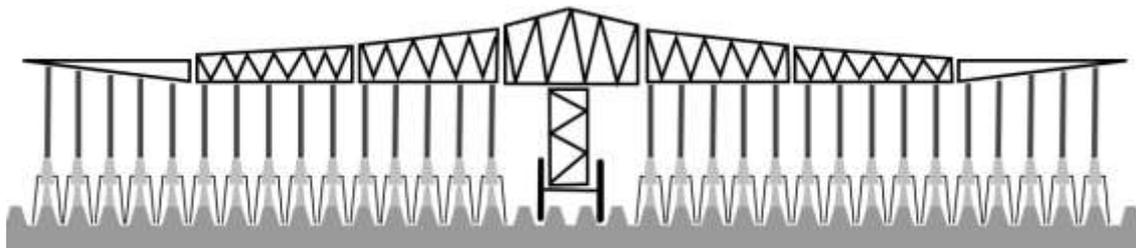


Abb. 10: Schematische Darstellung eines Düsenwagens mit über jeden Damm einzeln montierten Applikationssystemen an den Auslegern [eigene Darstellung]

In Tests zeigte sich, dass ohne eine Führung des Applikationssystems keine mittige Wassergabe auf die Dammkrone zuverlässig erzielt werden kann. Grund dafür waren Unebenheiten und Neigungen im Gelände, die zu einer Abweichung von der Idealspur des Düsenwagens von bis zu 10 cm führte. Zusätzlich wurden die PE-Schläuche mit den Applikatoren durch Wind zur Seite gedrückt, so dass im ungünstigsten Fall die Wassergabe nicht den Damm, sondern die Furche traf. Mit Hilfe einer auf einem mechanischen Prinzip basierenden Führung sollte die Positionierung des Applikationssystems über der Dammkrone sichergestellt werden. Damit sollte eine mittige und gleichförmige Beregnung der Dammkrone gewährleistet werden. Die Entwicklung der Führung für das Applikationssystem war ein mehrstufiger, fortlaufender Prozess, der sich mit der Auswahl und dem Test geeigneter Applikatoren teilweise überschneidet.

Führungskonzepte am Damm

Bei der Entwicklung der Dammführung wurden zunächst einfache Führungskonzepte im Labor getestet. Aufgrund von teils unzureichender Funktionalität bei Praxistests mit dem Düsenwagen auf dem Feld wurde das Führungskonzept während der gesamten Projektlaufzeit weiterentwickelt und verbessert. In Abbildung 11 sind die einzelnen Entwicklungsstufen des Führungskonzeptes dargestellt.

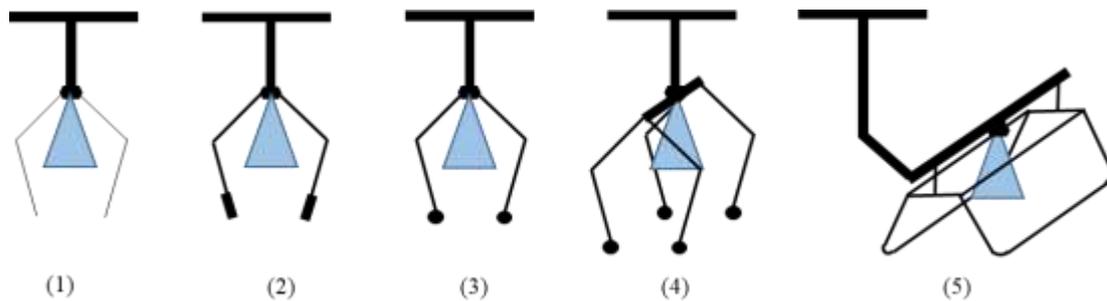


Abb. 11: Entwicklungsstufen der Dammkronenföhrung (1) Drahtarme, (2) Führungsarme aus Stahlrohr mit Streichblechen, (3) Führungsarme mit Bällen, (4) Doppelarmkonstruktion mit Bällen, (5) Dammschlitten [eigene Darstellung]

Als erstes wurde ein Draht ($\varnothing 4 \text{ mm}$) so gebogen, dass an beiden Dammlanken je ein Greifarm aufsetzte und den Applikator föhrte (1). Sowohl im Labor- als auch im Feldtest konnten die Greifarme nicht die entstehenden Bewegungen des Applikators ausbalancieren, so dass er in alle Richtungen ausschwenkte. In einem zweiten Schritt wurde der Draht der Greifarme durch Stahlrohr ($\varnothing 12 \text{ mm}$) ersetzt, um die Führungsarme zu verstärken. An deren Ende wurde je ein Streichblech (2) geschweißt, das entlang der Dammlanke strich. Beim Praxistest zeigte sich, dass die Führungsarme aus Stahlrohr die seitlichen Schwankungen verringerten. Die Bewegung in Dammrichtung verlief nach wie vor ruckelnd, so dass die Wassergabe in Längsrichtung nicht gleichförmig erfolgte. Bei Unebenheiten an den Dammlanken, wie Steinen oder Wurzelresten, kam es zur Verdrehung des Applikationssystems, so dass es nicht mehr mittig applizierte. Daher wurden die Streichbleche durch fest montierte Hartgummi-Bälle (3) ersetzt. Diese haben eine geringere Auflagefläche, wodurch die Reibungskräfte zwischen dem Material und dem Boden reduziert wurden. Auch diese Konstruktion hakte immer wieder, so dass keine zufriedenstellende Gleichförmigkeit bei der Wassergabe in Längsrichtung zustande kam. Um das Ruckeln zu reduzieren, wurde ein Gestell bestehend aus zwei Paar Führungsarmen (4) konstruiert und an den Auflagepunkten ebenfalls mit Bällen bestückt. Dies föhrte zu weniger Ruckeln, jedoch nahmen die seitlichen Schwankungen zu, da sich die vorderen und hinteren Führungsarme teilweise gegeneinander verdrehten. Im nächsten Schritt wurde ein Gestell aus Stahlrohr ($\varnothing 8 \text{ mm}$) konstruiert, bei dem die hintereinanderliegenden Auflagepunkte beider Dammlankenseiten miteinander verbunden wurden. Diese Konstruktion greift die trapezförmige Dammgeometrie auf. Ein Verdrehen bzw. seitliche Abweichungen von der mittigen Position über der Dammkrone sind bei dieser Konstruktion minimal, das Ruckeln verringerte sich erheblich. Diese schlittenähnliche Konstruktion (5) gleitet auf dem Damm und wird im Folgenden als Dammschlitten bezeichnet.

Auswahl geeigneter Applikatoren

Entsprechend der zusammengestellten Anforderungsliste (siehe Tab. 7) wurden verschiedene Applikatoren ausgewählt, getestet und modifiziert: Gießköpfe, Düsen und eine neu entwickelte Tropfschiene. Auswahlkriterien waren ein geringer Durchfluss und ein Spritzbild, welches ausgehend von einer Montagehöhe von ca. 40 cm des Applikators einen maximal 20 cm breiten beregneten Streifen mittig auf der Dammkrone hinterlässt. Die Tropfengröße sollte dabei zwischen 150 – 350 µm (feiner und mittlerer Tropfenbereich) liegen. Bei sehr feinen Tropfen (< 150 µm) besteht Abdriftgefahr durch Wind, bei gröberen Tropfen ist der Splash-Effekt und damit die Gefahr der Schädigung der Bodenoberfläche zu hoch.

Die Tropfschiene stellt eine Kombination von Mikrobewässerung und mobiler Beregnung dar. Sie besteht aus einem Schlauch mit Tropfern (siehe Abb. 12, Bild links), wobei der Durchfluss von 2 l h^{-1} pro Tropfer durch deren Anzahl variabel einstellbar ist. Der Schlauch mit den Tropfern ist an einer 8 m langen Leichtmetallschiene (siehe Abb. 12, Bild in der Mitte) befestigt, die über ein Halterungssystem mit den Düsenwagenauslegern verbunden ist. Die Tropfschiene arbeitet mit einem Druck von 1,4 bar. Durch die Größe der Tropfen von ca. $\text{Ø } 5 \text{ mm}$ ist die Gefahr der Abdrift minimal. Beim Feldversuch 2013 erzielte die Tropfschiene eine hohe Applikationsgenauigkeit. Die berechnete mittlere Beregnungsintensität ($100 \text{ l m}^2\text{h}^{-1}$) mit einem theoretischen Bezugszeitraum von einer Stunde lag im Vergleich zum Gießkopf ($17.000 \text{ l m}^2\text{h}^{-1}$, runder Auslassquerschnitt) um ein Vielfaches niedriger (HÖING, 2013). Die Aufprallenergie der Tropfen führte jedoch durch Plansch zu einer Schädigung der Bodenoberfläche der Dammkrone. Das zeigte sich durch weißen Schaum (siehe Abb. 12, Bild rechts) als Folge der Herauslösung von organischem Material sowie durch feines, auf der verschlammten Oberfläche liegendes Bodenmaterial nach Abtrocknung.



Abb. 12: Tropfer an einer Tropfschiene (Bild links), Tropfschiene mit Führungsarmen bei der Dammkronenberegnung (Bild in der Mitte), Schaumbildung auf der Dammkrone (Bild rechts) [Fotos D.Schwarz]

Gießköpfe sind günstig in der Beschaffung und werden aus leichten Materialien, wie Aluminium und Kunststoff hergestellt. Sie zeichnen sich durch einen relativ hohen Durchfluss, eine kleine kreisförmige Auslass- bzw. Benetzungsfläche und eine damit verbundene relativ hohe Beregnungsintensität aus. Durch unterschiedliche Lochdurchmesser sind verschiedene Tropfengrößen möglich, wobei die Wasserverteilung relativ gleichförmig ist. Bei Labor- und Feldversuchen unter Praxisbedingungen floss bei allen getesteten Gießköpfen das Wasser oberflächlich von der Dammkrone in die Dammfurche. Daraufhin wurde beim verwendeten Modell der Auslassquerschnitt des Gießkopfs reduziert (siehe Abb. 13, linkes Bild). Dadurch reduzierte sich der Durchfluss von 12 l min^{-1} (720 l h^{-1}) auf $5,5 \text{ l min}^{-1}$ (330 l h^{-1}). Der Gießkopf wurde beim Feldversuch 2014 so gedreht, dass die Aussparung in Längsrichtung zeigte (siehe Abb. 13, Bild in der Mitte). Somit konnte die Dammkrone mittig beregnet werden, während die Dammlanken weitestgehend trocken blieben.



Abb. 13: Sicht auf den reduzierten Auslassquerschnitt eines Gießkopfs (Bild links), beim Test am Düsenwagen (Bild in der Mitte), Düse SprayMax® bei der Beregnung der Dammkrone (Bild rechts) [Fotos D. Schwarz]

Im Labor und anschließend im Feld wurden unterschiedliche Düsentypen getestet. Die Nebeldüse wird für die Jungpflanzenaufzucht in Gewächshäusern genutzt. Aus drei Auslässen gibt sie je einen Nebeltropfenstrahl mit sehr feinen Tropfen ab. Während die Nebeldüse in Labortests gute Ergebnisse erzielte, erwies sie sich im Feldversuch 2013 als ungeeignet. Die feinen Tropfen waren sehr anfällig für Abdrift und drangen lediglich in die oberste Bodenschicht (ca. 1 cm) der Dammoberfläche ein. Die Beregnungsintensität betrug $600 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ auf einen Bezugszeitraum von einer Stunde (HÖING, 2013). Anschließend wurden Düsen aus der Spritztechnik, wie Fächerdüsen, Hohlkegel- sowie doppelte und einfache Flachstrahldüsen getestet. Spritzdüsen haben im Vergleich zu Gießköpfen einen geringeren Durchfluss. In Labor- und Feldtests 2014 schnitt die Düse SprayMax® der Firma Agrotop (siehe Abb. 13, Bild rechts) im Vergleich zu anderen Applikatoren in Bezug auf die Genauigkeit und Gleichförmigkeit der Wasserverteilung auf der Dammkrone am besten ab. Die Düse SprayMax® ist eine Flachstrahldüse mit einem Spritzwinkel von 110° . Die Düse wurde bei den Tests längs zum Damm ausgerichtet, um einen ca. 15 cm breiten Wasserstrahl mittig auf der Dammkrone zu positionieren. Die Montagehöhe betrug ca. 35 cm über der Dammkrone. Bei einem Druck von 1,4 bar wurde ein Durchfluss von $2,2 \text{ l min}^{-1}$ gemessen und eine Beregnungsintensität von $660 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ mit einem theoretischen Bezugszeitraum von einer Stunde berechnet.

3.4 Material und Methoden der Feldversuche

Um die Arbeits- und Wirkweise der Dammkronenberegnung in einem Feldversuch zu testen, wurden die ausgewählten Applikatoren mit dem Applikationssystem an den Düsenwagen angeschlossen. Im Folgenden werden zwei Feldtests beschrieben, die in den Vegetationsperioden 2013 und 2014 auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen unter Praxisbedingungen durchgeführt wurden.

3.4.1 Standort

Die Hessische Staatsdomäne Frankenhausen ist der Versuchsbetrieb der Universität Kassel und wird seit 1998 nach Richtlinien der ökologischen Landwirtschaft bewirtschaftet. Der Betrieb liegt 10 km nördlich von Kassel in der Hofgeismarer Rötenske. Ein Sechstel der 321 ha umfassenden Betriebsfläche wird als Grünland bewirtschaftet, fünf Sechstel als Ackerland. Beim Bodentyp handelt es sich um Parabraunerde, bei der Bodenart um mittel tonigen Schluff. Die Korngrößenanalyse ergab folgende Verteilung: 16 % Ton, 82 % Schluff und 2 % Sand. Der k_f -Wert lag im Ap-Horizont bei 3650 cm d^{-1} (BRANDT et al., 2001).

Die mittlere Jahrestemperatur beträgt $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$ und die durchschnittliche Niederschlagsmenge 650 mm im Jahr. Die Verteilung der Monatstemperaturen und Niederschläge am Standort ist beispielhaft für das Jahr 2014 in Abbildung 14 dargestellt.

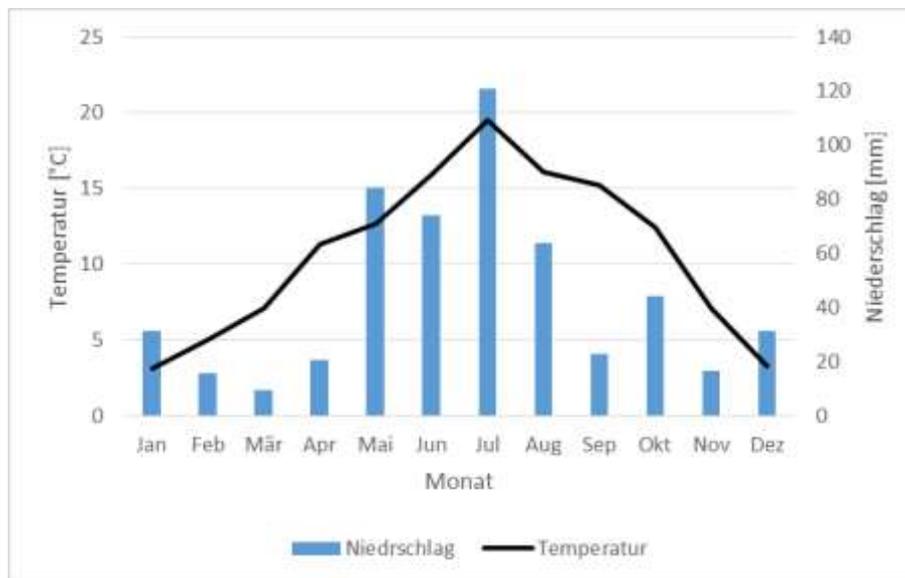


Abb. 14: Klimadiagramm 2014, Wetterstation Frankenhausen [eigene Darstellung, nach Daten des LLH, 2015]

Die Feldtests fanden 2013 auf dem Schlag „Kleines Feld“ und 2014 auf dem Schlag „Holzbeck II“ statt. Auf beiden wurden Möhren (in den Roderassen Rote Bete) in Dammkultur angebaut, mit Kartoffel als Vorfrucht. Die Möhren wurden jeweils im Mai ausgesät. Die Dammkultur wurde gehackt und gehäufelt, die Dammkrone vor dem Auflaufen der Möhre abgeflammt und danach in Handjäte bis Bestandsschluss von Beikraut freigehalten.

3.4.2 Versuchsaufbau und Datenerhebung Feldversuch 2013

Beim Feldtest in der Vegetationsperiode 2013 wurde die Wirkung der Beregnung der Dammkrone durch drei unterschiedliche Applikatoren mit einer nicht beregneten Variante (Damm 1) sowie einer natürlichen Regen simulierenden Variante (Damm 5) verglichen (siehe Abb. 15). Dabei kamen eine Tropfschiene (Damm 2), eine Nebeldüse (Damm 3) und ein Gießkopf (Damm 4) zum Einsatz. Durch die Messung der Bodenfeuchte konnte die Verteilung der Bodenfeuchte im Damm sowie die Änderungen der Bodenfeuchte nach der Beregnung beschrieben werden. Der Variantenvergleich wurde zum einen über das Verteilungsmuster der Bodenfeuchte im Dammprofil sowie über die absoluten Werte der Bodenfeuchte [Vol. %] in der Dammkrone durchgeführt.

Die Höhe der Beregnungsgabe auf die Dammkrone betrug auf den Dämmen 2, 3 und 4 jeweils 20 mm (Wassergabe). Bei der Nullvariante wurde nicht beregnet. Bei der Variante mit der Rotatordüse wurden ebenfalls 20 mm beregnet. Dabei wurde das Wasser nicht nur auf die Dammkrone, sondern auf den gesamten Damm und die Dammfurchen appliziert.

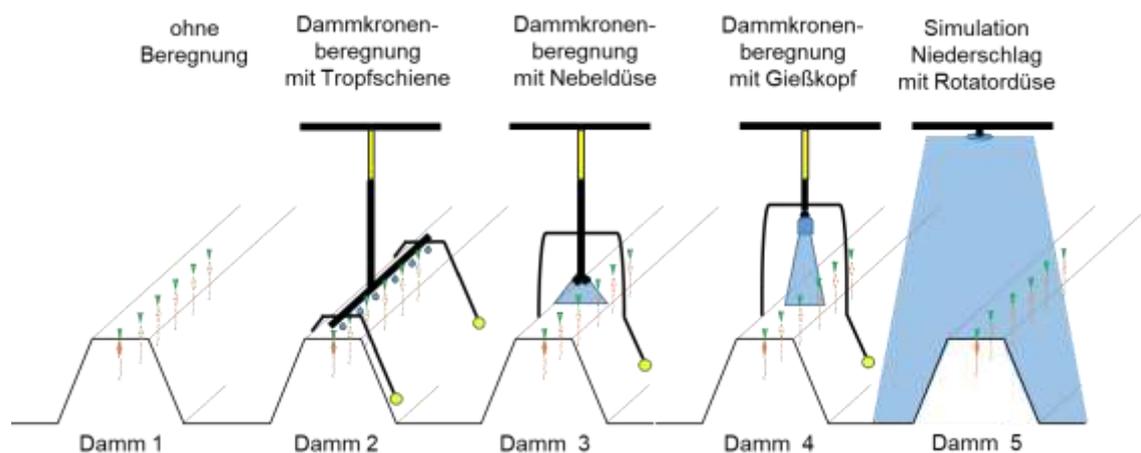


Abb. 15: Versuchsdämme mit Beregnungsvarianten 2013 mit drei Varianten der Dammkronenberegnung (Damm 2 mit Tropfschiene, Damm 3 mit Nebeldüse, Damm 4 mit Gießkopf), einer Nullvariante (Damm 1) und einer Niederschlagssimulation (Damm 5) [eigene Darstellung]

Direkt nach der Beregnung (bei der Nullvariante ohne) wurden pro Damm sechs Querprofile freigelegt. An diesen wurde die Handsonde zur Messung der Bodenfeuchte horizontal an vorgegebenen Messpunkten eingeführt. In der obersten Dammschicht (0 – 10 cm Tiefe) befanden sich drei Messpositionen, in der mittleren Schicht (10 – 20 cm Tiefe) vier und in der untersten Schicht im Dammkörper (20 – 30 cm Tiefe) fünf Messpunkte. Insgesamt wurden bei jedem Profil zwölf Messpunkte aufgenommen (siehe Abb. 16).

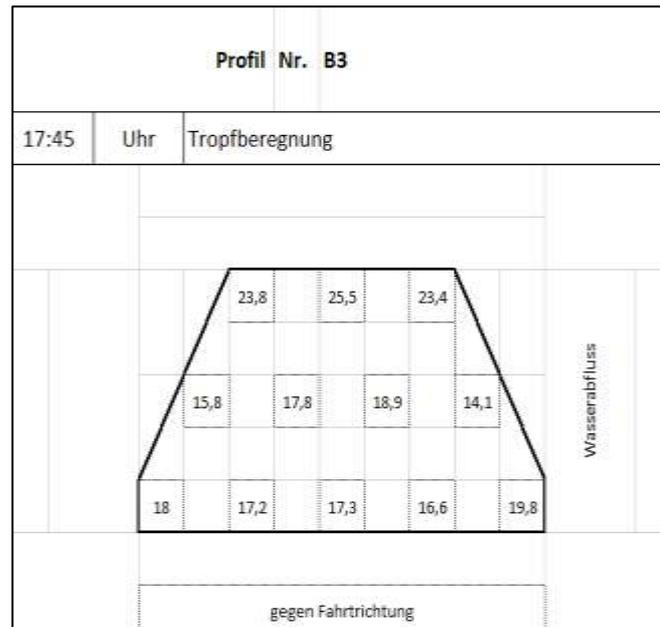


Abb. 16: Messschema mit 12 Messpunkten zur Messung der Bodenfeuchte bei Dammprofilen [eigene Darstellung]

Der Verlauf der Bodenfeuchte wurde über einen Zeitraum von sechs Tagen erhoben. Die erste Messung fand direkt nach der Beregnung statt (bei Damm 0 zeitgleich ohne Beregnung). Weitere Messungen wurden zwei und sechs Tage später wiederholt, wobei für jede Messung neue Profile ausgehoben wurden. Bei fünf Varianten wurden pro Messung 30 Profile aufgenommen, mit beiden Messwiederholungen insgesamt 90 Profile.

Messdatenerhebung und -verarbeitung

Für die Erhebung der Bodenfeuchte wurde die Sonde ML3 Theta Probe der Firma Delta-T Devices genutzt. Die ML3 wurde als mobiler Sensor über das Moisture Meter – HH2 betrieben. Die Sonde gibt die Bodenfeuchte als Spannungssignal aus ($0 \dots 1,0 \text{ V} \approx 0 \dots \text{Vol. } 60\%$). Sie bestimmt die Bodenfeuchte über die Permittivität (Dielektrizitätszahl, ϵ_r) des Bodens. Die Länge der Sensoren beträgt 6 cm und die vom Gerätehersteller benannte Genauigkeit liegt bei $\pm 1 \text{ Vol. } \%$. Für die Darstellung der Ergebnisse in Abbildung 21 wurden die jeweiligen Mittelwerte der gemessenen Bodenfeuchte [Vol. %] über sechs Profilerhebungen einer Variante für jeden der 12 Profilmesspunkte gebildet. Anschließend wurden die Werte einer siebenstufigen Skala zugeordnet, wobei eine Stufe 5 Vol. % umfasste. Orange stellt die trockeneren und blau die feuchteren Dammbereiche dar.

3.4.3 Versuchsaufbau und Datenerhebung Feldversuch 2014

Im Feldversuch 2014 wurde die Verteilgenauigkeit der Wasserapplikation auf die Dammkrone sowie die Durchfeuchtung der obersten Bodenschicht der Dammkrone untersucht. Bei der Dammkronenberegung kamen zwei Applikatoren zum Einsatz, die hinsichtlich ihrer Eignung getestet wurden: die Düse SprayMax® und ein Gießkopf, dessen Auslassquerschnitt um 2/3 reduziert war (siehe Abb. 17). Zur Unterscheidung des in 2013 verwendeten Gießkopfs wird dieser folgend als Gießkopf (red.) bezeichnet

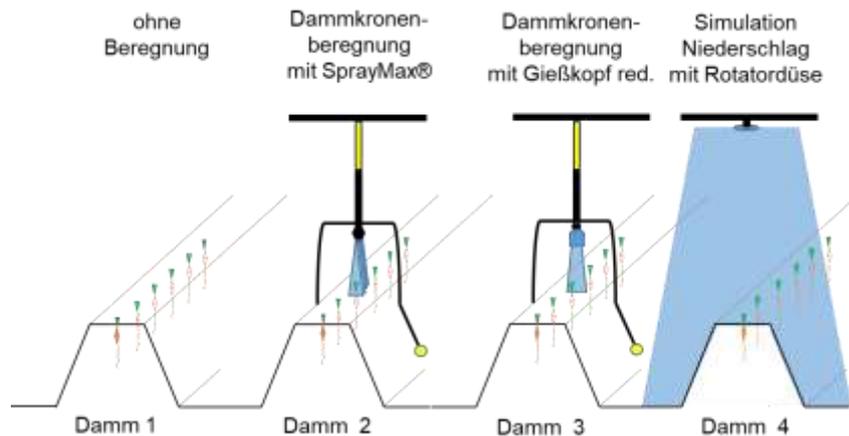


Abb. 17: Versuchsdämme mit Beregnungsvarianten beim Feldversuch 2014 mit zwei optimierten Varianten der Dammkronenberegung (Damm 2 mit Düse Spraymax®, Damm 3 mit Gießkopf/reduzierter Querschnitt), einer Nullvariante (Damm 1) und einer Niederschlagssimulation (Damm 5) [eigene Darstellung]

Beide Applikatoren wurden so gedreht, dass sie in Längsrichtung des Damms einen ca. 15 cm breiten Streifen Wasser mittig auf die Dammkrone applizieren. Als Referenz zur Dammkronenberegung wurde eine Nullvariante ohne Beregnung (Damm 1) und eine flächendeckende Beregnung (Damm 4) für die Bewertung der Ergebnisse herangezogen. Anhand der aufgefangenen Wassermengen und der gemessenen Bodenfeuchte [Vol. %] auf der Dammkrone wurden die Applikatoren untereinander bzw. mit der flächendeckenden Beregnung sowie mit der Nullvariante verglichen.

Beim Feldversuch 2014 fanden drei Überfahrten (Ü1, Ü2, Ü3) statt. Die Höhe der Beregnungsgabe betrug bei jeder Überfahrt je 9 mm (Wassergabe) und lag damit niedriger als die Wassergabe beim Feldversuch 2013 (20 mm). Neben der Verteilgenauigkeit wurde untersucht, wie sich geringe Wassergaben auf die Wasseraufnahme und das Wasserhaltevermögen in den obersten 6 cm (entspricht der Messtiefe der Bodensonde) des Damms auswirkten.

Messdatenerhebung und -verarbeitung

Für die Messung der Verteilgenauigkeit wurden neun Regenmesser wie in Abbildung 18 auf den Dämmen 2, 3 und 4 aufgestellt: drei Regenmesser auf der Dammkrone (1 - 3) und sechs in der Dammfurche (4 – 9). Die aufgefangenen Wassermengen wurden gemessen.

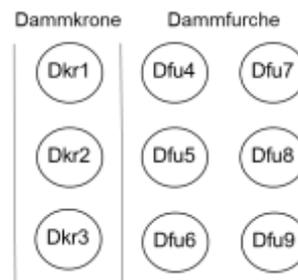


Abb. 18: Regenmesser im Feld (links) und Messschema Regenmesser (rechts) mit Dkr1 - Dkr3 für Messungen auf der Dammkrone und Dfu4 – Dfu9 für Messungen in der Dammfurche; Abstand zwischen den Regenmessern 25 cm (von Mittelpunkt zu Mittelpunkt) [Foto links D. Schwarz, eigene Darstellung rechts, nach eigener Methodik]

Bei der Messung der Bodenfeuchte kam ebenfalls die ML3 Theta Probe zum Einsatz. An randomisiert ausgewählten Stellen in einem 50 m langen Messabschnitt wurden je 20 Messungen durchgeführt, indem die Sonde senkrecht mit den 6 cm langen Nadeln in die Mitte der Dammkrone gesteckt wurde. Die Messungen fanden vor der Beregnung, im Anschluss an die Beregnung sowie einen Tag und drei Tage später statt, so dass für jeden Versuchsdamm insgesamt 100 Messwerte ausgewertet wurden. Von den Messdaten wurden Mittelwerte aus 20 Messwerten pro Damm und Messzeitpunkt bestimmt. Für die Darstellung der Änderungen der Bodenfeuchte wurden von den Messwerten, die nach der Beregnung erhoben wurden, die jeweiligen Ausgangswerte der Bodenfeuchte abgezogen.

3.5 Ergebnisse der Dammkronenberegnung

3.5.1 Wirksamkeit der Dammkronenberegnung

In Abbildung 19 sind die Mittelwerte der Bodenfeuchte (gemessen in Vol.-%) bei der Erhebung der Dammpprofile als Bodenfeuchteverteilungsmuster dargestellt. Mit drei unterschiedlichen Applikatoren (Tropfschiene, Nebeldüse, Gießkopf) wurde die Wirksamkeit der Dammkronenberegnung untersucht.

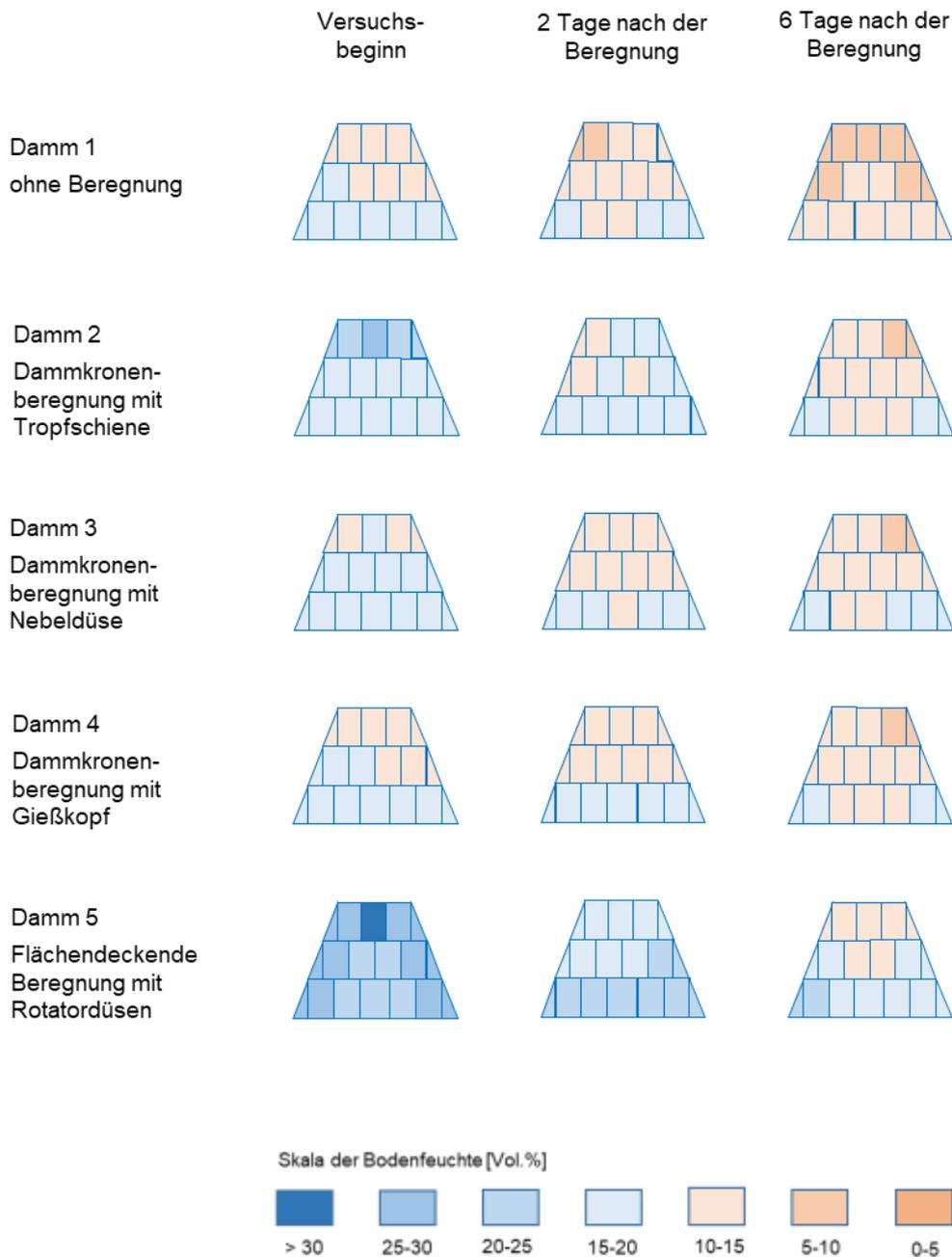


Abb. 19: Ergebnisse der Bodenfeuchteverteilung (n = 6) im Damm zu Versuchsbeginn sowie nach 2 und 6 Tagen für die Nullvariante (Damm 1), die Dammkronenberegnung mit Tropfschiene (Damm 2), Nebeldüse (Damm 3) und Gießkopf (Damm 4) sowie der flächendeckenden Beregnung mit der Rotatordüse (Damm 5)

Als Referenz diente die Nullvariante ohne Beregnung (siehe Abb. 19 Damm 1, oberste Reihe). Während zu Testbeginn im unteren Dammbereich noch eine Restbodenfeuchte (10 – 15 Vol. %) messbar war, trocknete der Damm im Verlauf von sechs Tagen weiter aus. Insbesondere auf der Dammkrone und an der oberen Hälfte der Flanken sank die Bodenfeuchte auf Werte < 10 Vol. %. Ebenfalls als Referenz diente die flächendeckende Beregnung (siehe Abb. 19 Damm 5, untere Reihe), die einen natürlichen Regen simulierte. Die Bodenfeuchte auf der gesamten exponierten Dammoberfläche stieg nach der Beregnung auf Werte > 25 Vol. %. Der Dammkern blieb mit 20 – 25 Vol. % etwas trockener. Nach zwei Tagen wurden die höchsten Bodenfeuchtwerte (20 – 25 Vol. %) in der unteren Bodenschicht gemessen, während in der obersten Schicht die Bodenfeuchte abnahm und nach sechs Tagen auf Werte < 15 Vol. % sank.

Bei der Beregnung der Dammkronen erzielte die Tropfschiene eine Durchfeuchtung von 20 – 30 Vol. % in der obersten Bodenschicht (siehe Abb. 19 Damm 2, zweite Reihe von oben). Die darunterliegenden Schichten wiesen Werte zwischen 15 und 20 Vol. % auf und trockneten im Verlauf der folgenden beiden Tage stellenweise aus. Nach sechs Tagen sank die Bodenfeuchte im Großteil des Dammkörpers auf Werte < 15 %. Bei der Nebeldüse (siehe Abb. 19 Damm 3, dritte Reihe) war direkt nach der Beregnung lediglich in der Mitte der Dammkrone eine Bodenfeuchte > 15 Vol. % messbar. In den nachfolgenden Tagen trockneten die oberste und die mittlere Schicht zunehmend aus, so dass zum Ende des Messzeitraums fast der gesamte Dammkörper einen Bodenfeuchtegehalt von < 15 % aufwies. Eine trockene obere Ecke wies einen Wert < 10 Vol. % auf. Beim Gießkopf erreichte die Bodenfeuchte keine nennenswerte Erhöhung als Folge der Beregnung (siehe Abb. 19, 2. Reihe von unten). In allen Schichten fielen die Werte im Laufe des Messzeitraums und wiesen nach sechs Tagen auch in der unteren Schicht niedrige Bodenfeuchtwerte < 15 Vol. % auf.

3.5.2 Verteilgenauigkeit auf der Dammkrone

Bei den Überfahrten mit den Applikatoren für die Dammkronenberegnung SprayMax® und Gießkopf (red.; mit reduziertem Querschnitt) zeigte sich eine hohe Verteilgenauigkeit der Dammkronenberegnung. Beim Gießkopf (red.) wurde kein Wasser in der Dammfurche aufgefangen (siehe Abb. 20, Diagramm in der Mitte), während bei der Düse SprayMax® geringe Wassermengen (< 1,5 mm) in den Messbechern 4 bis 6 bei zwei von drei Überfahrten aufgefangen wurden (siehe Abb. 20, Diagramm oben). Die Messbecher 7 bis 9 in der Furche blieben durchgehend leer.

Die Messergebnisse der Rotatordüse auf Damm 4 (Abb. 20, Diagramm unten) zeigten, dass sowohl die Dammkrone als auch die Dammfurche flächendeckend beregnet wurden. Die Abweichungen vom Soll-Wert der aufgefangenen Beregnungsmengen waren gering. Anders die Dammkronenberegnung (Abb. 20, Diagramm oben und in der Mitte): sowohl bei der Düse SprayMax® als auch beim Gießkopf (red.) wichen die aufgefangenen Wassermengen stark vom Soll-Wert ab. Zum einen differierten die Werte zwischen den drei Überfahrten Ü1, Ü2 und Ü3 in Bezug auf die Abweichungen vom Soll-Wert. Dies wurde durch positive Werte (Überberegnung) als auch durch negative Werte (Unterberegnung) sichtbar.

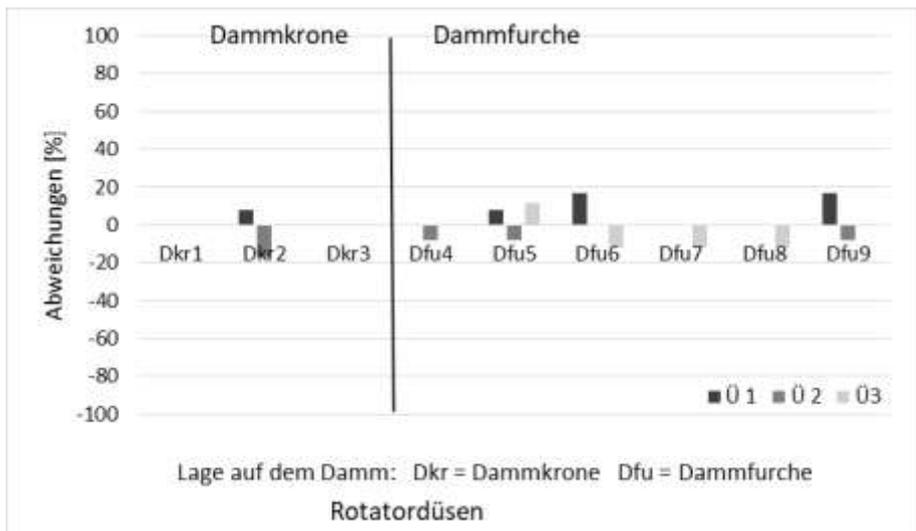
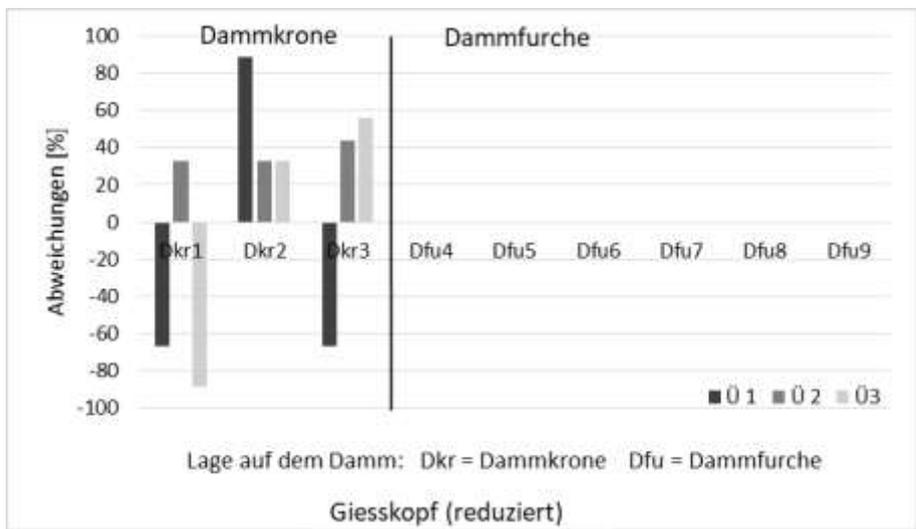
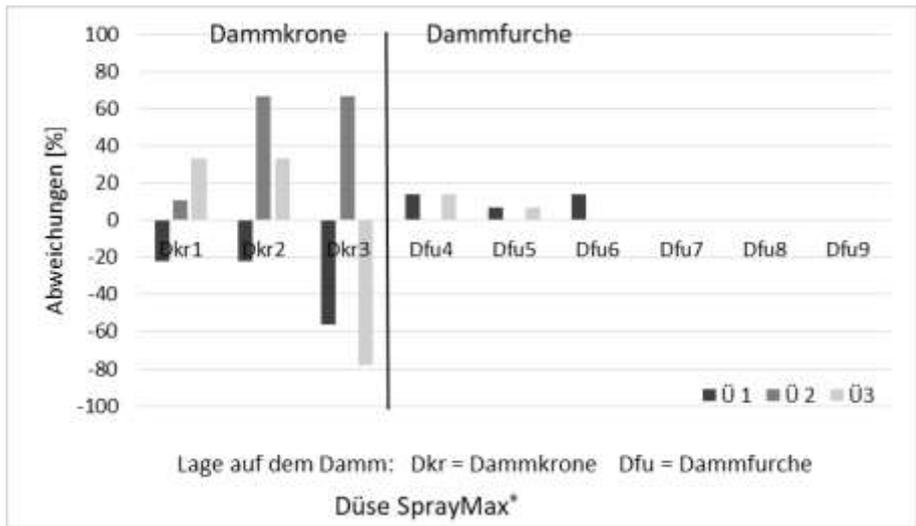


Abb. 20: Vergleich zwischen den Abweichungen von der Soll-Regengabe (9 mm) für die Düse SprayMax® (Diagramm oben), Giesskopf (red.) (Diagramm in der Mitte) und Rotatordüsen (Diagramm unten)

Bei der Düse SprayMax[®] und beim Gießkopf (red.) waren die Abweichungen zwischen den Soll- und Ist-Werten um ein Vielfaches höher. Auch die drei auf der Dammkrone gemessenen Werte während einer Überfahrt variierten bei der Dammkronenberegnung sehr stark. Daher wurde von der Darstellung der Mittelwerte Abstand genommen und die Messwerte in Abbildung 20 einzeln dargestellt.

3.5.3 Durchfeuchtung der Dammkrone

In Abbildung 21 sind die Mittelwerte der Bodenfeuchte nach Abzug der Ausgangsbodenfeuchte als Bodenfeuchteänderungen im Verlauf des Messzeitraums von drei Tagen dargestellt. Bei der Nullvariante (ohne Beregnung) sank die Bodenfeuchte drei Tage nach der Beregnung um 3,5 Vol. %-Punkte. Bei den Rotatordüsen (Simulation eines natürlichen Regens) stieg die gemessene Bodenfeuchte direkt nach der Beregnung um 8 Vol. %-Punkte. Einen Tag später lag die Bodenfeuchte 3,8 Vol. %-Punkte über dem Ausgangswert und am Ende des Messzeitraums am dritten Tag 0,4 Vol. %-Punkte höher, wodurch die Ausgangsbodenfeuchtwerte vor Beginn der Beregnung wieder erreicht wurden.

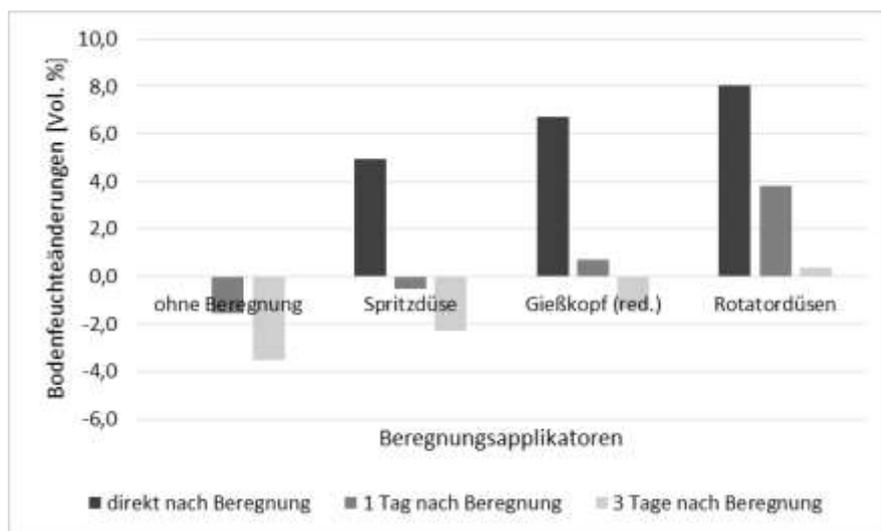


Abb. 21: Änderung der Mittelwerte der Bodenfeuchte nach einer niedrigen Beregnungsgabe (9 mm) über einen Zeitraum von drei Tagen beim Einsatz verschiedener Applikatoren für die Dammkronenberegnung (Spritzdüse Damm 2, Gießkopf red. Damm 3); als Referenz dienen die Darstellungen der Mittelwerte der Nullvariante sowie der Simulation eines natürlichen Regens mit Rotatordüsen

Auch bei der Dammkronenberegnung stiegen die Bodenfeuchtwerte nach der Beregnung (geringe Wassergabe; 9 mm) an, bei der Spritzdüse SprayMax[®] um 5 Vol. %-Punkte und beim Gießkopf (red.) um 6,7 Vol. %-Punkte. Größere Unterschiede gab es im weiteren Verlauf der Messung: nach einem Tag sanken die Werte um 4 bzw. 5 Vol. %-Punkte und lagen nach drei Tagen unterhalb des Ausgangswertes der Bodenfeuchte zum Startzeitpunkt. Im Vergleich zur Nullvariante lag die Bodenfeuchte am Ende des Messzeitraums um 1,2 Vol.-%-Punkte (SprayMax[®]) bzw. 2,1 Vol.-%-Punkte (Gießkopf, red.) höher.

3.6 Diskussion zur Dammkronenberechnung

Mit den Feldversuchen zur Funktionalität der Dammkronenberechnung sollte zum einen untersucht werden, ob mit dem neu entwickelten Applikationssystem eine mittige und gleichförmige Applikation auf die Dammkrone technisch möglich ist und welche Applikatoren sich hierfür eignen. Des Weiteren wurde untersucht, wie sich die Dammkronenberechnung unter Feldbedingungen auf die Verteilung der Bodenfeuchte im Dammkörper auswirkt und wie effektiv die Berechnung der Dammkrone mit geringen Wassergaben ist.

Aufgrund von Sonnenstrahlung und Wind trocknen die Dämme zuerst an der Oberfläche, also in den Bereichen der Dammkrone und Dammfanken aus. Die Bodenfeuchtwerte nehmen dabei von außen in Richtung Dammkern zu, da sich dort die gespeicherte Bodenfeuchte aus vorhergehenden Niederschlagsereignissen länger halten kann. Das änderte sich jedoch mit der Bestandsentwicklung, wenn die Wurzeln der Kulturpflanzen bis in den Dammkern (10 – 15 cm Tiefe) reichten. Je nach Entwicklungsstadium und Blattvolumen nahmen die Wurzeln Wasser aus dem durchwurzelten Bodenraum im Dammkern auf, transpirierten es in die Atmosphäre und verstärkten somit ein Austrocknen des Dammkerns.

Wirksamkeit der Dammkronenberechnung

Wie in der Darstellung der Ergebnisse der Nullvariante in Abbildung 19 sichtbar wurde, befinden sich die Stellen mit den geringsten Bodenfeuchtwerten dort, wo Dammkrone und Dammfanke aufeinandertreffen: an den oberen Ecken (Kanten) der Dämme. Die Ausrichtung des Damms zur Sonne spielt eine wichtige Rolle, wobei diejenige Flanke, die Richtung Süden zeigt, stärker austrocknet als die im Schatten liegende Nordflanke. Die Dammkrone selbst ist mehr als die Flanken der austrocknenden Wirkung von Wind ausgesetzt.

Die unterste Bodenschicht besaß bei allen Dämmen eine zuvor gespeicherte Restfeuchte. Diese kann aus vorhergehenden Niederschlagsereignissen oder durch kapillare Wassernachlieferung aus den Bodenschichten unterhalb des Damms je nach Bodenart und Tiefe des Grundwasserspiegels stammen. Eine Änderung der Bodenfeuchte im Damm kann damit durch Infiltration erfolgen, aber auch in entgegengesetzter Richtung durch kapillaren Aufstieg (wie in der WHG in Kapitel 2.1.1 dargestellt). Aus Abbildung 19 ist zu entnehmen, dass die linke und rechte Ecke des Dammfußes ebenfalls häufiger höhere Bodenfeuchtwerte und damit farblich abgehoben ist. Der Grund hierfür liegt im kapillaren Nachfluss beispielsweise aus Bodenwasservorräte, die sich unter der Furche nach Niederschlagsereignissen gesammelt haben. Das zeigen auch Untersuchungen von ZHANG (2013, 2015). In Simulationen mit HYDRUS 2 D und Feldmessungen des Bodenwasserhaushalts in Dämmen bei Furchenbewässerung in Nordchina beschrieb er die Infiltration und Verteilung des Bodenwassers sowie die laterale Wasserbewegung von den bewässerten Furchen in die Dämme. Bei den Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden keine Messwerte der Bodenfeuchte in den Dammfurchen erhoben, wird jedoch für weiterführende Untersuchungen empfohlen.

Bei Regen oder flächendeckender Beregnung durchdringt das Wasser den Dammkörper von allen Seiten und durchfeuchtet zuerst Dammkrone, Dammlanken, Dammfuß sowie Furchen (siehe Abb. 19, Damm 5). Von dort dringt das Wasser in den Dammkern vor. Sowohl im Dammkern als auch im Dammfuß kann das Wasser länger als in der Dammkrone oder an den Dammlanken gespeichert und den Kulturpflanzen zur Verfügung gestellt werden. Über den Versuchszeitraum trocknete der Versuchsdamm 5 in Abbildung 19 (Simulation des natürlichen Niederschlags) weniger stark aus als im Vergleich zu den drei Varianten der streifenförmigen Beregnung der Dammkronen. Die niedrigsten Bodenfeuchtwerte wurden bei Damm 5 auf der Dammkrone am Übergang zu den Flanken gemessen, die höchsten Werte auf der Mitte der Dammkrone sowie an den Flanken und am Dammfuß. Dieses Ergebnis deckt sich nur teilweise mit dem von ROBINSON (1999). Bei seinem Beregnungsversuch mit einem Düsenwagen (flächendeckende Beregnung) auf sandigen Boden bei Kartoffeln im Dammanbau floss ein Großteil des Wassers von den Dämmen in die Furchen und wurde nicht durch die Dammoberfläche in den Damm aufgenommen. Er schrieb dies teilweise der benetzungshemmenden Eigenschaften des Bodens zu, aber auch der Dammgeometrie. Bessere Ergebnisse erzielte er beim Anbau von Kartoffeln auf breiteren, ebenfalls erhöhten Beeten, da sich das Wasser besser auf der Beetoberfläche sammelte und infiltrierte. Auch COOLEY (1997) fand bei einem vergleichenden Versuch zwischen Überkopfberegnung und Tropfbewässerung bei Kartoffeln heraus, dass bei der Überkopfberegnung der größere Teil des Wassers in die Furche gelangte und nicht direkt vom Dammkörper aufgenommen wurde. Während der Versuche auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen wurde beobachtet, dass sich Wasser bei der flächendeckenden Beregnung in den Furchen sammelte und sich in Senken sowie im tiefer gelegenen Vorgewände sammelte.

Bei den wassersparenden Varianten der Dammkronenberegnung im beschriebenen Versuch (siehe Abb. 19 Tropfschiene Damm 2, Nebeldüse Damm 3, Gießkopf Damm 4) bewirkte die Beregnung durch die Tropfschiene am effektivsten eine Durchfeuchtung des definierten, zu durchfeuchtenden Bodenraums. Die Benetzung der Dammkrone und die Infiltration in die oberen und mittleren Schichten des Dammkörpers verliefen ohne Wasserverluste durch abfließendes Oberflächenwasser über die Dammlanken und erhöhten die Bodenfeuchtwerte in der Dammkrone und in dem unter der Dammkrone befindlichen Bereich. Weder die Beregnung mit der Nebeldüse noch mit dem Gießkopf führten zu einer nennenswerten Erhöhung der Bodenfeuchte im Damm und damit zu einer Auffüllung des Bodenwasservorrats. Für die feinen Wassertropfen der Nebeldüse spielt insbesondere beim Einsatz an sonnigen Tagen die Verdunstung eine große Rolle. Möglicherweise drang das Wasser nicht genügend tief in den Damm ein, um eine Änderung der Bodenfeuchte zu messen. Beim Gießkopf wird von einer zu hohen Beregnungsintensität ausgegangen, da sofort nach dem Auftreffen des Wassers auf die Dammkrone oberflächlicher Abfluss über die Flanken in die Furchen beobachtet wurde. Der Anstieg der Bodenfeuchte war im Dammkörper kaum messbar, zeigte sich jedoch im Dammfuß. Kritisch zu betrachten ist die tatsächlich mögliche Messtiefe der Bodenfeuchte in der Dammkrone. Die obersten Messungen im Dammprofil fanden in einer Tiefe von 5 cm statt. Geringfügige Änderungen in der zuoberst liegenden in der Dammkrone (1 – 3 cm Tiefe) konnten mit den verwendeten Messverfahren nicht realistisch abgebildet werden.

Verteilgenauigkeit bei der Dammkronenberechnung

Die Verteilgenauigkeit der Wassermengen bei den Rotatordüsen (flächendeckende Berechnung) zeigte vergleichsweise geringe Abweichungen vom Soll-Wert und damit eine gleichmäßige Durchfeuchtung der Dammkrone sowie der Dammfanken und -furchen, ähnlich einem natürlichen Regen. Bei der Dammkronenberechnung durch die Düse SprayMax[®] und den Gießkopf (red., mit auf 1/3 reduziertem Querschnitt in Längsrichtung) konnte gezeigt werden, dass die applizierten Berechnungsgaben zumeist die Dammkrone treffen und die Verluste (Wasser trifft Dammfurche oder Dammfanke) sehr gering sind. Die geringen Verluste werden primär auf Abdrift durch Wind zurückgeführt. Eine andere Ursache ist die Abweichung des Düsenwagens von der Fahrspur aufgrund der Neigung des Geländes. In der Folge neigten sich die Applikationssysteme (Führungsarme) ebenfalls geringfügig zur Seite und die Wassermengen trafen daher nicht mittig, sondern um wenige Zentimeter versetzt auf die Dammkrone. Dadurch wurden die Regenmesser nicht mittig überfahren, was zu Abweichungen bei der Sollwassermenge führte.

Probleme bereitete dagegen die Gleichförmigkeit der Wassergabe auf die Dammkrone in Längsrichtung des Dammes (siehe Abb. 20). Grund für die Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Wassermengen sind in geringerem Maße Wasserdruckunterschiede und folglich Schwankungen bei der Überfahrtgeschwindigkeit des Düsenwagens. Zusätzlich führten beim Gießkopf bereits geringe Druckunterschiede dazu, dass dieser nicht vollständig mit Wasser gefüllt war und dadurch das Wasser auf die Dammkrone plätscherte. Die zuvor genannten Gründe erklären jedoch nicht die Unterschiede zwischen den aufgefangenen Wassermengen während einer einzelnen Überfahrt auf den Messpunkten Dkr1, Dkr2 und Dkr3 (siehe Abb. 20, Balkendiagramme links Dammkrone). Die gemessenen Unterschiede der aufgefangenen Wassermengen decken sich mit den Feldbeobachtungen: das Applikationssystem wurde nicht gleichförmig mit dem Düsenwagen bewegt, sondern ruckelte stark. Die Führung blieb an einem Punkt (z. B. Beikraut, Stein, Vertiefung) hängen, wodurch an dieser Stelle eine hohe Wassergabe auf die Dammkrone appliziert wurde. Sobald die Zugkraft kurze Zeit später höher als die Reibungskraft zwischen Führung und Boden wurde, schnellte das Applikationssystem in Fahrtrichtung vor und applizierte über diesem Dammstück lediglich eine geringe Wassergabe. Letzteres führte zu niedrigen Bodenfeuchtegehalten, wogegen die hohen Wassermengen von der Dammkrone nicht aufgenommen werden konnten und über die Flanken in die Furchen flossen.

Durchfeuchtung der Dammkrone

Durch die geringe Beregnungsgabe (9 mm) im Versuch 2014 stiegen die Werte für die Bodenfeuchte in der Dammkrone bei allen Beregnungsvarianten lediglich im geringen Umfang. Der höchste Anstieg wurde durch die Rotatordüsen erreicht. Allerdings wurde bei der flächendeckenden Beregnung eine um 2/3 größere Fläche mit einer um 2/3 höheren Beregnungsgabe pro Quadratmeter (auf Dammkrone,-flanke und -furche) beregnet. Das schränkt die direkte Vergleichbarkeit zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten bei flächendeckender Beregnung und streifenförmiger Dammkronenberegnung ein.

Folglich wurde bei der Dammkronenberegnung durch die ausgewählten Applikatoren ein im Vergleich zur flächendeckenden Beregnung geringerer Anstieg der Bodenfeuchte nach der Beregnung erwartet und gemessen. Daher können die Werte der Dammkronenberegnung lediglich untereinander verglichen werden. Für weitergehende Untersuchungen empfiehlt es sich, bei der flächendeckenden Beregnung eine um 2/3 reduzierte Beregnungsgabe gegenüber der Dammkronenberegnung einzusetzen, um die Daten als Referenz nutzen zu können.

Im Laufe eines Zeitraums von drei Tagen sank die Bodenfeuchte auf den Ausgangswert bei der Beregnung mit den Rotatordüsen. Bei der Beregnung mit der Düse SprayMax® und dem Gießkopf (red.) sank die Bodenfeuchte teilweise unter die Ausgangswerte. Damit ähnelte das Verteilungsmuster der Bodenfeuchte im Austrocknungsprozess des Damms dem der nicht beregneten Variante. In der Praxis wäre eine erneute Beregnung (Überfahrt mit dem Düsenwagen) notwendig. Da geringe Wassergaben seltener bodenschädigend wirken, werden sie für die Beregnungspraxis empfohlen (KRUG, 2002; WONNEBERGER, 2004; LABER, 2014; EGHBAL, 2017). Bei zu geringen Wassergaben auf die Dammkrone (< 9 mm) war die Wirkdauer allerdings von kurzer Dauer. Der Bodenwasservorrat konnte nicht aufgefüllt werden. Ein Grund für die geringe Durchfeuchtung der Dammkrone kann in der Tageszeit der Beregnungsversuche und damit in der potentiellen Evaporationsrate (Strahlungsintensität, Wind) liegen. Dafür sprechen auch Forschungsergebnisse von YAKOUBI et al. (2010), bei denen die Wirkung von Überkopfberegnung am Tag und in der Nacht unterschiedlich ausfielen. In der Praxis versucht der Landwirt daher nachts bzw. in den Morgen- und Abendstunden zu beregnen. Die in diesem Kapitel beschriebenen Beregnungsversuche fanden durchgehend tagsüber statt. Es ist anzunehmen, dass die tatsächliche Evaporation bei den einzelnen Versuchen unterschiedlich hoch war, da Messungen am frühen Morgen, aber auch mittags und abends stattfanden und auch Sonnenstrahlung und Wind in der Intensität variierten.

Für weiterführende Versuche wird daher ein Versuchsaufbau empfohlen, bei dem die Versuchsbedingungen einheitlicher gestaltet werden können. Das ist beispielsweise durch eine komplette Überdachung (Gewächshaustunnel) der Versuchsfläche zu erreichen oder durch eine Verlagerung der Versuche beispielsweise nach Südeuropa, wo im Sommer längere Trockenphasen nutzbar wären. Denkbar sind auch einzelne Laborversuche mit künstlich präparierten Dämmen oder die Simulation der Dammkronenberegnung mit HYDRUS 2D.

Weiterer Entwicklungsbedarf

Keiner der für die Dammkronenberegnung ausgewählten Applikatoren im Versuchsjahr 2013 konnte eine zufriedenstellende Wirkung bei der Durchfeuchtung des Damms erzielen. Die Wassermengen wurden nicht vollständig von der Dammkrone aufgenommen. Lediglich die Tropfschiene erzielte mit Blick auf die Durchfeuchtung der Dammkrone und der oberen Dammschicht gute Ergebnisse (siehe Abb. 21). Durch ihre Länge und die Vielzahl der Tropfer ermöglichte sie eine Beregnung, die sich nicht punktuell, sondern je nach Einzugs geschwindigkeit über einen minutenlangen Zeitraum erstreckte und somit dem Boden Zeit gab, das Wasser aufzunehmen. Da die groben Tropfen der Tropfschiene jedoch zu einer Oberflächenschädigung der Dammkrone führten (siehe Abb. 12), wurde das Konzept der Tropfschiene als Methode für die Dammkronenberegnung verworfen.

Im Versuchsjahr 2014 wurde die Düse SprayMax® und der Gießkopf (red.) mit einem auf 1/3 reduzierten Querschnitt getestet. Sowohl beim Durchfluss als auch bei der Tropfengröße und beim Spritzbild deckten sich die technischen Eigenschaften dieser beiden Applikatoren am besten mit den Anforderungen an die Dammkronenberegnung (siehe Kap. 3.2.2). Beide erzielten eine gute Verteilgenauigkeit und beregneten die Dammkrone zielgenau in der Mitte. Die beobachteten Abweichungen sind unter den Bedingungen eines Feldtests akzeptabel. Allerdings war die Funktionalität des Applikationssystems in Bezug auf die Gleichförmigkeit in Längsrichtung der Dammkrone nicht gegeben.

Es besteht weiterer Entwicklungsbedarf bei der Führung des Applikationssystems über der Dammkrone, um eine gleichförmige Bewegung des Applikators über den Damm in Längsrichtung zu ermöglichen. Darüber hinaus wird in einem weiteren Entwicklungsfenster eine Verbesserung der Wasseraufnahme durch die Dammkrone in den Dammkörper durch die Gabe mehrerer Teilwassermengen angestrebt.

4 Mehrteilige Wasserapplikation

Im Kapitel 4 werden weitere Entwicklungsschritte zur Optimierung der Dammkronenberechnung dargestellt. Zuerst stehen Überlegungen zur Beregnungsintensität im Mittelpunkt. Der theoretische Ansatz einer mehrteiligen Wasserapplikation wird anschließend beschrieben. Daraus werden speziell für die Dammkronenberechnung technische Umsetzungen abgeleitet. Als Ergebnis der Entwicklungsarbeit wird der Prototyp eines Dammschlittens sowie Tests zur Funktionalität beschrieben. Die im Jahr 2015 durchgeführten Feldversuche zur mehrteiligen Wasserapplikation mit dem Dammschlitten werden am Schluss des Kapitels beschrieben.

4.1 Problemstellung

Im Kapitel 2.1.3 wurde auf die Beregnungsintensität eingegangen, die in der Praxis als Kennwert für den Vergleich von Beregnungsanlagen herangezogen wird. Insbesondere bei größeren Wassermengen in kurzer Zeit kann die Aufnahmegrenze des Bodens überschritten werden. Demgegenüber stehen bodenbedingte Grenzwerte, die beschreiben, wieviel Wasser ein Boden je nach Beschaffenheit maximal aufnehmen kann (SOURELL, 2014). Wird die maximale Aufnahmekapazität eines Bodens überschritten, kommt es zu einem oberflächlichen Abfluss. Als Folge kann die Oberfläche der Dammkrone verschlammten. Feinboden kann von den Dammkronen in die Furchen umgelagert und weggeschwemmt werden. Damit hätte eine Beregnung eine bodenschädigende und erosionsfördernde Wirkung. Aus Gründen des Boden- und Wasserschutzes sind daher die Beregnungsgaben an die Bedürfnisse der Pflanzen und den Boden anzupassen. Besondere Vorsicht ist bei trockenen Böden geboten. Auf Oberflächen von trockenen, sandigen Böden können beispielsweise hydrophobisierende organische Substanzen zu einer erhöhten Benetzungshemmung führen und die Wasseraufnahme einschränken.

Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, ob und wie die Beregnungsintensität bei der Dammkronenberechnung reduziert werden kann. Es soll geklärt werden, ob durch die mehrteilige, zeitversetzte Applikation mehrerer Teilwassergaben die Wasseraufnahme durch die Dammkrone und damit die Bestandsführung verbessert werden kann. Gleichzeitig soll durch die Ergebnisse gezeigt werden, dass mit der neuen Methode die Wassererosion reduziert werden kann.

4.2 Weiterentwicklung der Dammkronenberechnung

Ziel der Weiterentwicklung der Dammkronenberechnung war eine verbesserte Wasseraufnahme in den Dammkörper und damit eine bessere Versorgung der Kulturpflanzen. Im Mittelpunkt standen dabei die Reduzierung der Beregnungsintensität sowie die Applikation mehrerer, zeitversetzter Teilwassergaben in einem Arbeitsgang.

4.2.1 Reduzierung der Beregnungsintensität

Die Beregnungsintensität gibt an, welche Beregnungsmenge in einer Zeiteinheit auf einen Quadratmeter fällt. Dabei ist der zeitliche Bezugsraum in der Regel eine Stunde. Bei vielen Beregnungsverfahren wird eine zu beregnende Fläche jedoch nicht permanent oder wiederholt eine Stunde lang beregnet, sondern für einen viel kürzeren Zeitraum. Diese ist von der Verweildauer des Wassersprühstrahls der Applikatoren über einer Fläche abhängig und variiert daher je nach Verfahren. Daher handelt es sich bei der Beregnungsintensität um einen theoretischen Vergleichswert. Bei mobilen Beregnungsanlagen ist die Verweildauer bei gleichbleibender Beregnungsmenge von der Überfahrgeschwindigkeit (Einzugsgeschwindigkeit) abhängig, wobei auch der Durchfluss der Düsen und die beregnete Fläche (Benetzungsfläche) die Beregnungsintensität beeinflussen. In Abbildung 22 sowie in den Gleichungen 4 und 5 sind die Kenngrößen dargestellt, mit denen die mobile, streifenförmige Beregnung im Hinblick auf die Beregnungsintensität beschrieben werden kann.

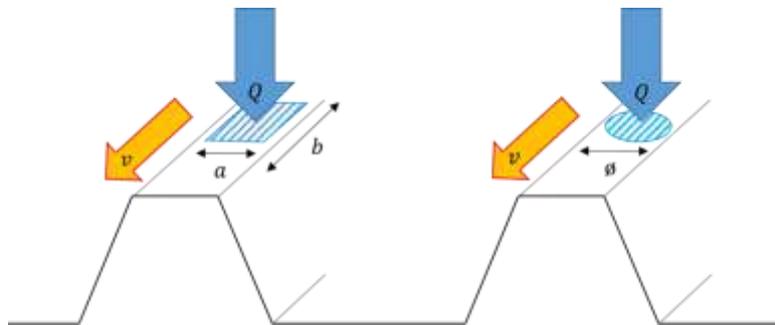


Abb. 22: Modellhafte Betrachtung für die mobile, streifenförmige Beregnung bei rechteckiger Benetzungsfläche (Damm links) und kreisförmiger Benetzungsfläche (Damm rechts) [eigene Darstellung]

$$I = \frac{Q}{a \cdot b} \quad \text{Gleichung 4}$$

$$B = \frac{Q}{v \cdot b} \quad \text{Gleichung 5}$$

mit I = Beregnungsintensität [$\text{l h}^{-1} \text{m}^{-2}$] a = Arbeitsbreite [m]
 Q = Durchfluss Applikator [l min^{-1} , $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$] b = Arbeitslänge [m]
 B = Beregnungswassergabe [mm , l/m^2] v = Einzugsgeschwindigkeit [m h^{-1}]
 (Applikationsmenge [mm , l/m^2])

Die Beregnungsintensität auf der Dammkrone entspricht der Division des Durchflusses Q des darüber positionierten Applikators durch die mitbewegte, beregnete Fläche ($a \cdot b$, auch Benetzungsfläche). Die Höhe der Beregnungswassergabe B (die der Applikationsmenge entspricht) berechnet sich als Division des Durchflusses Q durch die Flächenleistung, die das Produkt von Einzugsgeschwindigkeit mal Arbeitslänge ($v \cdot b$) ist. Über die Einzugsgeschwindigkeit v wird bei konstantem Durchfluss Q des Applikators die Höhe der Beregnungsgabe B reguliert. Mit der Geschwindigkeit v ist eine bestimmte Verweildauer des Applikators über einem Punkt der Dammkrone verbunden. Je langsamer der Düsenwagen fährt, desto höher ist die applizierte Wassermenge. Je schneller der Düsenwagen über der Dammkrone bewegt wird, desto kürzer ist die Verweildauer und desto geringer die applizierte Wassermenge.

Aus der Betrachtung kann abgeleitet werden, wie eine Reduzierung der Beregnungsintensität erreicht werden kann. Eine Möglichkeit bietet die Vergrößerung der Benetzungsfläche $a \cdot b$ auf der Dammkrone. Dabei stellt die Breite der Dammkrone die maximal mögliche Arbeitsbreite dar und ist eine Konstante. Variabel und ausdehnbar ist bei rechteckigen Benetzungsflächen lediglich die Arbeitslänge b . Bei Applikatoren mit kreisförmigem Querschnitt/kreisförmiger Benetzungsfläche entspricht die Dammbreite dem maximalen Durchmesser der Benetzungsfläche.

Vergrößerung der Benetzungsfläche

Die Ausdehnung der Arbeitslänge b eines Applikators, beispielsweise einer Düse, kann durch die Schrägstellung eines Applikators erreicht werden. In Abbildung 23 ist modellhaft dargestellt, wie sich eine Änderung des Positionswinkels des Applikators um 50° bei rechteckigen und bei kreisförmigen Benetzungsflächen auswirkt.

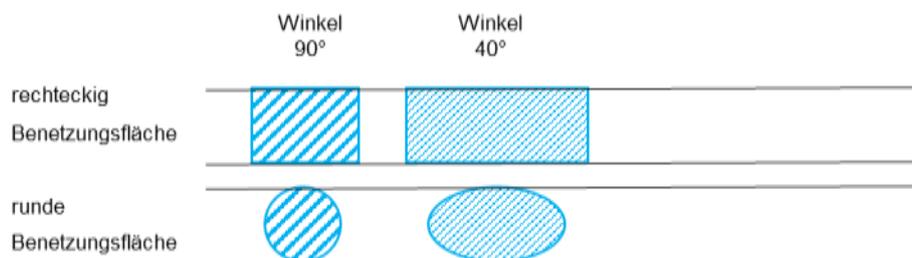


Abb. 23: Vergrößerung der Benetzungsfläche durch Schrägstellung des Applikators durch Änderung des Montagewinkels von 90° (senkrecht nach unten) auf 40° (schräg nach vorne) bei rechteckiger und runder Benetzungsfläche [eigene Darstellung]

Je schräger der Winkel (10° , 20° , 30° , 40°), desto mehr verlängert sich das Spritzbild und damit die Arbeitslänge b . Folglich vergrößert sich die Benetzungsfläche des Applikators auf der Dammkrone. Je nach Applikator kann bei stärkeren Schräglagen die Breite des Spritzbildes zunehmen, so dass ein Teil der Flanken und Furchen nass wird und somit Wasser für die Beregnung der Dammkronen verloren geht.

Labortest zur Schrägstellung des Applikators

In einem Labortest wurde die Düse SprayMax® in zwei verschiedenen Positionen getestet. Dafür wurde das Applikationssystem 40 cm über dem steinigen Untergrund platziert. Anschließend wurde das Wasser für einen kurzen Moment (< 5 Sekunden) auf den Untergrund gesprüht und die benetzte Fläche umgehend vermessen.

In Abbildung 24 wird sichtbar, dass die Intensität dabei nicht auf der gesamten Benetzungsfläche gleich ist. Im vorderen Bereich (links im Bild) sowie in den seitlichen Bereichen ist die Fläche weniger stark vernässt und weist dort eine geringere Beregnungsintensität auf.

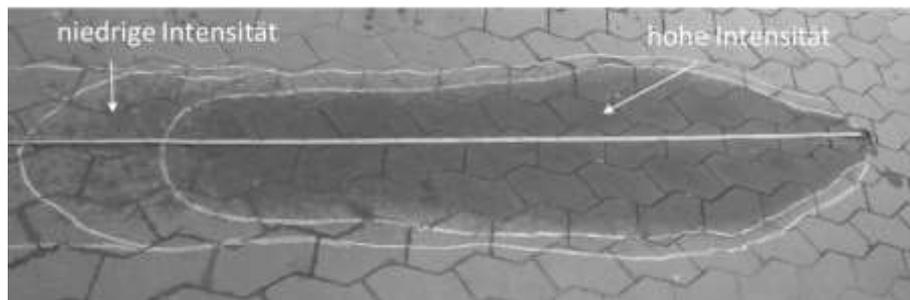


Abb. 24: Benetzungsfläche verschiedener Intensitäten bei 40° Schrägstellung der Düse SprayMax® [Foto D. Schwarz]

Bei einer Position der Düse senkrecht nach unten (90°) und einer Montagehöhe von 40 cm betrug die benetzte Fläche ca. 0,28 m². Bei einem Winkel von 40° stieg die Benetzungsfläche auf fast das Doppelte, auf ca. 0,5 m² (siehe Tab. 8). Damit ist eine maximale Vergrößerung der Benetzungsfläche bei der für diesen Test verwendeten Düse SprayMax® um 80 % möglich.

Tab. 8: Vermessungen des Spritzbildes bei unterschiedlicher Schrägstellung des Applikators [eigene Darstellung]

Spritzwinkel	90° - Winkel	40° - Winkel
Spritzbild-Breite	25 cm	25 cm
Spritzbild-Länge	110 cm	200 cm
Benetzte Fläche	0,28 m ²	0,5 m ²
Anteil der Benetzungsfläche	100 %	180 %
Weg Tropfen – Boden	kürzer	länger
Windanfälligkeit	geringer	höher
Beregnungsintensität je Stunde bei Q = 2,2 l min ⁻¹ (Anm.: Wert bei Stillstand des Applikationssystems)	470 l m ⁻² h ⁻¹	264 l m ⁻² h ⁻¹

Technisch ist die Schrägstellung eines Applikators (z. B. Düse) durch ein im gewünschten Winkel gebogenes Rohrstück, das am wasserführenden PE-Rohr montiert ist, leicht umsetzbar. Durch den weiteren Weg, den die Tropfen von der Düse bis zum Auftreffen zurücklegen, steigt das Risiko für Abdrift im vorderen Bereich mit dem Grad der Schrägstellung. Daher wird ein Winkel > 40° bei der Montage in Schrägstellung nicht empfohlen.

4.2.2 Teilung der Wassergabe

Eine Teilung der Wassermenge in zwei, drei oder mehrere Teilwassergaben ist für die Infiltration vorteilhaft, da der Boden kleinere Wassermengen besser aufnehmen kann. In Abbildung 25 ist das Prinzip der Teilung einer Gesamtwassergabe in zwei Teilwassergaben dargestellt, wobei die Höhe einer einzelnen Gesamtwassergabe (im Bild links) identisch ist mit der Summe beider Teilwassergaben (im Bild rechts).

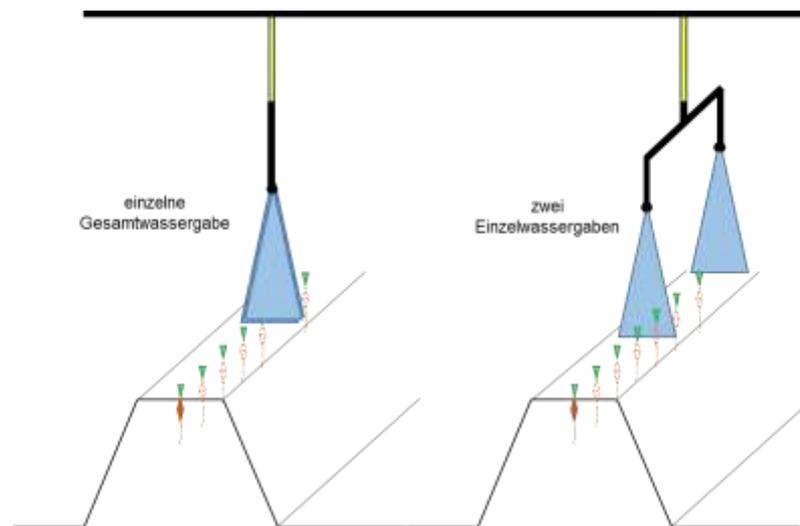


Abb. 25: Prinzip der Teilung der Gesamtwassergabe (links) in zwei Teilwassergaben (rechts) [eigene Darstellung]

Durch die erste Teilwassergabe wird die Bodenoberfläche angefeuchtet, damit das Wasser der darauffolgenden Teilwassergabe besser aufgenommen werden kann. Da sich bei der mobilen Beregnung der Düsenwagen über das Feld bewegt, treffen die beiden Teilwassergaben mit einem zeitlichen Abstand auf den Damm. Zwischen den einzelnen Teilwassergaben vergeht eine Zeit t . Diese wird benötigt, um die Bodenteilchen zu benetzen. Erst dann kann Wasser in den Porenräumen infiltrieren. In eigenen Vorversuchen auf lehmigen Sand/sandigen Lehm hat sich gezeigt, dass eine Zeit von einigen wenigen Minuten für leicht benetzungsgehemmte Böden oder trockene Böden bis zu 30 Minuten veranschlagt werden sollte. Wie schnell ein Boden Wasser aufnimmt, ist von der aktuellen Bodenfeuchte, vom Zeitpunkt der Beregnung (potentielle Evaporation), von Bodeneigenschaften (z. B. Textur, hydraulische Leitfähigkeit, Anteil organischer Substanz) und vom Pflanzenbestand abhängig.

Der konstruktive Abstand zwischen zwei Applikatoren ermöglicht durch die kontinuierliche Bewegung des Applikationssystems am Düsenwagen eine Beregnungspause, die maßgeblich vom Abstand zwischen beiden Applikatoren sowie von der Einzugsgeschwindigkeit des Düsenwagens abhängig ist. Bei einer Geschwindigkeit von beispielsweise 30 m h^{-1} und einem Abstand der Applikatoren von 1 m würde die Beregnungspause zwischen den Teilwassergaben jeweils zwei Minuten dauern, bei einem Abstand von 5 m dann entsprechend 10 min . Der begrenzende Faktor ist die Länge der Applikationseinheit. Eine beispielsweise 10 m lange Einheit ist aufgrund des Materialaufwands als Zusatzmodul für die Ausleger des Düsenwagens konstruktionstechnisch nur mit Änderungen an der Grundkonstruktion (Stabilität) zu realisieren. Eine mögliche konstruktive Problemlösung der Düsenwenausleger war nicht Gegenstand dieser Arbeit.

Prinzipiell kann die Teilung der Gesamtwassergabe in zwei oder auch in mehrere Einzelgaben so erfolgen, dass die erste Teilwassergabe zum Vorsprühen niedriger ausfällt als die später folgende/folgenden Wassergaben. Technisch kann dies durch die Auswahl von Applikatoren (beispielsweise Düsen) mit unterschiedlichen Durchflussraten umgesetzt werden.



Abb. 26: Schematische Darstellung der Sicht von oben auf die Dammkrone mit Benetzungsflächen einer fünfteiligen Wassergabe (1. Teilwassergabe für das Vorsprühen mit Schrägstellung der Düse, zweite bis fünfte Wassergabe jeweils versetzt mit höheren Wassergaben und Senkrechtstellung der Düsen) [eigene Darstellung]

Die Montage von Applikatoren für mehrere Teilwassergaben ist technisch leicht umsetzbar. Eine Kombination aus verschiedenen Applikatoren ist denkbar, um beispielsweise mit der vorderen Düse ein Vorsprühen zu ermöglichen, wie in Abbildung 26 als ovale Fläche im Bildvordergrund dargestellt. Dabei ist es für die Wasseraufnahme des Bodens günstig, wenn sich mehrere Beregnungspausen und Teilwassergaben abwechseln und sich die Wassergabe über einer Länge von mehreren Metern erstreckt.

4.2.3 Konstruktion des Dammschlittens

Bei der Konstruktion des Dammschlittens wurden die bisherigen Ergebnisse der Labortests und Feldversuche berücksichtigt. Das schließt die Entwicklung einer Führungskonstruktion über der Dammkrone sowie die Auswahl und Positionierung geeigneter Applikatoren für eine zweigeteilte Wassergabe mit ein.

Der Dammschlitten besteht aus zwei ähnlich den Kufen eines Schlittens gebogenen Stahlrohren ($\text{\O} 8 \text{ mm}$), die über Streben miteinander verbunden sind. Wie in Abbildung 27 sichtbar, ist daran ein höhenverstellbares, wasserführendes PE - Rohr ($\text{\O} 25 \text{ mm}$) installiert. Die Wasserzuleitung erfolgt über einen Schlauch, der über ein PE-Rohr und einen Druckminderer mit dem wasserführenden Gestänge des Düsenwagens über eine GK-Kupplung verbunden ist und gleichzeitig die Zugkräfte aufnimmt. An das wasserführende PE-Rohr (Länge 1,40 m) wurden einmal am vorderen Rohrende sowie einmal am hinteren Ende T-Stücke, Bogen- und Anschlussstücke aus dem gleichen Material und mit demselben Durchmesser montiert. Daran können über Bajonettkappen Spritzdüsen oder auch andere Düsen, Gießköpfe oder Schleppschläuche montiert werden.

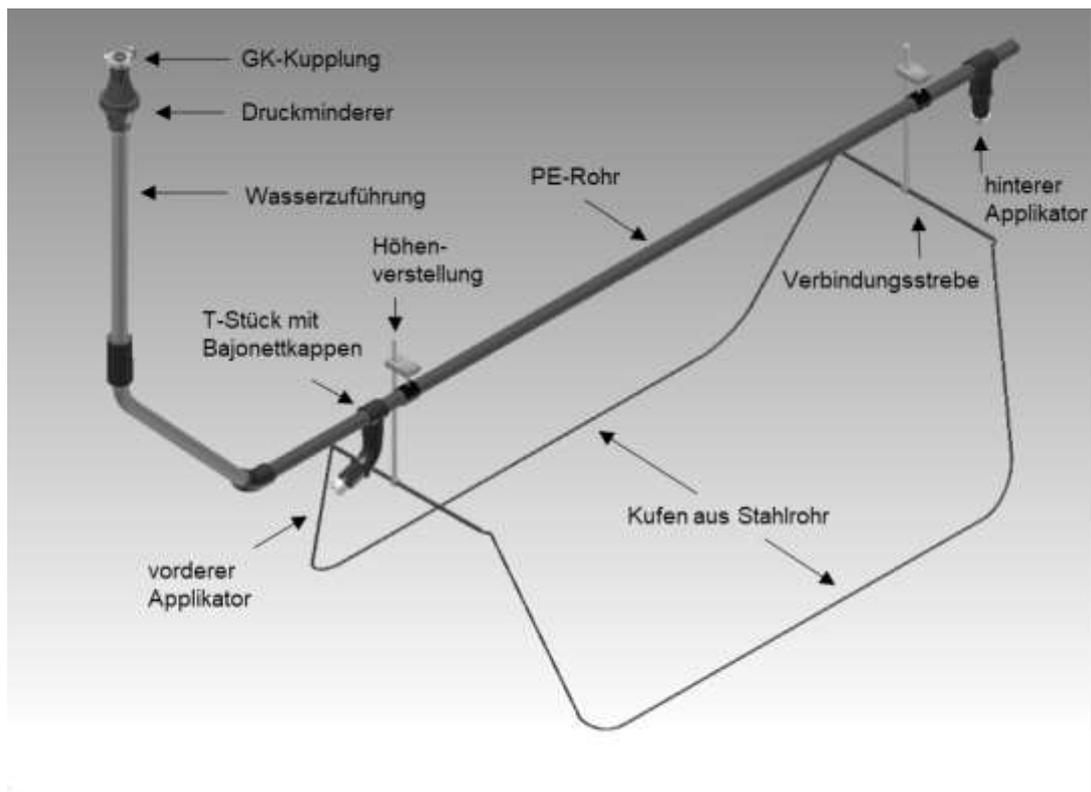


Abb. 27: CAD-Konstruktionszeichnung des Prototyps eines Dammschlittens [eigene Darstellung]

Die einzelnen Applikatoren können in verschiedenen Winkeln montiert werden. Auch die Teilung einer Gesamtwassergabe in Teilwassergaben unterschiedlicher Höhe ist möglich. Dabei kommen Applikatoren mit unterschiedlichem Durchfluss, aber einem ähnlichen Druckarbeitsbereich zum Einsatz.

4.3 Material und Methode des Feldversuchs

Im Mittelpunkt des Feldversuchs standen Untersuchungen zur Teilung der Wassergaben bei der Dammkronenberegnung mit dem Dammschlitten. Es wurden zwei Beregnungsvarianten getestet: die Beregnung mittels Einzelwassergabe (Typ 1) und die Beregnung mittels zweigeteilter Wassergabe (Typ 2). Dabei ging es um die zentrale Frage, ob eine zweigeteilte Wassergabe einer einzelnen Wassergabe bei der streifenförmigen Beregnung der Dammkronen überlegen ist. Im Fokus standen eine verbesserte Wasseraufnahme durch die Dammkrone, eine höhere Bodenfeuchte im durchwurzelten Bodenraum sowie eine verbesserte Bestandsentwicklung. Gleichzeitig sollte Erosion durch Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Verschlammung reduziert werden.

Die Feldversuche zur mehrteiligen Wassergabe fanden zwischen Mai und August 2015 auf dem Gelände der Versuchsanlage für Bewässerungs- und Solartechnik „Am Sande“ in Witzenhausen des Fachgebietes Agrartechnik (Leitung Prof. Dr. O. Hensel) statt. Die Untersuchungen der gewonnenen Bodenproben (Analyse der Korngrößenfraktionen) erfolgte im Bodenkundelabor des Fachgebiets Bodenkunde (Leitung Prof. Dr. S. Peth).

4.3.1 Standortbeschreibung

Die Versuchsanlage für Bewässerungs- und Solartechnik befindet sich in Witzenhausen in Nordhessen. Die Höhe über NN liegt zwischen 132 und 144 m, die Position im geografischen Koordinatensystem ist N 51° 20' 45.76" N/E 9° 51' 52.08". Das Gelände besteht aus terrassenförmig angelegten Parzellen, auf denen jährlich wechselnde Versuche stattfinden. In Abbildung 28 ist die Lage der Versuchsparzelle dargestellt.



Abb. 28: Lage der Versuchsparzelle 5 (weiß gestrichelte Umrandung) auf dem Versuchsgelände "Am Sande" [FG Agrartechnik, 2016]

Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt nach Angaben des Fachgebiets Agrartechnik (UNIVERSITÄT KASSEL, 1996) bei 8°C, die Jahresniederschlagssumme bei durchschnittlich 650 mm. Dem gegenüber steht mit ca. 420 mm eine durchschnittliche potentielle Verdunstung über Gras, wodurch die klimatische Wasserbilanz positiv ist. In Abbildung 29 sind die Klimadaten aus dem Versuchsjahr 2015 von der nächstgelegenen Wetterstation des Landesbetriebs Landwirtschaft Hessen (LLH) in Neu-Eichenberg dargestellt.

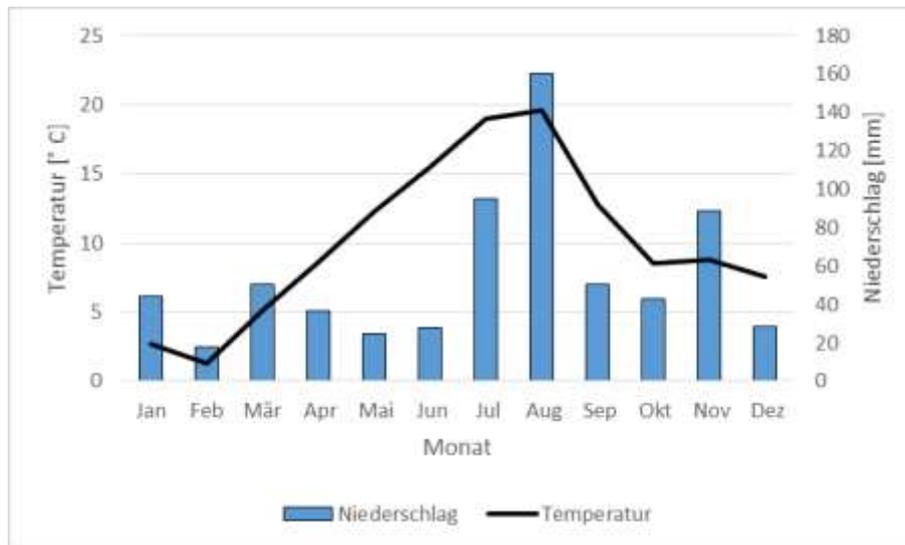


Abb. 29: Klimadaten 2015, Wetterstation Neu-Eichenberg [eigene Darstellung, basierend auf Daten des LLH, 2016]

Die Beregnungsversuche fanden an regenfreien Tagen statt. Bei trockener Witterung stieg tagsüber die Evaporation. Die Transpiration stieg mit der zunehmenden Entwicklung des Bestandes im Laufe des Versuchszeitraums. Zwischen den einzelnen Versuchen war die gesamte Versuchsparzelle natürlichen Niederschlägen ausgesetzt. Während der Messzeiträume wurden die Messpunkte auf den Dämmen durch eine Abdeckung (Folientunnel) vor Niederschlägen unmittelbar nach deren Einsetzen geschützt. Die Einflüsse von Beschattung und bodennahem Wind waren durch die Lage auf einer Terrasse gering.

Boden- und Wasserverhältnisse

Die Beschreibung der Bodenart auf dem Versuchsgelände basiert auf der Bodenschätzungskarte von Witzhausen und trägt die Kennzeichnung Sl 2 AL 50/50 (UNIVERSITÄT KASSEL, 1996). Danach handelt es sich bei der Bodenart um anlehmigen Sand mit 10 – 13 % abschlämmbaren Bodenbestandteilen, die aus jungen fluvialen Sedimenten bestehen. Bei den bodenkundlichen Feld- und Laboruntersuchungen aus dem Jahr 1995 wurden Daten an verschiedenen Stellen auf dem Versuchsgelände erhoben und ausgewertet, wobei eine Messstelle und ein Profil auf der Versuchsparzelle 5 lagen (UNIVERSITÄT KASSEL, 1996). In Tabelle 9 sind die relevanten Ergebnisse der bodenkundlichen Untersuchungen dargestellt.

Tab. 9: Bodendaten der Versuchspartelle 5 entsprechend der Horizontabfolge mit Angabe der Bodencharakteristika, Anteil der Kornfraktionen und Stufen der Durchlässigkeit [eigene Darstellung, basierend auf Daten des FG Kulturtechnik, 1996]

Horizont/Tiefe	Bodencharakteristik	Kornfraktion	k _f -Stufen
Ap 0 – 16 cm	schwach kiesiger, mittel lehmiger Sand; Krümelgefüge, zahlreiche Wurmlosungsaggregate	T: 13,3 U: 27,5 S: 89,1	k _f 5 sehr hoch
Ah 16 – 30 cm	schwach kiesiger, humoser, mittel lehmiger Sand, jedoch höhere Lagerungsdichte; schwach ausgeprägtes Plattengefüge; zahlreiche Makroporen, einzelne Carbonatkügelchen	-	k _f 6 äußerst hoch
M 30 – 55 cm	schwach kiesiger, mäßig bis schwach humoser Sand; carbonatfrei; enthält heterogenen Grobkies; Einzelkorngefüge wechselt mit Krümelgefüge mittlerer bis geringerer Lagerungsdichte, gut durchwurzelt zahlreiche Wurzel- und Regenwurmröhren, porös,	T: 9,0 U: 29,1 S: 61,9	k _f 5 sehr hoch
Bv 55 – 75 cm	scharf abgesetzte Schicht aus wechselnd tonigen, kiesigen Sand, mit Steinen; zahlreiche biogene Vertikalporen mit dunkelgrau-brauner Auskleidung und Umgebung durchziehen den Horizont und mildern seine Undurchlässigkeit	-	k _f 2 gering

Bei der Horizontabfolge handelt es sich nach Datenlage von 1995 des damaligen Fachgebietes Kulturtechnik im obersten Horizont um eine braune Auenboden-Braunerde, schwach pseudovergleyt. Bei der Korngrößenverteilung zeigt sich, dass Feinsand mit 28 - 30 % die höchsten Massenanteile der Kornfraktionen in den oberen Horizonten einnimmt. Es wurden minimale Carbonatgehalte (< 0,2 %) festgestellt. Die pH-Werte lassen eine Basensättigung des Kationen-Austausch-Komplexes von 60 - 90 % (mittel bis hoch) ableiten. Der Humusgehalt liegt bei 5,2 % im Ap- Horizont und bei 2 % im Ah- respektive M-Horizont. Die pF-Kurve ist identisch mit der kumulierten Porengrößenverteilung (vgl. UNIVERSITÄT KASSEL, 1996).

Der Oberboden weist eine hohe Infiltrationsrate auf. Die Minimalwerte der k_f-Werte in den unteren Bodenschichten (55 - 70 cm) liegen bei 10 cm/d. Die sehr hohen Werte in den oberen Horizonten bis 350 cm/d wurden bei den damaligen Untersuchungen auf kontinuierliche Makroporen zurückgeführt. Nach der Methodik des bodenkundlichen KA 4 (FINNERN et al., 1994) wurden vom Fachgebiet Kulturtechnik 1996 die k_f Stufen für jeden Horizont ermittelt. Aufgrund der relativen Verminderung der Leitfähigkeit in der darunterliegenden Bodenschicht kann es zu Stauwasserbildung in der Tiefe von 50 cm kommen (UNIVERSITÄT KASSEL, 1996).

Bodenbearbeitung und Pflegemaßnahmen

Auf der Versuchsterrasse 5 wurde der Boden mit einem Tiefengrubber (Fa. Rabe, Arbeitsbreite 2,5 m) mit Doppelherzscharen und Federzinkenegge mit nachlaufender Stabwalze vorbereitet. Im April 2015 wurden bei trockenem, sonnigem Wetter zehn Dämme mit der zweireihigen Dammfräse (Fa. Gruse) angelegt. Die Fräse arbeitete mit 540 Zapfwellenumdrehungen je Minute und zog zwei Dämme gleichzeitig. Die entstandenen Dämme wurden an den Oberflächen nicht

mit Blechen verfestigt und glattgezogen, sondern weisen eine krümlige, raue Oberfläche auf. In den folgenden vier Wochen setzten sich die Dämme um ca. drei Zentimeter. Im Mai 2015 wurde auf vier nebeneinanderliegenden Dämmen einreihig Möhre (*Daucus carota subsp. Sativus*) der Sorte Nantaise mit einer Sembdner-Handsämaschine einreihig (Abstand 3 cm, \pm 1 cm) ausgesät. Die Witterung war sonnig, der Boden trocken. Die Länge der Dämme entsprach mit 50 m der Länge der Versuchspartzele. Die Breite der Dammkrone sowie der Furchen betrug je 25 cm. Die Höhe der Dämme betrug ca. 30 cm. Durch natürliche Niederschläge und Beregnung verloren die Dämme im Beobachtungszeitraum zwischen April und August ihre ursprüngliche Höhe und Form. Sie flachten ab und wurden dabei runder und breiter. Auf den Versuchsdämmen kam keine Maschinenteknik zur Pflege der Versuchsbestände zum Einsatz, die Dämme wurden nicht angehäufelt. Die Eliminierung von Beikräutern fand auf dem Damm und in den Furchen ausschließlich mittels Handjäte im regelmäßigen Turnus statt.

4.3.2 Doppelschlitten als Applikationsmodul für den Feldversuch

Für die Beregnungsversuche wurde ein Doppelschlitten konstruiert. Dieser ermöglichte parallele Überfahrten über zwei Dämme gleichzeitig, wobei sich die Beregnungstypen unterschieden. Der Doppelschlitten bestand aus zwei einzelnen Dammschlitten, die über zwei Holzstreben fest miteinander verbunden waren und parallel bewegt werden konnten. Der Unterschied zwischen beiden Dammschlitten lag in der Position der beiden SprayMax[®]-Düsen am wasserführenden Rohr, wie aus Abbildung 30 hervorgeht. Mit dem einen Dammschlitten wurde eine einzelne Wassergabe (Beregnungstyp 1) simuliert und mit dem anderen Schlitten eine zweigeteilte Wassergabe (Beregnungstyp 2) appliziert.

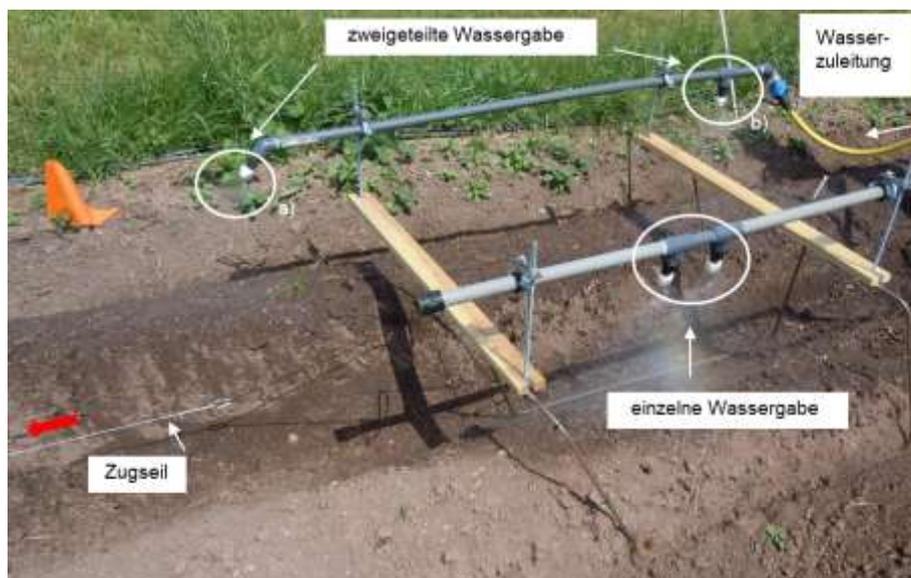


Abb. 30: Doppelschlitten bestehend aus zwei Dammschlitten: hinten im Bild mit zweigeteilter Wassergabe mit a) vorderer Düse und b) hinterer Düse, sowie vorne im Bild mit simulierter Einzelwassergabe [Foto D. Schwarz]

Vermessung der Benetzungsfläche

Für die Simulation der Einzelwassergabe wurden am wasserführenden PE - Rohr des Dammschlittens zwei Düsen (SprayMax[®]) mittig und nahe nebeneinander in einem 90° Winkel senkrecht zum Boden angebracht, um eine Beregnungsgabe gleicher Höhe wie bei der zweigeteilten Beregnungsgabe zu gewährleisten. Die Spritzbilder beider Düsen überlappten sich, so dass eine einzelne Wassergabe auf den Boden traf (siehe Abb. 31, vorne im Bild). Für die zweigeteilte Wassergabe wurden zwei Düsen (SprayMax[®]) montiert, wobei eine Düse am vorderen Ende des PE - Rohrs und eine Düse am hinteren Ende montiert wurden. Der Abstand zwischen den Positionen beider Düsen betrug 1,20 m, der Durchfluss je 2,2 l min⁻¹. Die Düsen unterschieden sich in der Stellung. Während die vordere Düse schräg nach vorne (40° Winkel) gestellt war, zeigte die hintere Düse senkrecht nach unten (90° Winkel). In Abbildung 31 (oben im Bild) sind die Spritzbilder der zweigeteilten Wassergabe dargestellt.

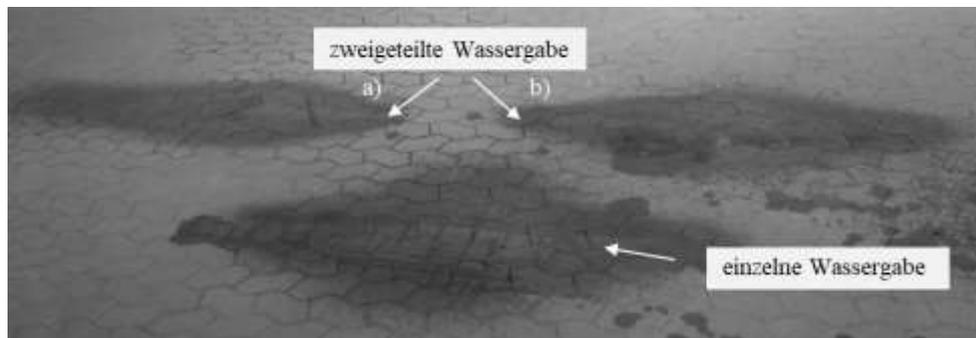


Abb. 31: Spritzbilder bei geteilter Wassergabe (oben im Bild): mit (a) vorderer Düse und (b) hinterer Düse, sowie Spritzbild bei simulierter Einzelwassergabe (unten im Bild) [Foto: D. Schwarz]

Mit dem gleichen Vorgehen wie bei Abb. 24 wurde der steinige Untergrund aus einer Höhe von ca. 40 cm benetzt. Die Vermessung der Benetzungsfläche der zweigeteilten Wassergabe ergab 0,78 m² (0,5 m² vordere Düse, 0,28 m² hintere Düse), die der Einzelwassergabe eine Benetzungsfläche von 0,33 m². Die daraus resultierenden Beregnungsintensitäten (bezogen auf eine Stunde, theoretischer Vergleichswert) betragen 800 l h⁻¹ m⁻² (Einzelwassergabe) und 338 l h⁻¹ m⁻² (zweigeteilte Wassergabe) bei einem Gesamtdurchfluss von je 4,4 l min⁻¹ (264 l h⁻¹).

Die Wasserversorgung des Doppelschlittens wurde aus dem Trinkwassernetz sichergestellt. Ein Schlauch aus flexiblen PVC-Gewebe wurde an einen Verteiler montiert, um beide Schlitten zu versorgen. Dem Verteiler war ein Druckminderer (1,4 bar) vorgeschaltet, um die einwandfreie Funktion der Düsen zu gewährleisten. Für die gleichförmige Bewegung (Einzug) wurde der Doppelschlitten an einem sechs Millimeter starken Zugseil aus Stahl aufgehängt. Die Seilwinde wurde von einem Elektromotor mit einer Spannung von 12 Volt angetrieben. Damit wurden mit einer permanenten Drehzahl auf der Antriebsachse und unterschiedlich großen Kettenrädern verschiedene Übersetzungen in sieben Stufen ermöglicht. Über die Stufen konnte die Geschwindigkeit reguliert werden (siehe Tab. 10).

Tab. 10: Übersicht über Ritzel, Geschwindigkeitsstufen und Wassergaben pro Dammschlitten (bei Montage von zwei Düsen des Typs SprayMax®)

Ritzel (Stufe)	Geschwindigkeit [m/h]	Wassergabe [mm]
1	145	9
2	98	14
3	71	19
4	50	26
5	43	31
6	38	35
7	33	40

Über die Wahl der Stufen bzw. der Einzugsgeschwindigkeit wurde die gewünschte Wassergabe (Applikationsmenge) für die Beregnungsversuche mit dem Doppelschlitten im Versuchsjahr 2015 eingestellt.

Vorversuch zur Verteilgenauigkeit des Doppelschlittens

In einem Vorversuch wurde die Verteilgenauigkeit bei der Wassergabe auf die Dammkrone durch den Doppelschlitten unter Feldbedingungen getestet. Außerdem wurde untersucht, ob es Unterschiede zwischen der simulierten Einzelwassergabe und der zweigeteilten Wassergabe in Bezug auf die Verteilgenauigkeit gibt und ob die Abweichungen in einem akzeptablen Bereich (< 10 %) liegen. Damit sollte sichergestellt werden, dass die im folgenden Feldversuch beschriebenen Messergebnisse miteinander vergleichbar sind.

Für die Messung der Wassermengen auf den Dammkronen wurden jeweils 12 Messgefäße (Fassungsvolumen 1.200 cm³) verwendet. Die Länge eines Messgefäßes betrug 20 cm und deckte in etwa die Dammbreite ab. Von den zwölf Messgefäßen pro Beregnungsvariante wurden je acht quer auf der Dammkrone sowie je vier Messgefäße quer in der benachbarten Furche platziert (siehe Abb. 32). Die Messgefäße wurden gruppiert aufgestellt, um Abweichungen der Geschwindigkeit beim Einzug des Dammschlittens aufgrund der Seilumwicklungen möglichst niedrig zu halten.

Es fanden fünf Überfahrten auf den Ritzeln 1, 3, 5, 6 und 7 statt. Dabei wurden Wassermengen zwischen 9 und 40 mm auf die Dammkronen aufgebracht. Nach jeder Überfahrt wurden die aufgefangenen Wassermengen mit einem Messbecher ausgelitert. Aus den Messwerten wurden Mittelwerte für jeden Beregnungstyp pro Wassergabe gebildet. Geringe Messfehler sind durch das Aufstellen der Messgefäße und durch Umwelteinflüsse entstanden. Da die Oberfläche der Dammkronen nicht waagrecht war, hatten einige Messgefäße eine leichte Schiefelage und wurden durch Steine stabilisiert.

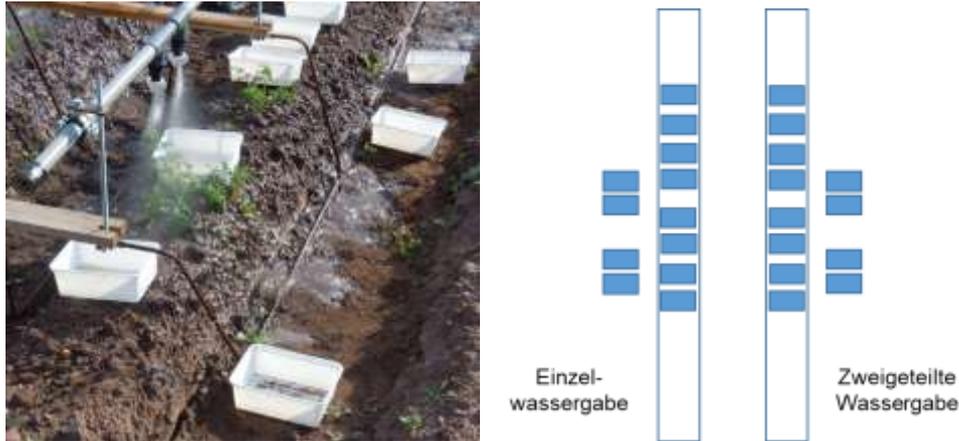


Abb. 32: Messung der Wassermengen mit Messgefäßen auf der Dammkrone und in den Dammfurchen bei einer simulierten Einzelwassergabe von 31 mm (Bild links), sowie schematische Darstellung der Aufstellung der Messgefäße (Bild rechts) [Foto links D. Schwarz, eigene Darstellung rechts]

Die Applikation auf die Dammkrone erfolgte sowohl bei zweigeteilter als auch bei der Einzelwassergabe jeweils mittig auf die Dammkrone. Dabei war die Verteilgenauigkeit auch in Längsrichtung des Damms auf der Dammkrone hoch. In den Messgefäßen wurden zwischen 90 und 96 % des Wassers aufgefangen. Lediglich bei der zweigeteilten Wassergabe wurden einige Tropfen (Wassermenge < 5 ml) in den Furchen aufgefangen. Ein vergleichsweise geringer Anteil wurde auf die Dammlanken appliziert. Im Mittel wurden in den Messgefäßen mehr Wasser bei der Applikation mittels Einzelwassergabe als bei der zweigeteilten Wassergabe aufgefangen. Die Abweichungen der aufgefangenen Wassermengen beider Berechnungsvarianten lagen zwischen 4,7 % und 9,8 %. Ein Grund für die Verteilgenauigkeit ist wahrscheinlich die Abdrift durch Wind der schräg gestellten vorderen Düse, wobei die Anfälligkeit bei stärkerer Schrägstellung höher ist (vgl. Kap. 4.2.1).

Zusammenfassend kann festgestellt werden: die unter Feldbedingungen erreichte Abweichung von < 10 % ist aus Sicht der Autorin akzeptabel. Der Doppelschlitten ist sowohl mit der Einzelwassergabe als auch mit der zweigeteilten Wassergabe gut geeignet, um vergleichbare Wassermengen mittig und gleichförmig auf die Dammkrone zu applizieren und kommt im folgenden Feldversuch als Applikationssystem zum Einsatz.

4.3.3 Versuchsanordnung Feldversuch 2015

Die Versuche fanden auf fünf nebeneinanderliegenden Dämmen auf der Versuchsparzelle 5 statt. Der in Abbildung 33 links abgebildete Damm 0 wurde nicht eingesät und im Rahmen der Versuche nicht beregnet, erhielt jedoch die gleiche Pflege wie die anderen vier Dämme. Teilweise diente er als Referenzdamm (Null-Variante), beispielsweise bei der Infiltrationsmessung.

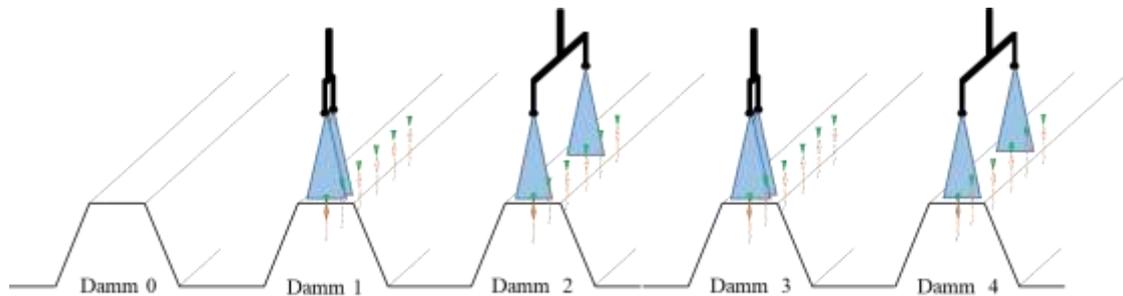


Abb. 33: Versuchsaufbau 2015 mit Beregnungsvarianten der Einzelwassergabe (Beregnungstyp 1: Damm 1 und 3) sowie der zweigeteilten Wassergabe (Beregnungstyp 2: Damm 2 und 4) [eigene Darstellung]

Die Dämme 1 bis 4 waren mit Möhren kultiviert und wurden beregnet. Der Unterschied lag in der Beregnungsvariante. Während Damm 1 und 3 mit einer Einzelwassergabe (Typ 1) beregnet wurden, erhielten Damm 2 und 4 eine geteilte Wassergabe bestehend aus zwei Teilwassergaben in gleicher Höhe (Typ 2). Bei den Überfahrten mit dem Doppelschlitten wurden immer Damm 1 mit Damm 2 und Damm 3 mit Damm 4 gleichzeitig beregnet. Auf allen beregneten Dämmen wurden die Wassergaben in jedem Versuch gleich hoch bemessen, um die Ergebnisse vergleichen zu können. Die Wassergabe variierte jedoch zwischen den Überfahrten (Versuchstagen). Insgesamt wurden zehn Überfahrten ausgewertet, die zwischen Juni und August 2015 stattfanden. Die Zeitpunkte mit den jeweiligen Beregnungsmengen sind aus Abbildung 34 zu entnehmen.

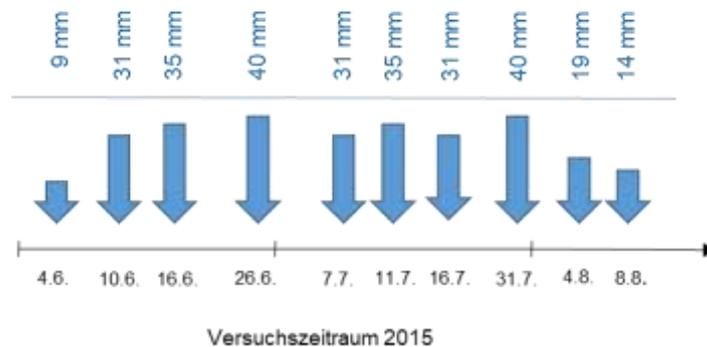


Abb. 34: Überblick über die von Juni bis August 2015 stattfindenden Überfahrten mit Angabe der Beregnungsmengen für die Beregnungsversuche zur zweigeteilten Wassergabe

Demnach gab es zwei variable Faktoren: die Berechnungsvariante (Typ 1, Typ 2) und die Höhe der Berechnungsgabe (eingestellt über die Einzugsgeschwindigkeit des Doppelschlittens). Die fünf Messtermine (siehe Tab. 11) wurden teilweise als variable Faktoren zur Datenanalyse herangezogen, wobei die Daten für jeden Messtermin einzeln analysiert wurden. Dafür wurden Damm 1 und Damm 3 zu Berechnungstyp 1 und Damm 2 und Damm 4 zu Berechnungstyp 2 zusammengefasst.

Tab. 11: Messtermine vor und nach jeder Überfahrt der Berechnungsversuche 2015

Messtermin 1	Messtermin 2	Messtermin 3	Messtermin 4	Messtermin 5
kurz vor der Beregnung	direkt nach der Beregnung	4 Stunden nach der Beregnung	24 Stunden nach der Beregnung	72 Stunden nach der Beregnung

Messschema und Messgrößen

Für die Messungen wurden die Dämme 0 bis 4 jeweils in sechs Segmente aufgeteilt. Jedes Segment wurde wiederum in drei Abschnitte unterteilt. Die Positionen der Messpunkte auf den jeweiligen Segmenten und Abschnitten (siehe Abb. 35) wurden randomisiert festgelegt.

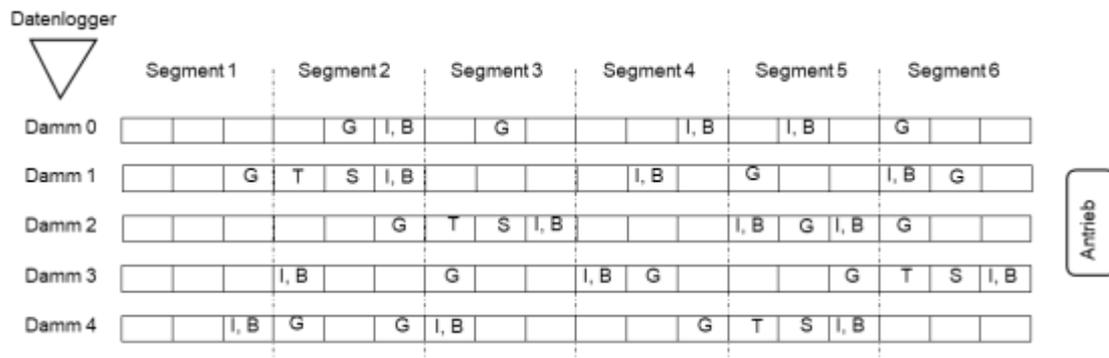


Abb. 35: Lage der Messpositionen für verschiedene Messgrößen auf den Dämmen 0 - 5 mit (B) Bodenfeuchte der Dammkrone, (I) Infiltration, (G) Bedeckungsgrad, (S) Bodenfeuchte im Dammkörper und (T) Saugspannung

Der volumetrische Wassergehalt (im Folgenden als Bodenfeuchte bezeichnet) auf der Dammkrone (B) und der volumetrische Wassergehalt (Bodenfeuchte) im Dammkörper in drei Tiefen (S) wurden bei jeder Überfahrt jeweils als Zeitreihe zu fünf unterschiedlichen Messterminen erhoben (siehe Tab. 11). Andere Messgrößen wurden nicht bei jeder Überfahrt, sondern lediglich an einem, zwei oder drei Messterminen erhoben: Bedeckungsgrad (G), Anteil der Vernässung in den Furchen bei hoher Wassergabe, WDPT-Test, Infiltrationsrate I und die Vermessung des Ernteguts. Die Entnahme von Bodenproben fand ebenfalls einmalig am Ende des Versuchszeitraums statt.

4.3.4 Datenerhebung zur Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm

Für die Untersuchungen zur Wasseraufnahme der Beregnungsgaben in der Dammkrone und im Dammkern wurden zum einen die Benetzungshemmung vor der Beregnung sowie die Bodenfeuchte vor und nach der Beregnung in festgelegten Zeitabständen ermittelt. Mit den Messungen sollte herausgefunden werden, ob eine zweigeteilte Wassergabe (Beregnungstyp 2) eine bessere Wasseraufnahme und damit eine höhere Bodenfeuchte in der Dammkrone und im durchwurzelten Bodenraum im Dammkörper bewirkt als eine Einzelwassergabe (Beregnungstyp 1) gleicher Höhe.

Mit den Messungen während des Messzeitraums von drei Tagen an fünf einzelnen Messterminen sollte eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Bodenfeuchte mit Bezug zum Beregnungstyp ermöglicht werden. Zusätzlich sollte herausgefunden werden, ob eine niedrigere Ausgangsbodenfeuchte vor der Beregnung einen geringeren Anstieg der Bodenfeuchte in der Dammkrone und der darunterliegenden 6 cm tiefen Bodenschicht zur Folge hat und ob die Teilung der Wassergabe und damit der Beregnungstyp darauf einen signifikanten Einfluss hat.

Bestimmung der Benetzungshemmung

Für die Bestimmung der Benetzungseigenschaft des Bodens im Feld wurde der Water Drop Penetration Time Test (WDPT – Test) angewandt. Dabei wird die Zeit gemessen, die zur vollständigen Infiltration von auf den Boden treffenden standardisierten Wassertropfen (100 μ l) benötigt wird. In dieser Zeit fällt der Kontaktwinkel auf $CA \leq 90^\circ$ (siehe Kap. 2.1.5). Ein hoher Wert beim WDPT-Test entspricht dabei einer hohen Neigung zur Benetzungshemmung. Für die Klassifizierung der Ergebnisse in Bezug auf die Infiltrationszeit (t_i) wird auf die Skala von DEKKAR/RITSEMA (1994) verwandeten Skala zurückgegriffen, nach der ein Boden bei $t_i < 5$ Sekunden gut benetzbar ist.

Für den WDPT-Test wurden drei Tropfen destillierten Wassers mit einer Standardpipette auf die Dammkrone gegeben und jeweils die Zeit gemessen, bis ein Tropfen vollständig infiltrierte.

Messung der Bodenfeuchte in der Dammkrone und im Dammkern

Die Bodenfeuchte auf der Dammkrone wurde als volumetrischer Wassergehalt [Vol. %] mit der Sonde ML3 Theta Probe der Firma Delta-T Devices (siehe Kap. 3.3.1.2) gemessen, indem sie mit den Messnadeln (Länge 6 cm) senkrecht in den Boden eingeführt wurde. Die Bodenfeuchte im Dammkörper wurde in drei Tiefen (10, 20 und 30 cm) pro Messplatz gemessen. Dafür wurden drei UMP - Sonden (UMP 1) der Firma Umweltgerätetechnik (UGT) eingebaut, die mit einem Datenlogger verbunden waren. Die UMP - Sonden ermittelten den volumetrischen Wassergehalt [Vol. %] aus der Messung der Dielektrizitätszahl. Die Genauigkeit bei der Messung des volumetrischen Wassergehalts wird vom Hersteller mit $\pm 2 \%$ angegeben. Beim Datenlogger kam die Software UGTlog 2.7 der Firma UGT zum Einsatz. Die Daten wurden ausgelesen und mit Minitab® ausgewertet.

Bei der Erhebung der Benetzungshemmung betrug $N = 9$. Die Mittelwerte der Dämme wurden entsprechend den Beregnungstypen zusammengeführt und gemittelt. Als Hypothesentest wurde ein einfacher t-Test gewählt, der mit der Software Minitab[®] berechnet wurde. Die Nullhypothese besagt, dass es keinen Unterschied zwischen den Mittelwerten gibt. Bei einem $p < 0,05$ (95 % KI) wird die Alternativhypothese gestützt. In diesem Fall hätte der Beregnungstyp einen signifikanten Einfluss auf die reale Benetzungshemmung zum Zeitpunkt der Messung.

Für die Darstellung der Ergebnisse aus der Messung der Bodenfeuchte als Balkendiagramm wurden als erstes die Differenzen zwischen den Messwerten nach der Beregnung und den Werten der Ausgangsbodenfeuchte vor der Beregnung gebildet. Aus je drei reduzierten Messwerten pro Messabschnitt wurde für jeden Messtermin ein Mittelwert gebildet. Anschließend wurden die drei Mittelwerte der drei Messabschnitte auf jedem Damm nochmals gemittelt, so dass jeder Damm von einem Mittelwert zum jeweiligen Messtermin beschrieben wurde. Je nach Zugehörigkeit zum Beregnungstyp wurde nochmals ein Mittelwert aus Damm 1 und 3 (Typ 1) sowie Damm 2 und 4 (Typ 2) gebildet.

Aus den Stichprobendaten der Messungen der Bodenfeuchte wurden zwei Teststatistiken gerechnet: eine ANOVA für die Bodenfeuchtwerte der Dammkrone und eine MANOVA für die Messwerte, die in unterschiedlichen Tiefen im Dammkörper erhoben wurden. Folgende Faktoren wurden getestet: Tiefe (3 Stufen: 10 cm, 20 cm, 30 cm), Wassermenge (6 Stufen: 9 mm, 14 mm, 19 mm, 31 mm, 35 mm, 40 mm) sowie Beregnungstyp (2 Stufen: Typ 1, Typ 2). Bei $p < 0,05$ (95% KI) der Teststatistik wird die Nullhypothese zurückgewiesen und ein statistisch signifikanter Einfluss des Beregnungstyps angenommen. Für die Messungen der Bodenfeuchte auf der Dammkrone und in drei verschiedenen Tiefen lautete die Nullhypothese für den durchgeführten Hypothesentest: die Mittelwerte der Änderungen der Bodenfeuchte der Beregnungsvarianten Typ 1 und Typ 2 unterscheiden sich nicht. Mit dem Hypothesentest sollte geprüft werden, ob beim Beregnungstyp 2 die die Bodenfeuchte im Mittel höher liegt als beim Beregnungstyp 1. Als grafische Darstellung wurden Fehlerbalken mit 95 % Konfidenzintervallen gewählt.

4.3.5 Datenerhebung zur Bodenerosion durch Wasser

Der Anteil des Wassers, der bei einer Beregnungsgabe auf die Dammkrone trifft und nicht von dieser aufgenommen werden kann, fließt von der Dammkrone über die Dammlanken in die Dammfurchen. Dabei werden feine Bodenpartikel von der Dammkrone in die Dammfurche umgelagert. Auf der Dammkrone kann es durch hohe Beregnungsgaben zur Schädigung der Bodenoberfläche durch Verschlammung und Verkrustung kommen.

Mit Beschreibung der Erosion wurden Oberflächenabfluss, Bodenabtrag sowie Verschlammung der Dammkrone untersucht. Damit sollte herausgefunden werden, ob eine zweigeteilte Wassergabe weniger Erosion bewirkt als eine Einzelwassergabe in gleicher Höhe.

Oberflächenabfluss von der Dammkrone in die Dammfurche

Die Wasserverluste auf der Dammkrone wurden durch die Vernässung der Dammfurche sichtbar gemacht. Eine relativ hohe Wassergabe sollte ein oberflächiges Abfließen des überschüssigen Wassers begünstigen. Die selbst entwickelte Methode basierte auf der Beobachtung, dass sich bei der Beregnung der Dammkrone durch hohe Wassergaben in den Furchen Feuchtemuster bildeten.

Für die Datenerhebung wurde ein Messrahmen (40 cm x 25 cm) aus Stahlrohr konstruiert, der die Breite einer Furche hat. Mit einer Digitalkamera wurden Fotos direkt nach der Beregnung (Höhe der Wassergabe 40 mm) aufgenommen und mit dem Bildverarbeitungsprogramm Paint.NET bearbeitet. Dazu wurden die trockenen Flächen weiß eingefärbt. Aus dem verbleibenden Bildflächenanteil wurde der Anteil [%] der Vernässung des Messrahmenausschnitts der Furche ermittelt (siehe Abb. 36).

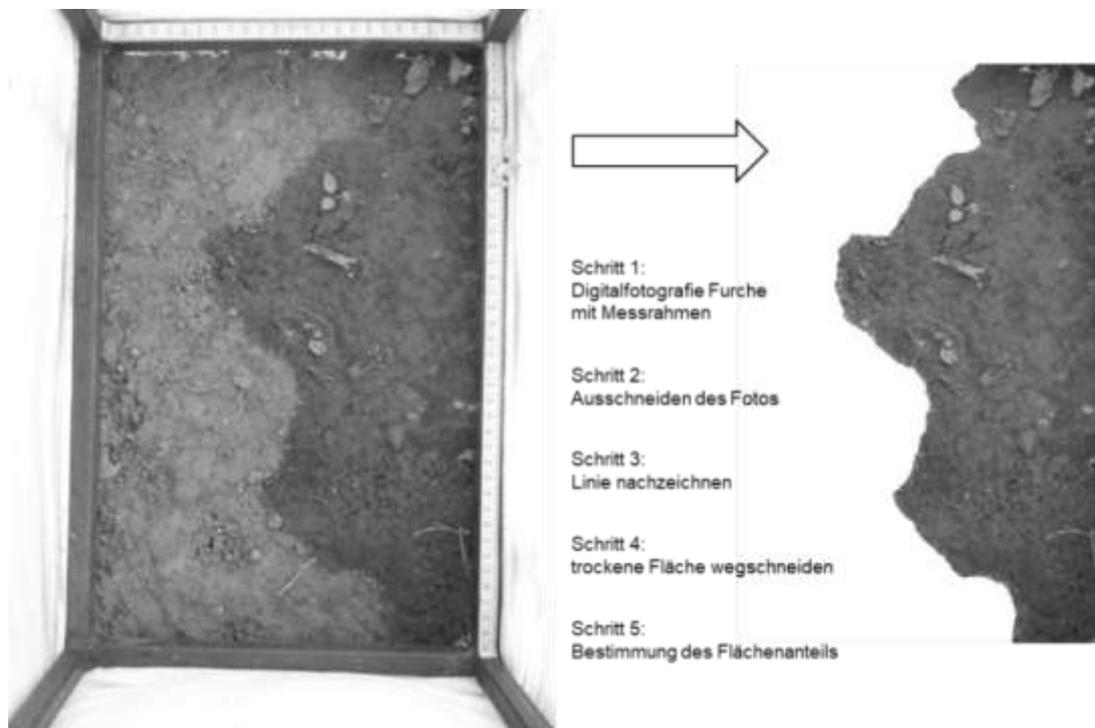


Abb. 36: Aufnahme mit Messrahmen in der Furche (Bild links), bearbeitetes Foto (Bild rechts) mit der Abfolge der Arbeitsschritte zur Bestimmung des nassen Flächenanteils in der Furche [eigene Darstellung, selbst entwickelte Methodik]

Insgesamt wurden sechs Messwiederholungen mit je fünf Einzelmessungen für beide Beregnungstypen durchgeführt, so dass der Stichprobenumfang $N = 30$ beträgt.

Feinbodenverlagerung von der Dammkrone in die Furche

Aus der Analyse der Korngrößenfraktionen von Bodenproben der Dammkronen und Furchen kann auf eine Feinbodenverlagerung geschlossen werden. Die Entnahme der Bodenproben fand nach Abschluss der Beregnungsversuche statt. Dabei wurden insgesamt 29 Proben an randomisiert ausgewählten Messpunkten mit einem Stechzylinder (\varnothing 57 mm, 100 cm³) entnommen: sieben Proben aus der Furche zwischen Damm 1 und Damm 2, sieben Proben von der Dammkrone von Damm 1 (Typ 1) sowie sieben Proben von der Dammkrone von Damm 2 (Typ 2). Zusätzlich wurden sieben Proben aus der Dammkrone von Damm 0 (ohne Beregnung) entnommen. Bei der Entnahme der Bodenprobe mit dem Stechzylinder wurde dieser lediglich die oberen 1,5 cm (bis zu einer Markierung) in den Boden gedrückt. Anschließend wurden die Proben als gestörte Proben ins Labor transportiert und untersucht.

Die Bestimmung der quantitativen Korngröße mittels Sieb- und Schlämmanalyse erfolgte in mehreren Teilschritten (nach DIN 18 123) wie folgt:

1. Die 29 Proben wurden gewogen und die Steine (> 2 mm) von den Anteilen (< 2 mm) im Boden mit einem Sieb (Lochgröße 2 mm) durch Siebung getrennt. Beide Anteile wurden gewogen und die Massen anschließend in Prozent (Massenanteile) umgerechnet.
2. Anschließend wurde mit den 29 Probenanteilen > 2 mm eine Siebanalyse durchgeführt. Dafür kamen Siebe mit verschiedenen Lochgrößen (\varnothing 16,0 mm; 8,0 mm; 6,3 mm; 5,0 mm; 2,5 mm) zum Einsatz. Auch hier wurden die Massen in Prozent (Massenanteile) umgerechnet.
3. Mit den 29 Probeanteilen < 2 mm wurde eine nasse Sieb- und Schlämmanalyse durchgeführt (siehe Abbildung 39). Dafür wurden 20 g des Feinbodens eingewogen und so lange einer H₂O₂ Behandlung zur Oxidation organischer Substanzen unterzogen, bis kein Aufschäumen mehr auftrat. Die Proben wurden bei 105° getrocknet und ausgewogen, anschließend dispergiert und 18 Stunden in einem Schüttler geschüttelt. Danach wurden die Proben durch einen Siebturm (630, 200, 63 und 20 μ m) gegeben. Jedes Sieb wurde so lange gespült, bis keine sichtbare Trübe hindurchlief. Die in den Sieben zurückgehaltenen und fraktionierten Korngrößenfraktionen ($> 0,02$ mm) wurden in Bechergläsern getrocknet und anschließend ausgewogen. Für die Schlämmanalyse der Partikel $< 0,02$ mm wurden die Flüssigkeiten der Proben in Atterbergzylinder überspült und so lange geschüttelt, bis die Suspension homogenisiert war. Die entsprechend ihrer Fallgeschwindigkeiten abgesetzte Mittel- und Feinststofffraktion wurde in ausgewogene Bechergläser überspült und die Trockenmasse ermittelt (siehe Abb. 37).



Abb. 37: Nasssievung (Bild links) und Schlämmanalyse der Feinbodenfraktion (Bild rechts) im Labor [Fotos D. Schwarz]

Mögliche Fehlerquellen sind neben der Probennahme im Feld (unterschiedliche Volumina) die Auswertung im Labor. Sowohl bei Sieb- als auch bei den Schlämmanalysen sind geringe Bodenverluste beim Umfüllen, Transportieren und Wägen nicht zu vermeiden. Aufgrund der unterschiedlichen Einwaagen der Proben konnten die Ergebnisse nur als Prozentanteile angegeben und miteinander verglichen werden. Die Messgenauigkeit der verwendeten Waage der Fa. Sartorius Excellence E2000D lag bei $\pm 0,001$ g.

Verschlämmung

Für die Untersuchungen zur Verschlämmung der Dammkronenoberfläche wurde das Infiltrationsvermögen vor und nach dem Versuchszeitraum erhoben. Die Verschlämmung der Bodenoberfläche führt zu einer verdichteten Schicht und damit zu einer geringeren Durchlässigkeit. Die hydraulische Leitfähigkeit eines Bodens lässt sich über die Infiltrationsrate I berechnen. Mit der Messung der Infiltrationsrate sollte untersucht werden, ob sich die Einzelwassergabe (Typ 1) nachteiliger auf die Oberflächenstruktur der Dammkrone und ihr Infiltrationsvermögen auswirkt im Vergleich zur zweigeteilten Beregnung (Typ 2). Außerdem sollte herausgefunden werden, ob ein Unterschied zur Infiltrationsrate eines nicht beregneten Damms (Nullvariante) sichtbar wird.

Zur Bestimmung der Infiltrationsrate wurde ein Minidisk-Infiltrimeter (Eigenbau, Glaswerkstatt Universität Kassel, siehe Abb. 38) genutzt. Das Minidisk-Infiltrimeter besteht aus Glas und ist in zwei Kammern unterteilt, die miteinander durch eine Glasröhre verbunden sind. Die obere, mit Wasser gefüllte Kammer kontrolliert den Druck. Mit einem beweglichen Rohr im Gummistopfen der oberen Kammer kann eine gewünschte Saugrate zwischen 0,5 und 7,0 cm angelegt werden. Das Wasser der unteren Kammer infiltriert durch eine gesinterte Kontaktplatte in den Boden.

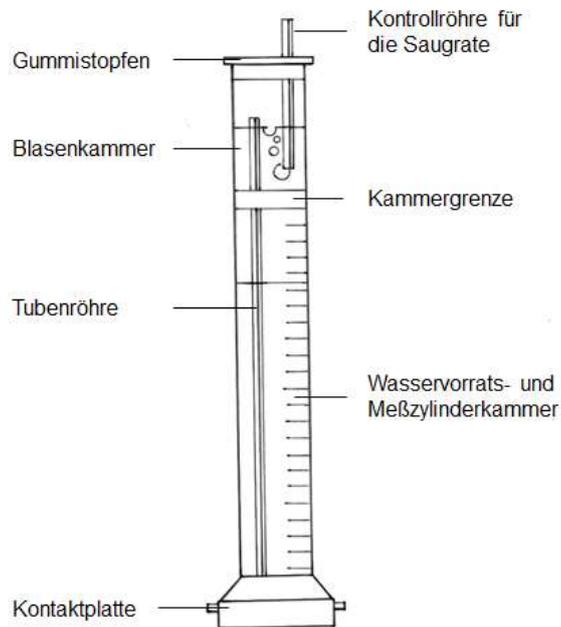


Abb. 38: Schematische Darstellung eines Minidisk-Infiltrometers [eigene Darstellung]

Am Ende des Messzeitraums wurde die Infiltrationsrate auf allen Dämmen bestimmt. Aus Abbildung 35 sind die exakten Messpositionen für die Erhebung der Infiltration auf den Dämmen zu entnehmen. Auf dem nicht berechneten Damm 0 wurden die Daten für die Nullvariante erhoben. Im Folgenden wird diese Nullvariante als Typ 0 bezeichnet.

Pro Messabschnitt wurden drei Messungen mit je drei unterschiedlichen Saugraten durchgeführt. Dabei wurde protokolliert, wieviel Wasser in einer bestimmten Zeit infiltrierte. Zur Berechnung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (k_{sat}) wurde in Microsoft Excel 2013 ein Makro erstellt. Darin konnten variable Parameter, wie beispielsweise der zeitliche Abstand zwischen den Ablesungen sowie die jeweiligen Bodenarten eingestellt werden. Das infiltrierte Volumen wurde in den jeweils gewählten Zeitabständen abgelesen und in das Makro übertragen. Dort wurde die kumulative Infiltration gegen die Quadratwurzel der Zeit als eine quadratische Funktion dargestellt.

Unter Nutzung der Gleichungen 6 und 7 wurde der Anstieg der quadratischen Funktion ($C1$) zur Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit genutzt:

$$I = C1 t + C2 \sqrt{t} \quad \text{Gleichung 6}$$

mit I als kumulative Infiltration (cm), t als Zeit (sec) und den Parametern $C1$ (cm/sec) und $C2$ (cm/Sec^{-0.5})

mit	I	kumulative Infiltration [cm]
	t	Zeit [sec]
	$C1$	Parameter [cm/sec]
	$C2$	Parameter [cm/sec ^{-0.5}]

Dabei hängt $C1$ von der hydraulischen Leitfähigkeit und $C2$ von der Sorptivität ab. Die hydraulische Leitfähigkeit wurde durch Gleichung 7 berechnet:

$$K_{unsat} = \frac{C1}{A} \quad \text{Gleichung 7}$$

mit	K_{unsat}	hydraulische Leitfähigkeit (ungesättigt) [cm/sec]
	A	Wert, der vom van Genuchten Parameter (bodentypspezifisch), der angelegten Saugrate und dem Radius der Kontaktplatte des Infiltrometers abhängt

Aus den Werten der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit wurde die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit berechnet. Dafür flossen je drei Werte der ungesättigten Leitfähigkeit (k_{unsat}) eines Messabschnitts (der mit drei unterschiedlichen Saugraten angelegt worden ist) in die Berechnung der gesättigten Leitfähigkeit (k_{sat}) ein, indem die ungesättigten Leitfähigkeiten gegen die Saugraten aufgetragen wurden. Aus der sich abzeichnenden logarithmischen Funktion wurde nach der Methode von ZHANG (1997) der Wert für die gesättigte Leitfähigkeit berechnet.

Datenauswertung und Statistik

Bei den Messungen zum Oberflächenabfluss betrug der Stichprobenumfang des Vernässungsgrades [% Flächenanteil] für beide Berechnungstypen $N = 30$. Als Hypothesentest wurde ein 2-Stichproben t-test gewählt und mit der Software Minitab[®] durchgeführt. Die Nullhypothese lautete: es besteht kein Unterschied zwischen den Mittelwerten beider Stichproben. Bei einem p-Wert von $p > 0,5$ (95% KI) der Teststatistik wird die Nullhypothese beibehalten. Die Darstellung der Mittelwerte beider Stichproben erfolgte als Fehlerbalken (95 % KI).

Mit den Daten aus den bodenkundlichen Erhebungen und Untersuchungen zur Feinbodenverlagerung wurde als Hypothesentest eine ANOVA für drei Stufen (Typ 0, Typ 1, Typ 2) gerechnet. Der Stichprobenumfang betrug für jede der drei Stufe $N = 7$, das Signifikanzniveau lag bei 5 %. Die Nullhypothese lautete: die Mittelwerte der Stichproben des Anteils der Feinbodenfraktionen der beiden Berechnungstypen (Typ 1, Typ 2) sowie der Nullvariante unterscheiden sich nicht. Die graphische Darstellung der Unterschiede zwischen den Mittelwerten erfolgte als Fehlerbalkendiagramm (95 % KI).

Bei den Versuchen zur Verschlämmung der Dammkrone durch eine verringerte Leitfähigkeit in der Dammkrone wurde als Hypothesentest eine ANOVA mit dem Faktor Berechnungstyp in drei Stufen gerechnet. Die Nullhypothese lautete: Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten von Typ 0, Typ 1 und Typ 2 sind nicht signifikant. Bei einem aus der Teststatistik resultierenden $p < 0,05$ (95 % KI) wird die Nullhypothese verworfen und ein signifikanter Einfluss des Berechnungstyps angenommen. Die Mittelwerte der berechneten Werte der gesättigten Leitfähigkeit der Nullvariante (Typ 0) sowie der Berechnungsvarianten (Typ 1, Typ 2) wurden als Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) dargestellt.

4.3.6 Datenerhebung zur Bestandsentwicklung der Möhre

Für die Erhebung der Bestandsentwicklung wurde der Bedeckungsgrad während des Versuchszeitraums dokumentiert und das Erntegut am Ende der Vegetationsperiode vermessen. Damit sollte untersucht werden, ob der Berechnungstyp einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung des Kulturbestands hat.

Ermittlung des Bedeckungsgrads

Für die Ermittlung des Bedeckungsgrads wurde ein selbst konstruierter Messrahmen genutzt, der die exakte Breite der Dammkrone (25 cm) hat. Der Messausschnitt betrug 1000 cm^2 . Mit einer Digitalkamera wurden senkrecht und aus gleicher Höhe (50 cm) Fotos an ausgewiesenen Messpositionen über den Versuchszeitraum aufgenommen (siehe Abb. 39).



Abb. 39: Messrahmen mit Digitalaufnahmen vom 16.6.15 (linkes Bild) und vom 8.8.15 (rechtes Bild) an der gleichen Position (siehe Stein als Referenz) [Fotos D. Schwarz]

In Abbildung 35 (Messschema) ist die genaue Lage der Messpositionen für den Bedeckungsgrad (B) zu entnehmen. Auf jedem Damm (1-4) befanden sich drei Messpositionen. Für die Abschätzung von Flächenanteilen gemäß der bodenkundlichen Kartieranleitung (AD HOC, 2005) wurden die Flächenanteile von drei Personen mit Hilfe der Vergleichsmuster geschätzt und die Werte für jede Messposition gemittelt. Mögliche Fehlerquellen liegen in der Aufnahmemethode selbst sowie beim Abschätzen der Bestandsdichte.

Vermessung des Ernteguts

Für die Vermessung des Ernteguts wurden je 25 Möhren von jedem Damm geerntet. Zuerst wurde jede Möhre im Ganzen gewogen, später in Spross und Wurzel getrennt. Die Länge wurde ebenfalls zuerst im Ganzen und dann getrennt in Spross und Wurzel gemessen. Außerdem wurden die Durchmesser der Wurzel beim Übergang zum Spross sowie an der dicksten Stelle aufgenommen. Mögliche Fehlerquellen liegen in der Messgenauigkeit der verwendeten Messinstrumente (Digitalwaage $\pm 0,2\%$) genutzt. Außerdem beziehen sich die Daten auf erntefeuchte Möhren, wobei feuchte Erde vom Wurzelkörper entfernt worden war.

Datenauswertung und Statistik

Mit einer ANOVA wurden die Stichproben (Stichprobenumfang $N=18$ pro Messtermin) des Bedeckungsgrades auf den Faktor Beregnungstyp (2 Stufen) getestet. Die Nullhypothese lautete: die Mittelwerte beider Stichproben unterscheiden sich nicht aufgrund des Beregnungstyps. Für den Vergleich der Mittelwerte des Ernteguts wurde der einfache t-Test als Hypothesentest durchgeführt. Bei einem p - Wert von $p > 0,05$ wird die Nullhypothese unterstützt. Der Stichprobenumfang bei der Vermessung des Ernteguts betrug $N=50$ mit dem variablen Faktor Beregnungstyp (2 Stufen). Die Nullhypothese lautete: es gibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten beider Stichproben. Die Konfidenz des Unterschieds der Mittelwerte wurde in einem Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) dargestellt. Dabei kam die Software Minitab® zum Einsatz.

4.4 Ergebnisse zur Teilung der Wassergabe

4.4.1 Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm

Benetzungshemmung

Die Ergebnisse des im Feld durchgeführten WDPT-Tests zu Beginn und zum Ende des Messzeitraums waren identisch. Die gemessene Infiltrationszeit t lag bei allen Messungen bei $t \leq 1$ sec. Alle Werte wurden der Klasse 0 = „wetable“ zugeordnet. Die Durchführung eines Hypothesentests entfiel, da die Mittelwerte beider Stichproben exakt den Wert 1 hatten.

Bodenfeuchte in der Dammkrone

Die Bodenfeuchte in der Dammkrone bzw. in den obersten sechs Zentimetern des Damms erhöhte sich nach allen Überfahrten, wobei sich die Höhe der einzelnen Beregnungsgaben unterschiedlich auswirkte. In Abbildung 40 sind die Änderungen der Bodenfeuchtegehalte (Differenz zwischen Ausgangsbodenfeuchtewert und Messwert) unterteilt nach Beregnungstyp 1 für die simulierte Einzelwassergabe (linksseitige, einfarbige Balken) und Beregnungstyp 2 für die zweigeteilte Wassergabe (rechtsseitige, schraffierte Balken) dargestellt. Dafür wurden die Daten der Überfahrten Ü1 (9 mm Wassergabe), Ü2 (31 mm), Ü3 (35 mm), Ü4 (40 mm) sowie Ü9 (14 mm) und Ü10 (19 mm) verwendet.

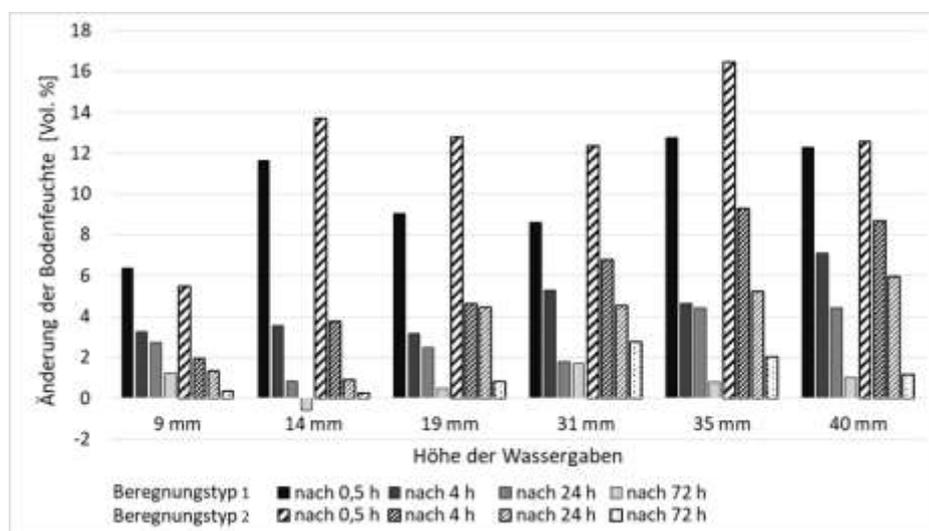


Abb. 40: Veränderungen der Bodenfeuchte im Versuchszeitraum von 72 Stunden bei unterschiedlich hohen Wassergaben (9 mm bis 40 mm), aufgegliedert in die Beregnungstypen Typ 1 (Einzelwassergabe) und Typ 2 (zweigeteilte Wassergabe)

Lediglich bei der Überfahrt Ü1 mit der geringsten Wassergabe (9 mm) und damit der höchsten Überfahrtgeschwindigkeit des Dammschlittens erreichte der Beregnungstyp 1 höhere Werte bei der Messung der Bodenfeuchte direkt nach der Beregnungsgabe und im Verlauf des gesamten Messzeitraums von drei Tagen (72 Stunden). Bei allen anderen Überfahrten mit höheren Wassergaben zeigten sich höhere Bodenfeuchtwerte beim Beregnungstyp 2 sowohl direkt nach der Wassergabe als auch im Verlauf des gesamten Messzeitraums. Nach 72 Stunden sanken die Bodenfeuchtwerte auf die Ausgangswerte (entspricht dem Wert Null im Diagramm) zurück oder blieben leicht über den Werten, die zu Versuchsbeginn gemessen wurden.

In Abbildung 41 sind die Mittelwerte von Beregnungstyp 1 und 2 für die drei niedrigen Wassergaben (hohe Überfahrtgeschwindigkeiten) im Fehlerbalkendiagramm (95% KI) dargestellt. Während bei einer Wassergabe von 9 mm der Mittelwert von Typ 1 höher als der Mittelwert von Beregnungstyp 2 ist, weisen die Mittelwerte von Typ 2 bei Wassergaben von 14 mm und 19 mm höhere Werte als bei Beregnungstyp 1 zu allen Messterminen auf.

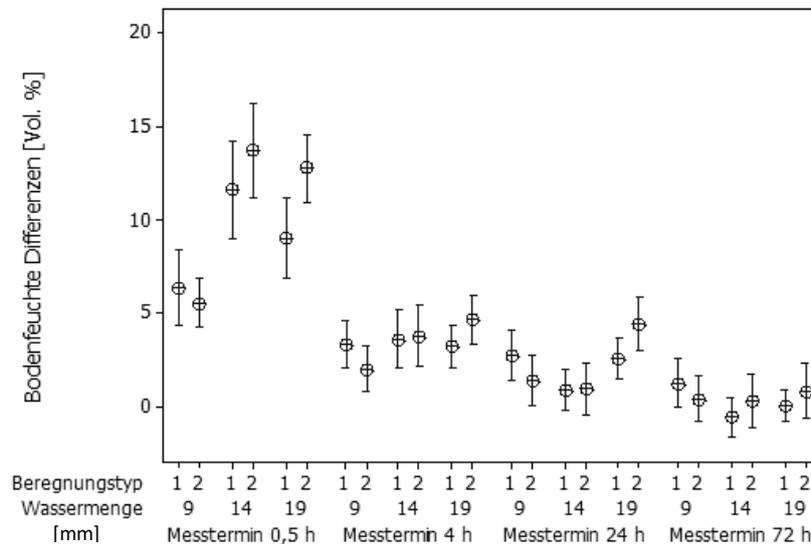


Abb. 41: Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) der Mittelwerte der Bodenfeuchte für niedrige Wassermengen (9 mm, 14 mm, 19 mm) zu vier verschiedenen Messterminen (0,5 h; 4 h; 24 h; 72 h nach der Beregnung)

In Abbildung 42 sind zum Vergleich die Mittelwerte der Bodenfeuchte an vier Messterminen als Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) dargestellt. Dabei standen hohe Beregnungsgaben (31 mm, 35 mm, 40 mm) im Mittelpunkt. Die Mittelwerte der Beregnungstypen Typ 1 und Typ 2 unterschieden sich, wobei der Mittelwert von Typ 2 (zweigeteilte Wassergabe) immer höher war als der Mittelwert von Beregnungstyp 1 (Einzelwassergabe).

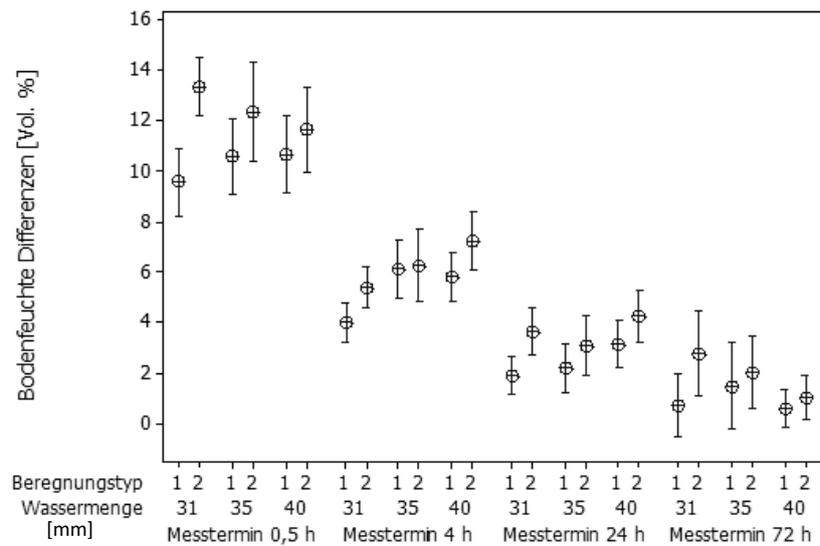


Abb. 42: Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) der Mittelwerte der Bodenfeuchte bei höheren Wassergaben (31 mm, 35 mm, 40 mm) zu vier verschiedenen Messterminen (0,5 h; 4 h; 24 h; 72 h nach der Beregnung)

Mit einer ANOVA wurden die Daten aus allen zehn Überfahrten auf Signifikanz zweier Faktoren (Typ, Wassermenge) getestet. Die Teststatistik für die ersten drei Messtermine (0,5 h; 4 h; 24 h nach der Beregnung) für den Faktor Beregnungstyp ergab $p < 0,05$. Die Nullhypothese wurde verworfen, ein signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten ist auf den Faktor Beregnungstyp zurückzuführen. Für den Messtermin 72 h nach der Beregnung betrug $p = 0,065$. Die Nullhypothese wurde angenommen, der Unterschied zwischen den Mittelwerten der Bodenfeuchte ist nicht auf den Faktor Beregnungstyp zurückzuführen. Für den Faktor Wassermenge ergab die Analyse $p < 0,001$ (Messtermine 0,5 h, 4 h, 24 h) und $p = 0,014$ (Messtermin 72 h). Die Nullhypothese wurde abgelehnt, der Faktor Wassermenge hat einen signifikanten Einfluss auf die Unterschiede zwischen den Mittelwerten beider Stichproben.

Bodenfeuchte im Dammkern

Die Bodenfeuchte im Dammkern wurde in den Tiefen 10 cm, 20 cm und 30 cm nach Überfahrten mit unterschiedlichen Beregnungsmengen (9 mm, 31 mm) erhoben und analysiert. Für die Vergleichbarkeit wurden in den Diagrammen (siehe Abb. 43 für die niedrige Wassergabe und Abb. 44 für die höhere Wassergabe) die Differenzen zu den Ausgangswerten der Bodenfeuchte vor der Beregnung als Änderungen der Bodenfeuchte über den gesamten Messzeitraum bis 72 Stunden nach der Beregnung dargestellt. Die Änderungen der Bodenfeuchte beim Beregnungstyp 1 lagen sowohl bei geringer (9 mm) als auch hoher (31 mm) Wassergabe bei < 1 Vol. %-Punkt. Beim Beregnungstyp 2 lagen die Änderungen der Bodenfeuchte bei der geringen Wassergabe ähnlich niedrig, bei Typ 2 etwas höher. Über den Messzeitraum nahmen die Differenzen zwischen Ausgangswert und Messwert mit der Zeit ab. Beim letzten Messtermin (nach 72 h) wurden jeweils die niedrigsten Bodenfeuchtwerte gemessen.

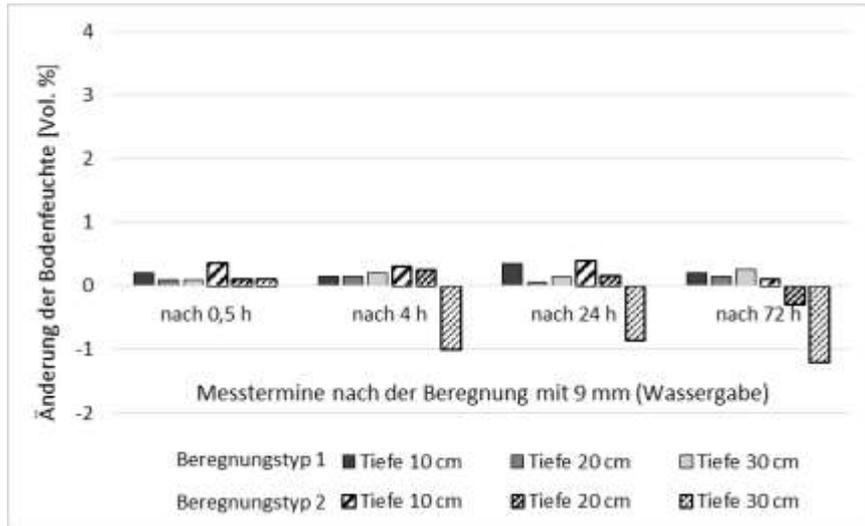


Abb. 43: Änderungen der Bodenfeuchte bei geringer Beregnungsgabe (9 mm) über vier Messtermine (0,5 h, 4 h, 24 h, 72 h nach der Beregnung) mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen 1 und 2

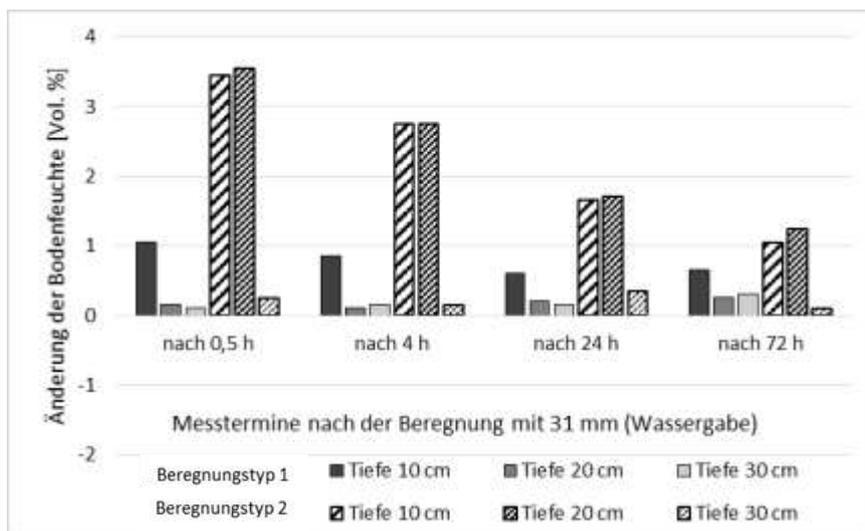


Abb. 44: Änderungen der Bodenfeuchte bei hoher Beregnungsgabe (31 mm) über vier Messtermine (0,5 h, 4 h, 24 h, 72 h nach der Beregnungsgabe) mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen 1 und 2

In den Abbildungen 45 und 46 sind die Änderungen der Bodenfeuchte in drei Tiefen für eine geringe Wassergabe (9 mm) und eine hohe Wassergabe (31 mm) dargestellt. Während sich bei der geringen Wassergabe die Bodenfeuchte im Dammkern in allen drei Tiefen kaum änderte, erhöhte sie sich bei der hohen Wassergabe in den Tiefen 10 und 20 cm um bis zu 3,5 Vol. %-Punkte (siehe Abb. 46). In der Tiefe von 30 cm wurden dagegen geringe Änderungen (< 0,5 Vol. %-Punkte) beobachtet. Die Bodenfeuchteänderungen wie auch die absoluten Messwerte der Bodenfeuchte nahmen im Messzeitraum über die gesamte Zeit ab.

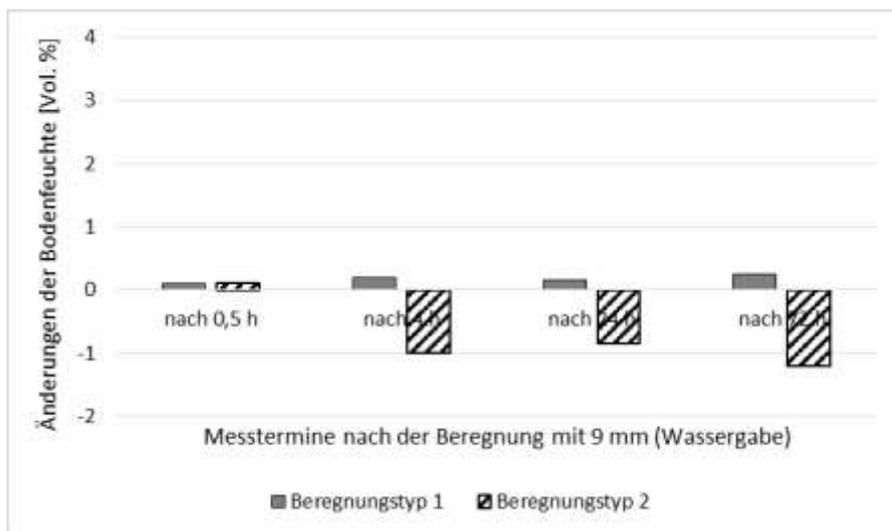
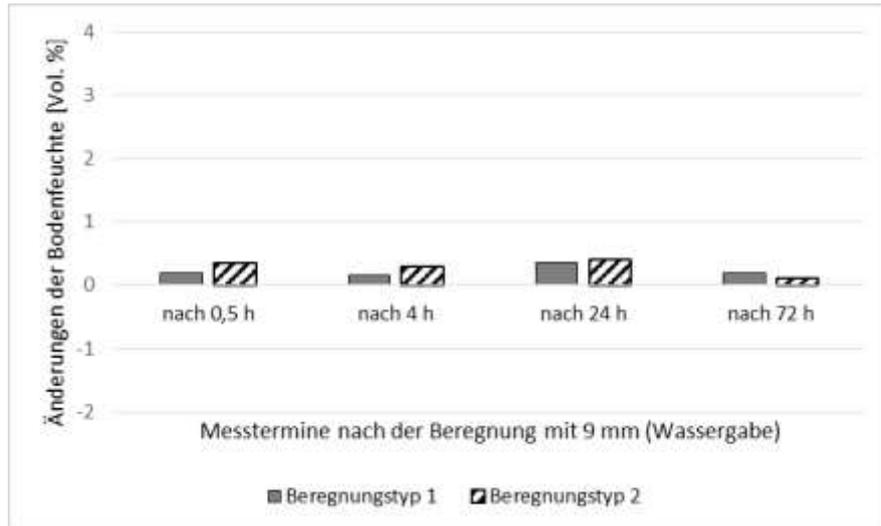


Abb. 45: Änderungen der Bodenfeuchte bei geringer Wassergabe (9 mm) in drei Tiefen (10 cm, Diagramm oben; 20 cm, Diagramm mittig; 30 cm, Diagramm unten) an vier Messterminen (0,5 h, 4 h, 24 h, 72 h nach der Beregnung)

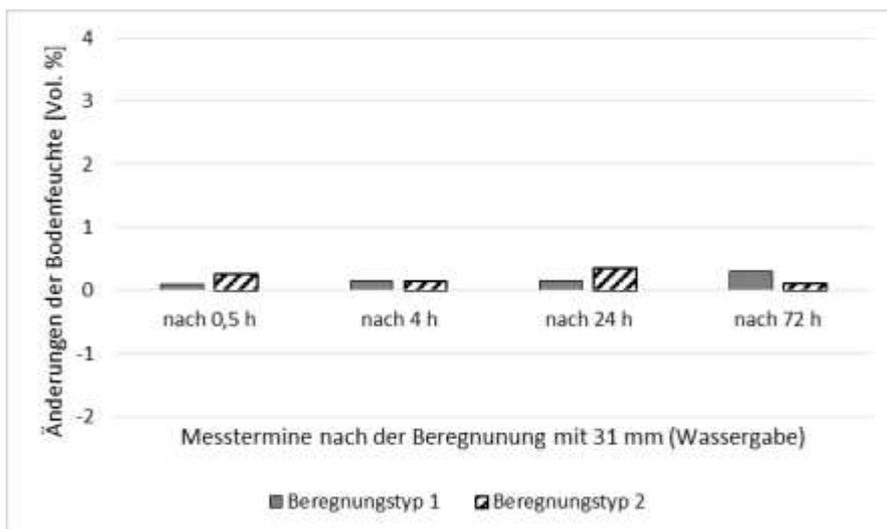
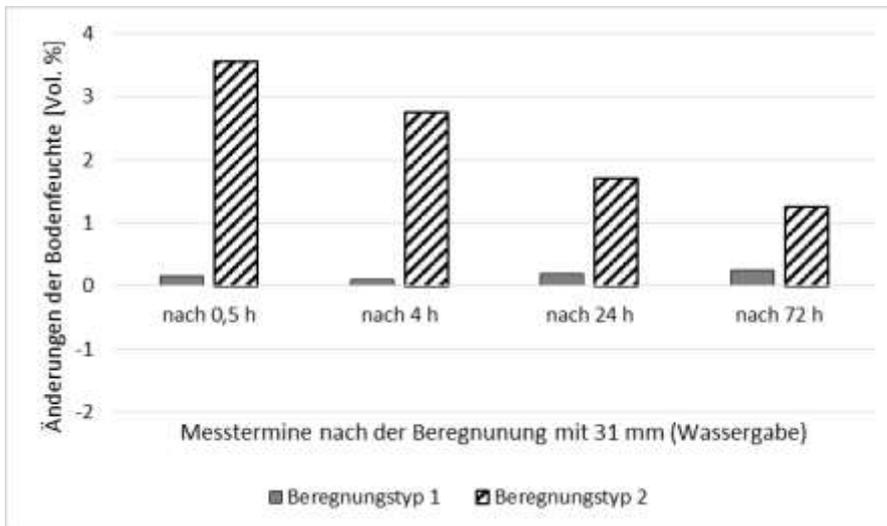
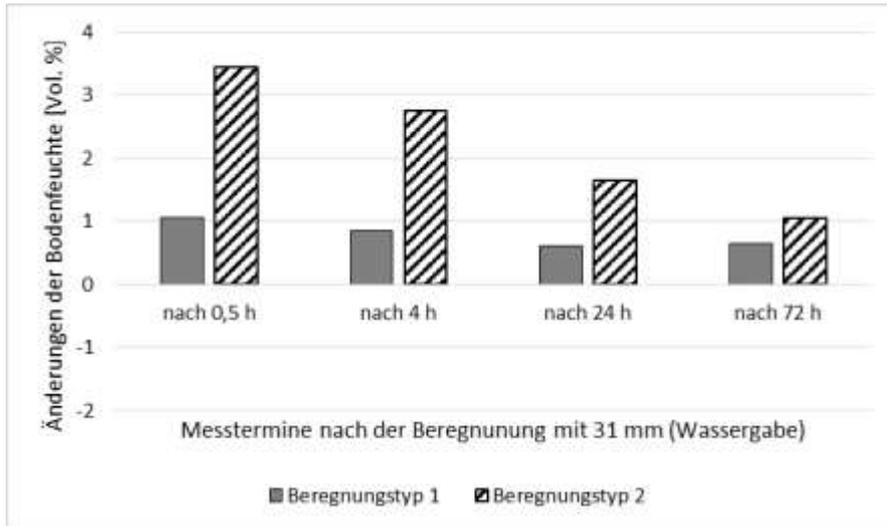


Abb. 46: Änderungen der Bodenfeuchte bei hoher Wassergabe (31 mm) in drei Tiefen (10 cm, Diagramm oben; 20 cm, Diagramm mittig; 30 cm, Diagramm unten) an vier Messterminen (0,5 h, 4 h, 24 h, 72 h nach der Beregnung)

Die Fehlerbalkendiagramme zeigen sowohl für die niedrige Wassergabe (9 mm, siehe Abb. 47) als auch für die hohe Wassergabe (31 mm, siehe Abb. 48) geringe Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Bodenfeuchte für die beiden Messtermine (0,5 und 72 Stunden nach der Beregnung) für den Beregnungstyp 1 und etwas stärkere Unterschiede für den Beregnungstyp 2.

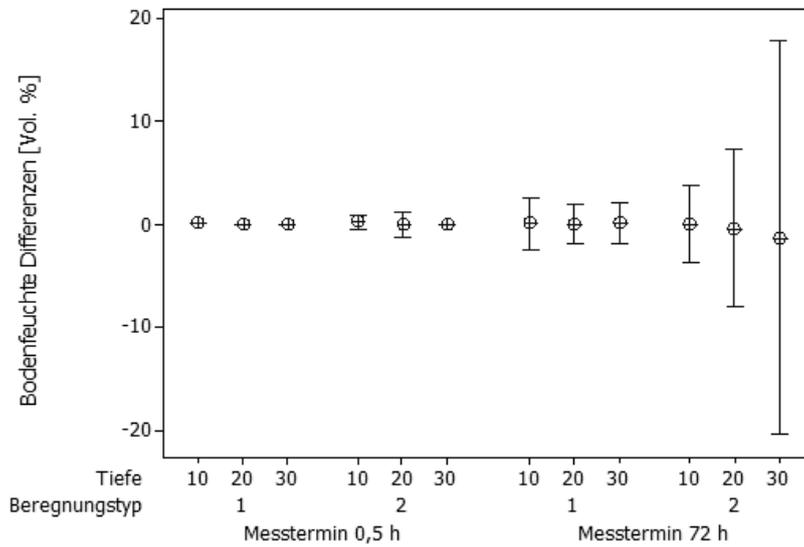


Abb. 47: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) für zwei Messtermine (0,5 h und 72 h nach der Beregnung) bei einer geringen Wassergabe (9 mm) in den Tiefen 10 cm, 20 cm und 30 cm für die Beregnungstypen 1 und 2

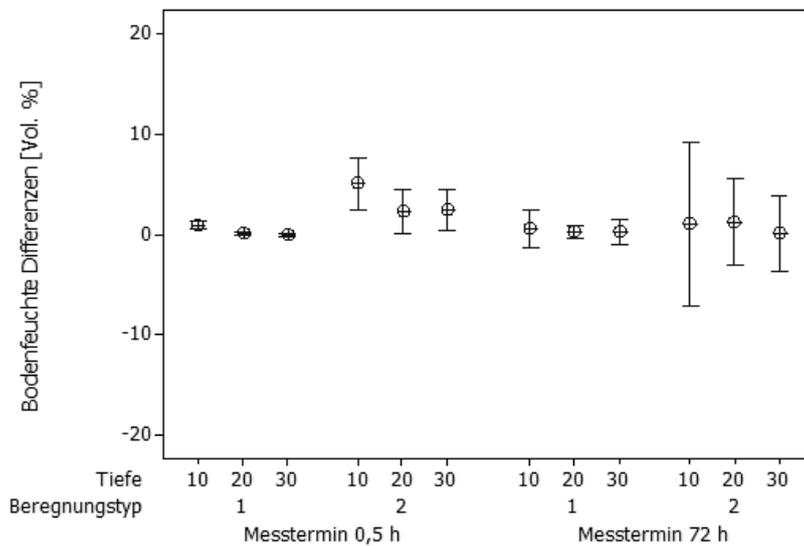


Abb. 48: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) für zwei Messtermine (0,5 h und 72 h nach der Beregnung) bei einer hohen Wassergabe (31 mm) in den Tiefen 10 cm, 20 cm und 30 cm für die Beregnungstypen 1 und 2

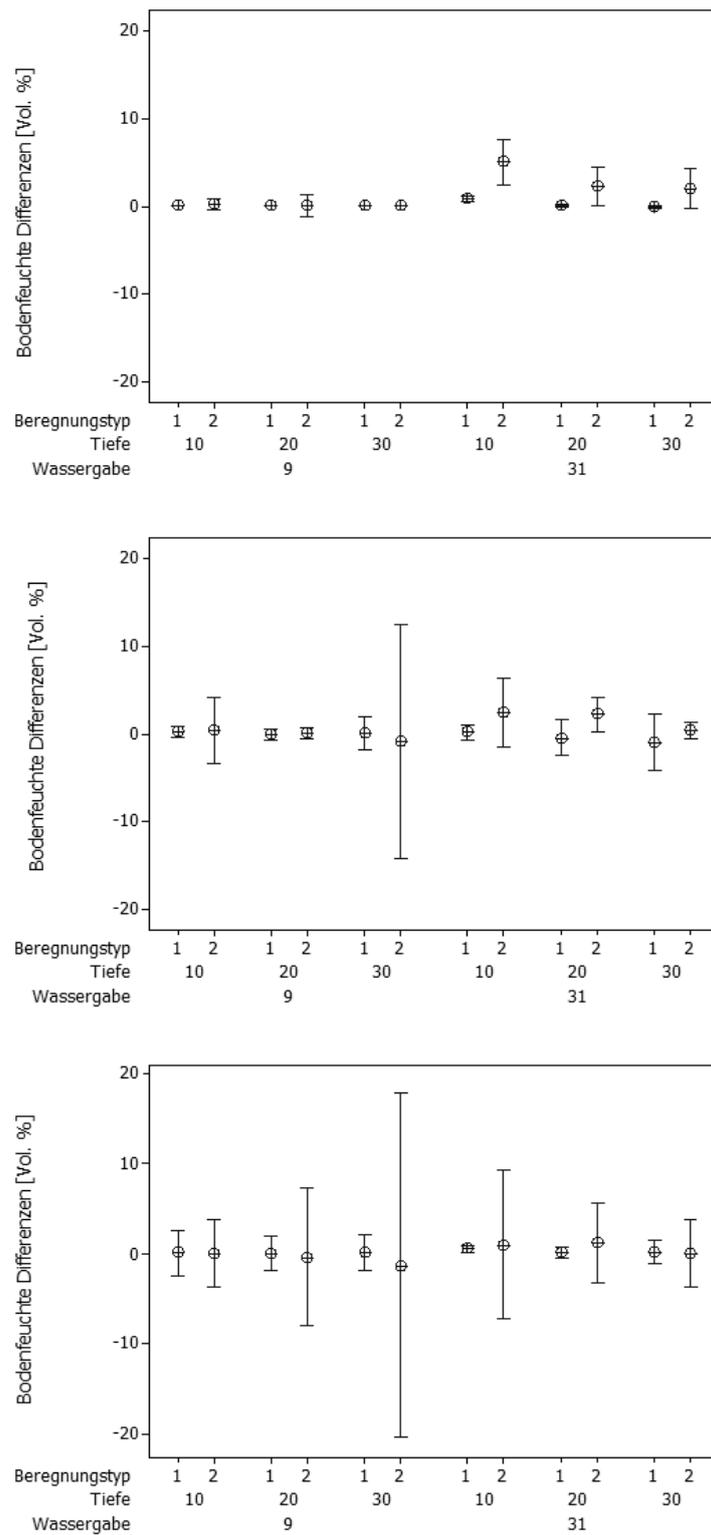


Abb. 49: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Mittelwerte der Bodenfeuchtedifferenzen für drei Messtermine nach der Beregnung (0,5 h, Diagramm oben; 24 h Diagramm mittig; 72 h Diagramm unten) mit Gegenüberstellung einer niedrigen Wassergabe (9 mm) und einer hohen Wassergabe (31 mm) und Unterscheidung der Beregnungstypen 1 und 2 in drei Tiefen (10 cm, 20 cm, 30 cm)

In Abbildung 49 sind die Fehlerbalken (95 % KI) für drei Messtermine (0,5 h, 24 h und 72 h nach der Beregnung) beispielhaft für eine niedrige Wassergabe (9 mm) und eine hohe Wassergabe (31 mm) gegenübergestellt. Während es bei der niedrigen Wassergabe kaum Unterschiede zwischen den Mittelwerten von Typ 1 und Typ 2 gibt, zeigt die Darstellung bei der hohen Wassergabe durchgehend höhere Werte bei Typ 2. Die stärksten Unterschiede traten bei der Messung direkt nach der Beregnung auf, während sich die Mittelwerte von Beregnungstyp 1 und 2 im Laufe des Messzeitraums annäherten.

Die statistische Analyse (MANOVA) mit den Faktoren Tiefe, Wassermenge sowie Beregnungstyp ergab bei allen Teststatistiken für die Faktoren Wassermenge und Beregnungstyp einen p - Wert von $p < 0,05$ (95 % KI). Die Nullhypothese wurde abgelehnt, die Faktoren Wassermenge und Beregnungstyp führten zu signifikanten Unterschieden zwischen den Mittelwerten der Messwerte zu allen Messterminen. Beim Faktor Tiefe waren die Unterschiede zu den Messpunkten 0,5 h und 4 h nach der Beregnung signifikant, im Verlauf des Messzeitraums nahm der Einfluss ab ($p > 0,05$ nach 24 bzw. 72 h).

Einfluss der Ausgangsbodenfeuchte auf die Wasseraufnahme

In den beiden folgenden Balkendiagrammen ist dargestellt, wie stark die Bodenfeuchte auf der Dammkrone bei unterschiedlichen Ausgangswerten an zwei Messterminen (0,5 h und 4 h) nach der Beregnung sank. Bei der Darstellung in Abbildung 50 betrug die Wassergabe 31 mm für alle drei Überfahrten. Dabei lagen die über jede Überfahrt gemittelten Ausgangswerte der Bodenfeuchte bei 10,2 Vol. % (1. Überfahrt), 11,9 Vol. % (2. Überfahrt) und 12,2 Vol. % (3. Überfahrt) relativ dicht beieinander.

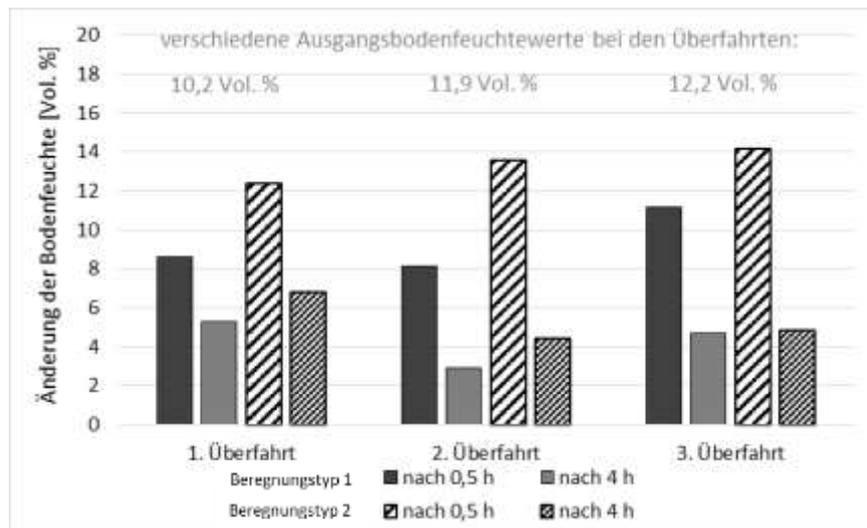


Abb. 50: Änderung der Bodenfeuchte in der Dammkrone bei drei Überfahrten (Wassergabe je 31 mm) mit drei verschiedenen Ausgangsbodenfeuchtwerten, dargestellt für den Beregnungstyp 1 (Einzelwassergabe) und den Beregnungstyp 2 (Zweigeteilte Wassergabe)

Beim Beregnungstyp 2 stiegen die Bodenfeuchtwerte in der Dammkrone bei allen drei Überfahrten stärker als beim Beregnungstyp 1. Die Änderungen der Bodenfeuchte (Differenz zwischen Ausgangswert und Messwert) bei der ersten Überfahrt mit dem geringsten Ausgangswert der Bodenfeuchte lagen niedriger als bei den leicht höheren Ausgangswerten. Bei allen Vergleichen lagen die Mittelwerte der Bodenfeuchtemesswerte von Beregnungstyp 1 niedriger als diejenigen von Typ 2 (siehe Abb. 50). Anders bei den beiden Überfahrten mit einer hohen Wassergabe von je 35 mm (siehe Abb. 51) dargestellt. Die beiden Ausgangswerte der Bodenfeuchte lagen bei 9,5 Vol. % (1. Überfahrt) und 14,2 Vol. % (2. Überfahrt). Damit ergibt sich ein Unterschied zwischen beiden Ausgangswerten von 4,7 Vol. %-Punkten.

Auch bei den Überfahrten mit der höheren Wassergabe lagen die gemittelten Werte von Beregnungstyp 2 höher als bei Beregnungstyp 1. Die Differenz zu den gemessenen Werten lag beim geringsten Wert der Ausgangsbodenfeuchte (1. Überfahrt) sowohl beim Beregnungstyp 1 als auch bei Beregnungstyp 2 höher. Der Boden mit der höheren Ausgangsbodenfeuchte (2. Überfahrt) nahm sowohl bei Typ 1 als auch bei Typ 2 vergleichsweise weniger Wasser auf. Aus beiden Balkendiagrammen geht hervor, dass der Beregnungstyp 1 im Vergleich zum Beregnungstyp 2 bei allen Überfahrten eine stärkere Zunahme der Bodenfeuchte bewirkte.

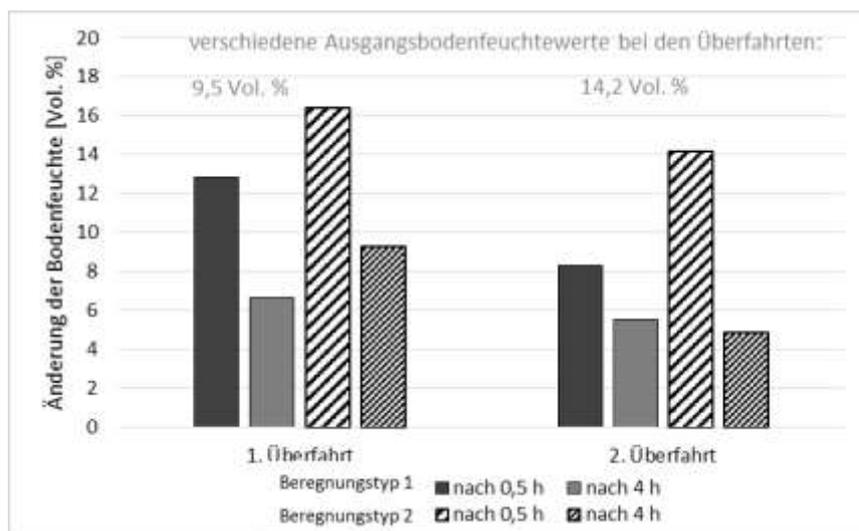


Abb. 51: Änderung der Bodenfeuchte in der Dammkrone bei zwei Überfahrten (Wassergabe je 35 mm) mit zwei verschiedenen Ausgangsbodenfeuchtwerten, dargestellt für den Beregnungstyp 1 (Einzelwassergabe) und den Beregnungstyp 2 (Zweigeteilte Wassergabe)

Im Fehlerbalkendiagramm (95% KI) in Abbildung 52 sind die Unterschiede der Mittelwerte bei geringen Differenzen zwischen den Ausgangswerten der Bodenfeuchte für die Überfahrten Ü1 bis Ü3 dargestellt. Die ANOVA für den Faktor Überfahrt ergab bei sehr geringen Differenzen der Ausgangsbodenfeuchte zwischen den drei Überfahrten $p < 0,05$ (Messtermin 0,5 h) und $p > 0,05$ (Messtermin 4 h). Die Nullhypothese wird beibehalten. Der Faktor Beregnungstyp hat keinen signifikanten Einfluss auf die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Bodenfeuchte.

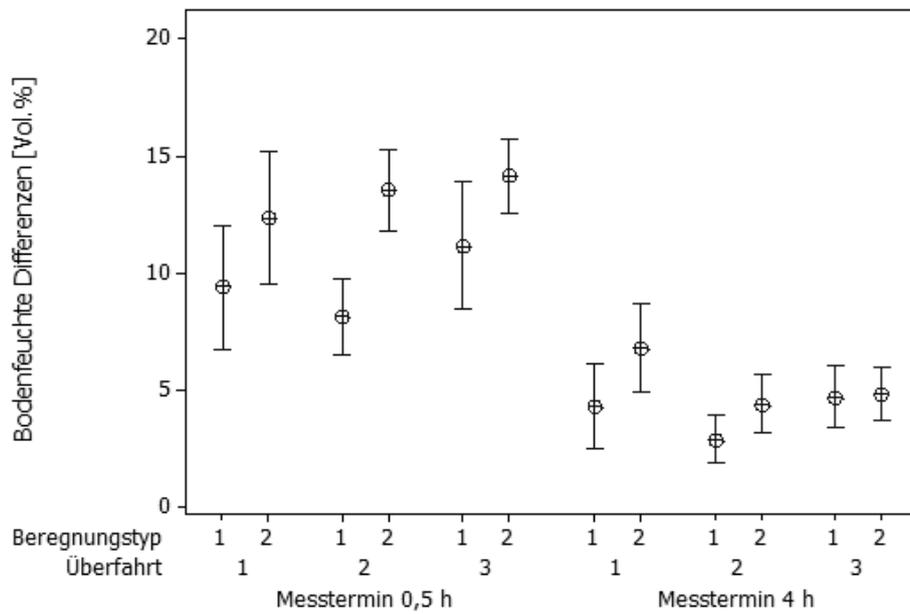


Abb. 52: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Mittelwerte der Änderung der Bodenfeuchtedifferenzen an zwei Messterminen (0,5 h, 4 h nach der Beregnung) für die Wassermenge von 31 mm bei drei Überfahrten mit jeweils unterschiedlichen Ausgangsbodenfeuchtwerten ($\bar{Ü}_1 = 10,2$ Vol. %; $\bar{Ü}_2 = 11,9$ Vol. %; $\bar{Ü}_3 = 12,2$ Vol. %)

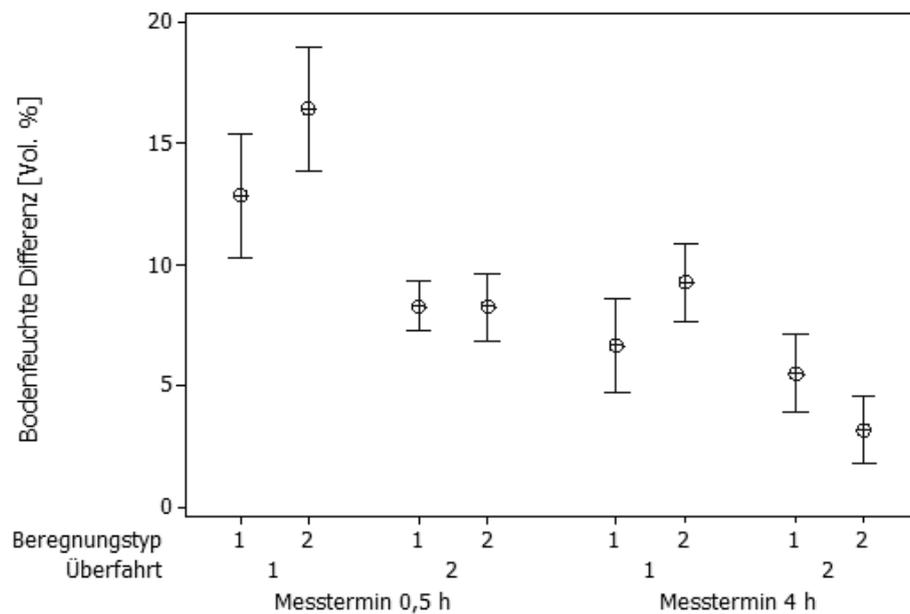


Abb. 53: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Mittelwerte der Änderung der Bodenfeuchtedifferenzen an zwei Messterminen (0,5 h, 4 h nach der Beregnung) für die Wassermenge von 35 mm, bei zwei Überfahrten mit jeweils unterschiedlichen Ausgangsbodenfeuchtwerten ($\bar{Ü}_1 = 9,5$; $\bar{Ü}_2 = 14,2$ Vol. %)

Anders bei den Überfahrten mit der größeren Differenz (4,7 Vol. %) zwischen den Werten der Ausgangsbodenfeuchte: Hier lag der p - Wert für beide Messtermine $p < 0,001$. Der Faktor Beregnungstyp hat damit einen signifikanten Einfluss auf die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Bodenfeuchtwerte. Die Mittelwerte wurden im Fehlerbalkendiagramm (95 % KI) als Differenzen der Bodenfeuchte in Abbildung 53 dargestellt.

4.4.2 Bodenerosion durch Wasser

Oberflächenabfluss

Die Vernässung der Furchen, ausgedrückt als vernässter Flächenanteil (bezogen auf die Fläche des Messrahmens), unterschied sich je nach Beregnungstyp. Während bei der Einzelwassergabe (Typ 1) der Mittelwert bei 67,4 % Flächenanteil lag, betrug er bei der zweigeteilten Wassergabe (Typ 2) 47,6 % Flächenanteil. Die Teststatistik ergab einen p - Wert von $p < 0,0001$. Die Nullhypothese wurde verworfen. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten der vernässten Flächenanteile der Beregnungstypen Typ 1 und Typ 2 ist signifikant.

Abtrag von Feinboden von der Dammkrone in die Dammfurche

Die Korngrößenanalysen der Bodenproben der Dammkrone zeigen Unterschiede zwischen der nicht beregneten Nullvariante und den beiden beregneten Varianten. Den größten Anteil hat in allen drei untersuchten Stichproben der Sand (dunkelgrau) gefolgt von Schluff (mittelgrau) und Ton (hellgrau). Die einzelnen prozentualen Anteile sind in Abbildung 54 dargestellt. Mit Blick auf den Tonanteil ist dieser bei der Nullvariante etwas höher als bei den beregneten Varianten.

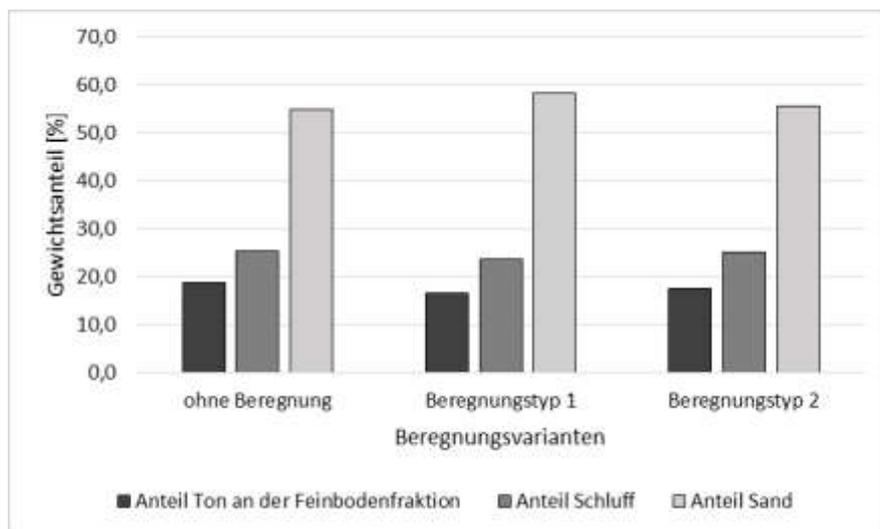


Abb. 54: Darstellung der Mittelwerte der Anteile von Sand, Schluff, Ton am Feinboden bei unterschiedlichen Beregnungsvarianten (Nullvariante ohne Beregnung, Einzelwassergabe Typ 1, Zweigeteilte Wassergabe Typ 2)

In Abbildung 55 sind die Fehlerbalken (95 % KI) der Stichproben mit den Mittelwerten für die drei untersuchten Beregnungstypen (Typ 0, Typ 1, Typ 2) dargestellt. Die Testgrafik lässt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten vermuten.

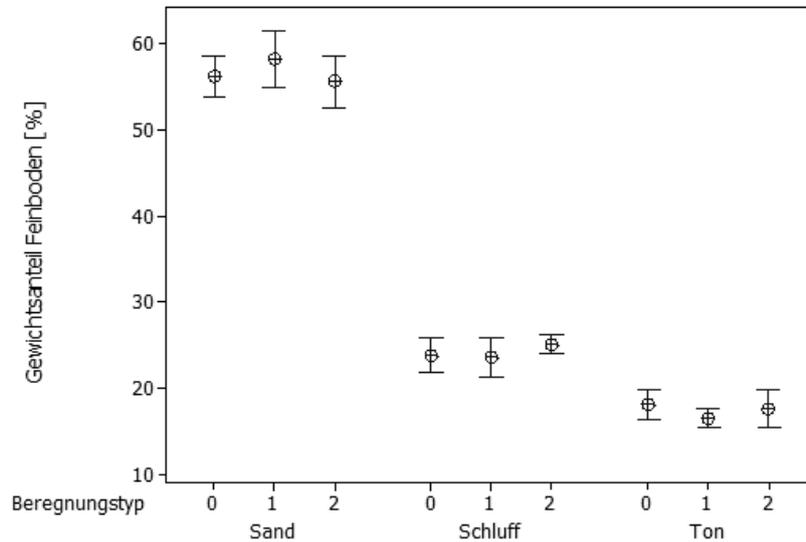


Abb. 55: Fehlerbalkendiagramm (95% KI) der Anteile der Feinbodenfraktion (Sand, Schluff, Ton) bei unterschiedlichen Beregnungsvarianten (Nullvariante Beregnungstyp 0, Einzelwassergabe Typ 1, Zweigeteilte Wassergabe Typ 2)

Die Ergebnisse der Teststatistik (ANOVA) zeigen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Stichproben vom Beregnungstyp 1 und Typ 2 sowie der nicht berechneten Variante Typ 0 vorlagen. Der p – Wert lag bei allen Fraktionen $p > 0,05$ (Tonfraktion $p = 0,130$; Schluff-Fraktion $p = 0,213$; Sandfraktion $p = 0,167$). Die Nullhypothese wurde beibehalten, die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Stichproben sind nicht signifikant und lassen sich nicht auf den Faktor Beregnungstyp (Typ 0, Typ 1 und Typ 2) zurückführen.

Verschlämmung der Dammkrone

Die Ergebnisse der Infiltrationsmessung und der anschließenden Berechnung der gesättigten Leitfähigkeiten zeigten geringfügige Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Berechnungstypen Typ 0, Typ 1 und Typ 2. In Abbildung 56 sind die Mittelwerte der gesättigten Leitfähigkeiten als Fehlerbalkendiagramm (mit 95 % KI) dargestellt.

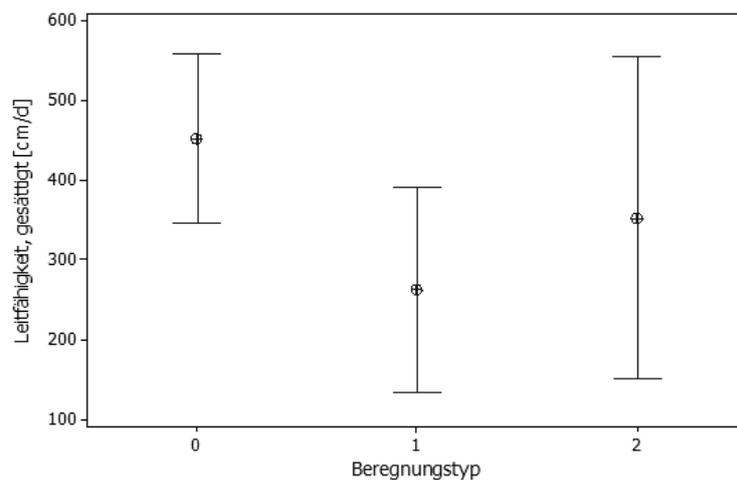


Abb. 56: Darstellung der Fehlerbalken (95% KI) der Mittelwerte der Messwerte der gesättigten Leitfähigkeit bei unterschiedlichen Berechnungsvarianten (Nullvariante ohne Beregnung als Typ 0, Einzelwassergabe als Typ 1, zweigeteilte Wassergabe als Typ 2)

Mit hydraulischen Leitfähigkeiten von 260 cm d^{-1} (Typ 0), 353 cm d^{-1} (Typ 1) und 453 cm d^{-1} (Typ 2) liegen die Mittelwerte relativ nahe beieinander. Die statistische Analyse (ANOVA) ergab $p = 0,222$. Die Nullhypothese wird beibehalten. Der Beregnungstyp hat keinen signifikanten Einfluss auf die Unterschiede der Mittelwerte der berechneten gesättigten Leitfähigkeit.

4.4.3 Bestandsentwicklung der Möhre

Bedeckungsgrad

Während der Bedeckungsgrad im Juni nach dem Auflaufen der Möhre noch sehr gering war, nahm er im Laufe des Versuchszeitraums zu. An allen drei Messterminen war die Bestandsdichte bei Typ 2 höher als bei Typ 1. Im Fehlerbalkendiagramm (KI 95 %) in Abbildung 57 sind die Mittelwerte beider Stichproben dargestellt. Der Unterschied zwischen den Mittelwerten nahm im Verlauf des Messzeitraums zu.

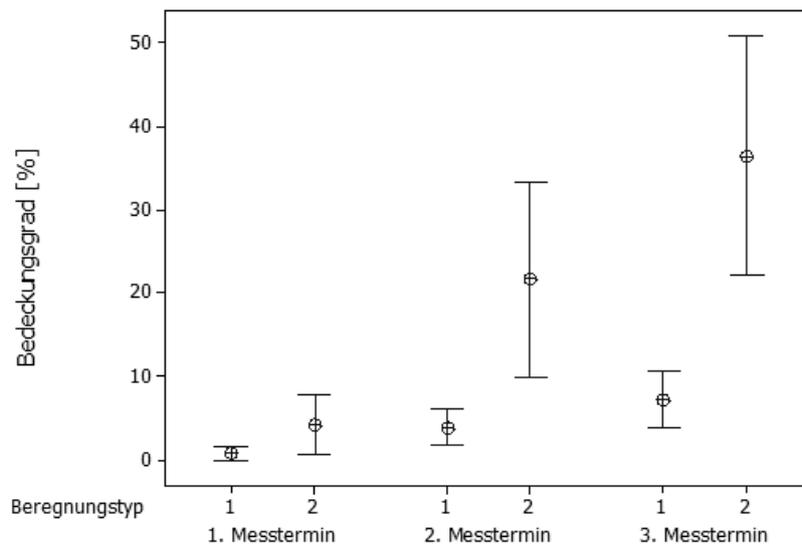


Abb. 57: Darstellung der Fehlerbalken (95% KI) der Mittelwerte für den Bedeckungsgrad an drei Messterminen für den Beregnungstyp 1 (Einzelwassergabe) und Beregnungstyp 2 (zweigeteilte Wassergabe)

Der Hypothesentest (ANOVA) wurde mit dem Faktor Beregnungstyp durchgeführt. Der Stichprobenumfang betrug pro Messtermin jeweils $N = 36$. Die Varianzanalyse ergab für den ersten Messtermin $p = 0,022$, für den zweiten $p = 0,001$ und für den dritten Messtermin $p < 0,0001$. Die Nullhypothese wird daher verworfen. Der Faktor Beregnungstyp hat einen signifikanten Einfluss auf die Unterschiede zwischen den Mittelwerten des Bedeckungsgrads.

Erntegut

Bei der Vermessung des Ernteguts wurden beim Typ 1 Mittelwerte von 29,9 g (Gesamtgewicht), 60,8 cm (Gesamtlänge) und 1,4 cm (maximaler Durchmesser) berechnet, während die Mittelwerte bei der zweigeteilten Wassergabe bei 46,7 g (Gesamtgewicht), 68,1 cm (Gesamtlänge) und 1,7 cm (maximaler Durchmesser) lagen.

Als Hypothesentest wurde ein 2-Stichprobentest gerechnet. Die Teststatistik ($N = 50$ für jeden Beregnungstyp) bestätigt die Signifikanz der Unterschiede. Der p -Wert lag bei $p < 0,0001$. Die Nullhypothese wird verworfen. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Messwerte der Erntegutvermessung sind auf den Beregnungstyp zurückzuführen. Das betrifft sowohl das Gewicht, die Länge als auch den Durchmesser der geernteten Möhren.

In Abbildung 58 sind die Fehlerbalkendiagramme der Mittelwerte des Ernteguts (Gewicht, Länge, maximaler Durchmesser) dargestellt:

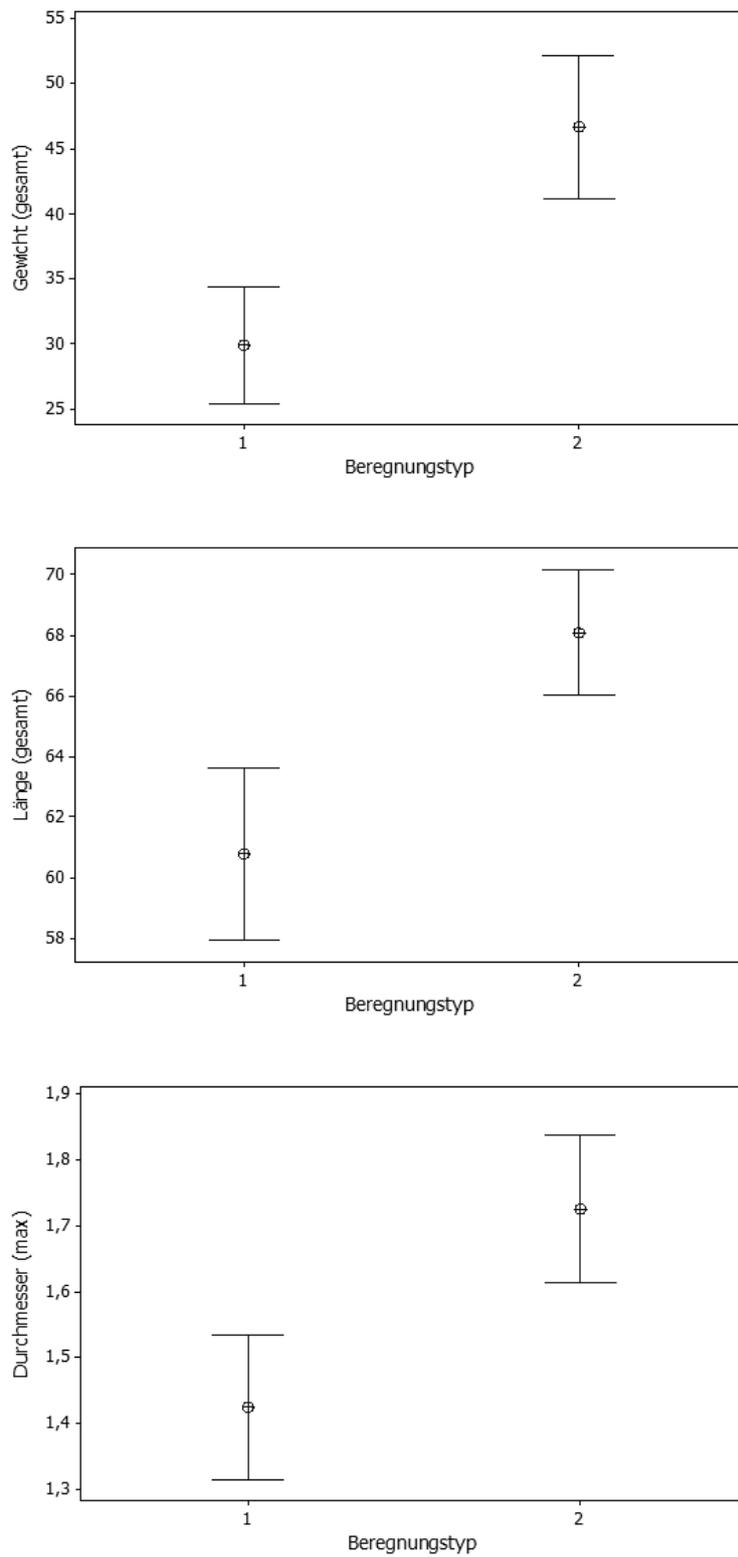


Abb. 58: Fehlerbalkendiagramme (95% KI) mit Gegenüberstellung der Beregnungstypen Typ 1 (Einzelwassergabe) und Typ 2 (zweigeteilte Wassergabe) für das Gewicht der Möhren (obere Abbildung), die Länge (mittlere Abbildung) und dem Durchmesser an der dicksten Stelle der Wurzel (untere Abbildung)

4.5 Diskussion zur Teilung der Wassergabe

Mit den Feldversuchen 2015 sollte untersucht werden, ob die zweigeteilte Wassergabe (Berechnungstyp 2) im Vergleich zur Einzelwassergabe (Berechnungstyp 1) eine verbesserte Wasseraufnahme bewirkt, zu einer höheren Bodenfeuchte im durchwurzelten Bodenraum und damit zu einer besseren Bestandsentwicklung führt. Gleichzeitig sollte durch die Zweiteilung der Wassergabe im Vergleich zur Einzelwassergabe die Erosion in Form von Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Verschlammung reduziert werden.

4.5.1 Aufnahme und Speicherung des Wassers im Damm

Ausprägung der Benetzungshemmung

Der durchgehend geringe Wert beim WDPT-Test zeigt eine hohe Benetzbarkeit des Bodens auf der Versuchsparzelle. Die Tropfen infiltrierten unmittelbar nach Auftreffen in den Boden. Dabei wurden keine Unterschiede zwischen den Berechnungstypen beobachtet. Alle gemessenen Werte lagen bei $t \leq 5$ Sekunden und damit in der Klasse 0 = wetable (Skala nach DOERR et al., 2006). Im Versuchsjahr 2015 trocknete der Boden während des Versuchszeitraums aufgrund von natürlichen Niederschlagsereignissen und Überfahrten im Rahmen der Berechnungsversuche nie unter den für diesen Boden kritischen Bodenfeuchtegehalt, bei dem die Benetzungshemmung sichtbar und messbar geworden wäre. In den Versuchen wurden auf der Dammkrone selten Bodenfeuchtwerte < 10 Vol. % gemessen. Um für den vorliegenden Boden (anlehmiger Sand) auf der Versuchsparzelle einen kritischen Wassergehalt bestimmen zu können, wären weitere Untersuchungen im Feld bei trockeneren Witterungsbedingungen notwendig. Alternativ könnte die potentielle Benetzungshemmung an getrockneten Bodenproben im Labor bestimmt werden.

Im Feld gelingt nach RITSEMA et al. (1997) die Bestimmung der Benetzungshemmung vermehrt während trockenen Wetterperioden und auf sandigen Böden. Untersuchungen zur Bestimmung eines Schwellenwertes für den kritischen Wassergehalt in Bezug auf die benetzungshemmenden Eigenschaften führte DEKKER et al. (2001) durch. Untersuchungsgegenstand waren mit Gras bewachsene Dünen sands. Für die oberste, untersuchte Schicht zwischen 0 und 2,5 cm stellte er einen Schwellenwert für den kritischen Wassergehalt von 18 Vol. % fest, unterhalb dessen sich der Boden hydrophob verhielt. Gleichzeitig wurde für die oberste Schicht ein Schwellenwert (Wassergehalt > 23 Vol. %) ermittelt, über dem keine Benetzungshemmung auftritt. In der sogenannten *transition zone* zwischen beiden Schwellenwerten kann sich ein Boden hydrophob oder hydrophil verhalten. DEKKER & RITSEMA verwiesen bereits 1994 darauf, dass neben dem Wassergehalt auch die Textur und der Anteil organischer Substanz einen großen Einfluss auf die Benetzungshemmung haben. Mit einem Anteil an 5,2 % Humus liegt der vorliegende Boden nach der bodenkundlichen KA 5 (SPONAGEL, 2005) in der Humusklasse h4, so dass insbesondere bei trockenen Witterungsverhältnissen mit einer leichten Benetzungshemmung zu rechnen gewesen wäre.

Änderungen der Bodenfeuchte im Damm

Sowohl in der obersten Bodenschicht unter der Dammkrone als auch im Dammkörper erhöhten sich die Werte der Bodenfeuchte nach geringen, mittleren und sehr hohen Beregnungsgaben zwischen 9 mm und 40 mm auf die Dammkrone. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Stichproben waren für den Beregnungstyp (Typ 1, Typ 2) bis 24 Stunden nach der Beregnung signifikant. Nach drei Tagen (72 Stunden) war die Austrocknung der Dammkrone und der darunterliegenden 6 cm tiefen Schicht so weit fortgeschritten, dass die Ausgangswerte vor der Beregnung erreicht wurden. Zwischen den Mittelwerten von Beregnungstyp 1 und 2 war zu diesem Messzeitpunkt kein signifikanter Unterschied mehr zu beobachten. Lediglich bei höheren Wassergaben (31 mm, 35 mm) lag die Bodenfeuchte bis 2,5 Vol. %-Punkte über dem Ausgangswert der Bodenfeuchte vor der Beregnung. Dabei konnte bei Typ 2 durchweg eine stärkere Zunahme der Bodenfeuchte als bei Typ 1 bewirkt werden. Bei der niedrigsten Wassergabe (9mm) lag der Mittelwert bei Typ 1 höher als bei Typ 2. Ein Grund dafür kann die vergleichsweise hohe Geschwindigkeit bei der Überfahrt sein, die eine niedrige Wassergabe bedingt. Diese führt zu einer entsprechend geringen Zeitspanne zwischen den beiden Teilwassergaben vom Beregnungstyp 2. Die erste Wassergabe kann den Boden durch die kurze Verweilzeit nicht ausreichend befeuchten, um eine bessere Aufnahme der zweiten Wassergabe zu ermöglichen. Die Teilung der Wassergabe bewirkte bei hohen Überfahrgeschwindigkeiten bzw. niedrigen Wassergaben keine verbesserte Wasseraufnahme durch die Dammkrone.

Die Bodenfeuchte im Dammkern änderte sich im Messzeitraum nach den Beregnungsüberfahrten in den einzelnen Tiefen unterschiedlich. Da bereits bei der Wasseraufnahme und Durchfeuchtung der Dammkrone sowie der obersten Schicht im Damm räumliche Unterschiede vorlagen, sind diese auch im Dammkern zu vermuten. Dabei waren die Unterschiede zwischen den Mittelwerten in Bezug auf den Faktor Beregnungstyp (Typ 1, Typ 2) zu allen Messterminen signifikant. Während in den beiden Tiefen 10 und 20 cm Änderungen der Bodenfeuchte um bis zu 3,5 Vol. % - Punkte für die beiden beispielhaft dargestellten Wassergaben von 9 mm und 31 mm zu beobachten waren, fielen die Änderungen in der Tiefe von 30 cm sehr gering aus. Ziel der Beregnung war die Auffüllung des Bodenwasservorrats in den oberen 10 – 20 cm des Damms. Dabei sollte das Wasser nicht unter die durchwurzelte Bodenzone gelangen, da es dann von den Pflanzenwurzeln nicht mehr aufgenommen werden kann. Außerdem bestände die Gefahr der Nährstoffauswaschung in tiefere Bodenschichten oder in das Grundwasser. Das Versuchsergebnis deutet darauf hin, dass das applizierte Wasser nicht in die Tiefe von 30 cm gelangte, was im Sinne des Grundwasserschutzes positiv bewertet wird. Die Gefahr der Auswaschung von Nährstoffen als Folge der Dammkronenberegnung in den ausgewerteten Versuchen kann somit als gering eingestuft werden.

Einfluss der Ausgangsbodenfeuchte

Die Ausgangsbodenfeuchte vor der Beregnung beeinflusste die Wasseraufnahme durch die Dammkrone und in der obersten Bodenschicht des Damms. Geringe Unterschiede der Ausgangsbodenfeuchte (≤ 2 Vol. %-Punkte) wirkten sich nicht signifikant auf die Wasseraufnahme und damit den Anstieg der Bodenfeuchte in der Dammkrone bzw. der darunterliegenden Bodenschicht aus. Dagegen führte ein Unterschied von 4,7 Vol. %-Punkten bei der Ausgangsbodenfeuchte zu einem signifikanten Unterschied bei der Erhöhung der Bodenfeuchte nach der Beregnung. Bei beiden Beregnungstypen wurde bei der Variante mit der geringeren Bodenfeuchte etwas mehr Wasser aufgenommen als bei der Variante mit der höheren Bodenfeuchte, wobei die Wasseraufnahme bei Typ 2 durchgehend höher lag als bei Typ 1. Letzteres deckt sich mit vorhergehenden Ergebnissen bei den Messungen der Bodenfeuchte der Dammkrone nach unterschiedlich hohen Beregnungsgaben. Allerdings wurde von einer stärkeren Erhöhung der Bodenfeuchte bei einer höheren Ausgangsbodenfeuchte ausgegangen. Auch FLURY et al. (1994) beobachtete einen unterschiedlichen Einfluss der Ausgangsbodenfeuchte auf die Wasseraufnahme. In einem Beregnungsversuch fand er heraus, dass der anfängliche Bodenwassergehalt bei einigen Böden keinen, bei anderen nur einen geringen Effekt auf die Aufnahme und den Transport des Wassers im Boden hatte. MERDUN et al. (2008) beobachtete vor allen in trockenen Böden einen verstärkten präferentiellen Fluss. Ziel der Dammkronenberegnung ist jedoch eine gleichmäßige Durchfeuchtung der durchwurzelter Bodenzone in der obersten Schicht im Damm.

Für weitere Untersuchungen werden parallele Laborversuche, bei denen durch Trocknung des Bodens eine Reduzierung der Ausgangsbodenfeuchte möglich ist, empfohlen. An diesen trockenen Proben könnte auch die Bestimmung der potentiellen Benetzungshemmung erfolgen.

4.5.2 Bodenerosion durch Wasser

Oberflächenabfluss und resultierende Vernässung der Furchen

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vernässung der Furchen im Mittel beim Beregnungstyp 1 signifikant stärker ist als bei Beregnungstyp 2. Im Umkehrschluss wird bei Typ 2 mehr Wasser durch die Dammkrone aufgenommen als bei Typ 1. Diese Aussage deckt sich mit den Ergebnissen der Messungen der Bodenfeuchte.

Bodenabtrag durch Umlagerung von Feinboden von der Dammkrone in die Furche

Am Ende des Versuchszeitraums wurde beobachtet, dass auf den Dammkronen vermehrt kleine Steine zu sehen waren. Daraus kann geschlossen werden, dass Feinboden von der Dammkrone in die Furche umgelagert wurde. Bei den Laboranalysen der Bodenproben wurde der Anteil des Feinbodens in der Dammkrone zwischen beiden Beregnungstypen sowie mit einer Nullvariante verglichen. In allen Varianten, mit und ohne Beregnung, wurde Feinboden von der Dammkrone in die Furche verlagert. Zwischen der Nullvariante und beiden Beregnungstypen lag kein signifikanter Unterschied vor. Das Ergebnis kann so interpretiert werden, dass die künstliche

Beregnung der Dammkrone lediglich zu einer geringfügigen zusätzlichen Bodenumlagerung von der Dammkrone in die Furche ($< 10\%$ Punkte) geführt hat. Zum anderen zeigten sich zwischen den beiden Beregnungstypen der Dammkronenberegnung keine signifikanten Unterschiede. Bei der kritischen Betrachtung der Methode ist allerdings festzustellen, dass der Bodenabtrag von der Dammkrone auch von im Versuchszeitraum gefallenem natürlichen Niederschlag mit beeinflusst wurde. Dabei lässt sich keine Aussage darüber treffen, wie hoch der Einfluss des Niederschlags auf der einen Seite und der Beregnungsgaben auf der anderen Seite war. Daher wird für zukünftige Untersuchungen eine dauerhafte Überdeckung der Messpunkte für die Entnahme von Bodenproben während des gesamten Untersuchungszeitraums empfohlen, um die Wirkung des Splash-Effekts durch den Tropfenaufprall natürlichen Regens ausschließen zu können.

Verringerte Durchlässigkeit durch Verschlammung der Dammkrone

Auch bei den Messungen der Infiltrationsrate und der anschließenden Berechnung der gesättigten Leitfähigkeit zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Beregnungstypen. Mit hydraulischen Leitfähigkeiten zwischen 250 cm d^{-1} und 450 cm d^{-1} liegen die Werte für die gesättigte Leitfähigkeit im erwarteten Bereich früherer Untersuchungen (UNIVERSITÄT KASSEL, 1996).

Die Dammkronenberegnung mit Typ 1 hat demnach keine verstärkte Verschlammung der Dammkrone gegenüber Beregnungstyp 2 bewirkt. Der Unterschied zur nicht beregneten Variante ist ebenfalls nicht signifikant. Zwar führt die Beregnung zu einer etwas reduzierten Durchlässigkeit, jedoch lassen die Ergebnisse nicht auf eine massive Schädigung der künstlich beregneten Dammkrone schließen. Der natürliche Niederschlag auf den Dämmen führte möglicherweise zu einer Verwischung der Ergebnisse, da der Regentropfenfall in den ersten acht Wochen des Versuchszeitraums auf Dämme ohne Bedeckung oder mit einem sehr geringen Bedeckungsgrad (im Mittel $< 20,0\%$) traf. Eine sich möglichst schnell schließende Vegetationsdecke schützt den Boden gegen die direkte, schädigende Einwirkung des Tropfenaufpralls (KREBS, 2017).

4.5.3 Bestandsentwicklung der Möhre

Die Teilung der Wassergabe wirkte sich auf den Bedeckungsgrad über den Messzeitraum sowie auf die Größe und das Gewicht des Ernteguts aus. Die Unterschiede zwischen den Mittelwerten wurden signifikant vom Faktor Beregnungstyp beeinflusst. Dabei stieg der Bedeckungsgrad bei der Beregnung vom Typ 2 im Vergleich zu Typ 1 stärker an. Die Ergebnisse der Vermessung des Ernteguts zeigten ebenfalls einen signifikanten Unterschied zwischen den Mittelwerten beider Beregnungstypen. Die zweigeteilte Wassergabe (Typ 2) wirkte sich positiver auf die Entwicklung des Bestands. Die Ergebnisse deuten auf eine verbesserte Wasseraufnahme in den Damm hin und damit auf eine optimalere Wasserversorgung durch die geteilte Wassergabe.

5 Übergreifende Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurden Untersuchungen zur Entwicklung eines wassersparenden, streifenförmigen Beregnungsverfahrens für Dammkulturen beschrieben. Es sollte ein Applikationssystem zur Dammkronenberegnung konstruiert und getestet werden. Zudem sollte herausgefunden werden, wie wirksam der Bodenwasservorrat im Damm durch die ausschließliche Beregnung der Dammkronen aufgefüllt und in welchem Ausmaß Wasser gegenüber herkömmlichen Verfahren eingespart werden kann. Mit der Methode der Teilung einer Gesamtwassergabe in mehrere Teilwassergaben mit zeitversetzter Applikation sollte die Wasseraufnahme erhöht und die Bestandsführung verbessert werden. Gleichzeitig sollten Wasserverluste durch oberflächlichen Abfluss und Versickerung reduziert sowie Bodenerosion durch Bodenabtrag und Verschlammung minimiert werden.

Im Folgenden wird Bezug auf die Arbeitsthesen aus Tabelle 1 (siehe Kapitel 1 Einleitung) genommen:

Arbeitsthese 1:

Mit der Methode der Dammkronenberegnung wird das Wasser streifenförmig ausschließlich auf die Dammkrone appliziert. Die von der Dammkrone aufgenommenen Beregnungsgaben füllen den Bodenwasservorrat in der durchwurzelten Bodenzone für einen Zeitraum von mehr als drei Tagen auf. Dabei wird gegenüber herkömmlichen Methoden Wasser eingespart.

Arbeitsthese 1a) Verteilgenauigkeit bei der Dammkronenberegnung

Für die Dammkronenberegnung wurde der Prototyp eines Dammschlittens als Zusatzmodul für den Düsenwagen konstruiert. Er ermöglicht eine streifenförmige Beregnung ausschließlich der Dammkrone, während Flanken und Furchen weitestgehend trocken bleiben. Durch die der Dammgeometrie angepassten Form wird das Applikationssystem exakt über der Mitte der Dammkrone geführt und beregnet die Dammkrone gleichförmig mit einem 15 - 20 cm breiten Streifen. Starker Wind kann zu Abdrift führen, insbesondere bei der Schrägstellung von Düsen. Durch die versetzte Montage mehrerer Applikatoren hintereinander sind mehrere zeitversetzte Teilwassergaben in einem Arbeitsgang möglich.

Arbeitsthese 1b) Wirksamkeit der Dammkronenberegnung

Für eine bodenschonende Beregnung werden geringe Wassergaben, die über einen längeren Zeitraum ausgebracht werden, empfohlen. Die Empfehlungen aus der Praxis des Freilandgemüsebaus reichen von 3 mm bis 7 mm für eine Auflaufberegnung und zwischen 10 mm und 25 mm für eine Zwischenberegnung (EGHBAL 2017; LABER ET AL. 2014). Vor zu hohen Wassergaben (20 mm bis 25 mm und höher) warnt Wonneberger (2004) aufgrund ihrer bodenschädigenden Wirkung. Sourell (2014) gibt Grenzwerte für die Regenverdaulichkeit verschiedener Böden an, die je nach Bodentyp zwischen 10 mm h⁻¹ und 20 mm h⁻¹ liegen.

Als zu durchfeuchtender Bodenraum wurde der Bereich bis maximal 15 cm Tiefe (siehe Abb. 8, Kap. 3) unter der Dammkronenoberfläche definiert, in dem die Samen keimen und aus dem sich Jungpflanzen über ihre Wurzeln mit Wasser versorgen. Durch die Dammkronenberegnung soll der Bodenwasservorrat in diesem Bereich aufgefüllt werden. Bodenfeuchtemesswerte wurden in der oberen Dammschicht (bis 6 cm Tiefe) erhoben. Aufgrund der verwendeten Messtechnik konnten keine Daten für die oberste Schicht (die eigentliche Dammkronenoberfläche, bis 2 cm Tiefe) erhoben werden. Somit sind lediglich Aussagen über die obere 6 cm dicke Bodenschicht möglich. Für die Verteilung der Bodenfeuchte im Dammkörper wurden Daten aus Tiefen von 10 cm, 20 cm und 30 cm ausgewertet, wobei sich der Dammfuß in einer Tiefe von ca. 30 bis 35 cm befindet.

Bei allen Versuchen zur Dammkronenberegnung mit Beregnungsgaben zwischen 9 mm und 40 mm erhöhte sich die Bodenfeuchte in der Dammkronenoberfläche und in der darunterliegenden Bodenschicht. Die Versuchsergebnisse zeigen jedoch, dass nicht alle Beregnungsgaben zu der gewünschten Durchfeuchtung im zuvor definierten Bodenraum führten. Aufgrund der Dammgeometrie und der im Vergleich zum Flächenbau doppelt so großen Oberfläche ist das Verdunstungspotential eines Damms höher. Höhere Temperaturen in den Außenbereichen des Damms führen zu höheren Verdunstungsraten, die insbesondere in Trockenperioden die Austrocknung des Damms verstärken. Teilweise fielen die Bodenfeuchtwerte auf < 10 Vol. % im Dammkörper.

Mit geringen Wassergaben (< 10 mm) konnte die Dammkronenoberfläche zwar durchfeuchtet werden. Das Wasser reichte jedoch nicht, um die Bodenfeuchte im Dammkern längerfristig ansteigen zu lassen. Grund sind die von Kapillarkräften hervorgerufenen Bewegungen von Wasser aus feuchten Zonen hin zu trockenen Bereichen. Dadurch ging ein Teil des von der Dammkronenoberfläche aufgenommenen Wassers für die Auffüllung des Bodenwasservorrats im durchwurzelten Bodenraum verloren und stand den Pflanzenwurzeln nicht zur Verfügung. An den äußeren, trockenen Dammflanken verdunstet das Wasser durch intensive Sonneneinstrahlung und hohe Außentemperaturen wiederum schneller und zog aufgrund der Unterschiede zwischen den Potentialgradienten weiteres Wasser aus den feuchten Bereichen unter der Dammkronenoberfläche und im Dammkern in die Randbereiche des Damms ab.

Mittlere Wassergaben (14 mm – 31 mm) führten im Vergleich zu niedrigen und hohen Wassergaben zu einer besseren Durchfeuchtung der durchwurzelten Bodenzone. Allerdings war der Anstieg der Bodenfeuchte im zu durchfeuchtenden Bereich lediglich von kurzer Dauer. Der Bodenwasservorrat konnte nicht optimal aufgefüllt und gespeichert werden. Bereits die Höhe der mittleren Wassergaben übertreffen die von SOURELL (2014) gegebenen Grenzwerte für die Regenverdaulichkeit von Böden. Zu hohe Beregnungsgaben in kurzer Zeit bzw. hohe Beregnungsintensitäten ($> 25 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) können die Bodenoberfläche schädigen. Verschlammte Dammkronen bei bindigen Böden erschweren die Infiltration des Wassers und verstärken Abfluss und Bodenabtrag. Daher sollten Wassergaben, die über dem Infiltrationsvermögen des anstehenden Bodens liegen, genauso vermieden werden wie zu geringe Wassergaben.

Hohe Beregnungsgaben (> 31 mm) konnten von der Dammkrone nur zum Teil aufgenommen werden. Dies führte zu einer geringen Erhöhung der Bodenfeuchte in der Dammkrone direkt nach der Beregnung. Der Teil des Wassers, der nicht aufgenommen werden konnte, floss oberflächlich von der Dammkrone über die Flanken in die Furchen. Die Ergebnisse decken sich mit Beobachtungen von ROBINSON (2009) bei der flächendeckenden Beregnung von Kartoffeldämmen mit Düsenwagen, nach denen der größte Teil des Wassers von den Dämmen in die Furchen floss. ZHANG (2013, 2015) simulierte die Bodenwasserdynamik in Dämmen mit unterschiedlich hohen Wasserständen bei der Furchenbewässerung und wies laterale Fließbewegungen aus den Furchen in die Dämme nach. Auch die dargestellten Ergebnisse aus den eigenen Feldversuchen zeigten eine Erhöhung der Bodenfeuchte im Dammfuß (siehe Abb. 19, Kap. 3). Es wird vermutet, dass Wasser aus den feuchten Bodenzonen unterhalb der Furchen aufgrund des Potentialunterschiedes in den Dammfuß kapillar nachgeliefert wurde. Allerdings liegt diese untere durchfeuchtete Schicht während des Jungpflanzenstadiums unterhalb des durchwurzelten Bodenraums. Auch aus unter dem Damm tiefer gelegenen Bodenschichten ist je nach Bodenart ein kapillarer Aufstieg von Wasser in den Dammkern möglich. Alleine durch kapillare Nachlieferung aus feuchten Bodenzonen unterhalb der Furchen und des Damms können weder die Dammkrone noch der definierte durchwurzelte Bodenraum mit ausreichend Wasser aufgefüllt werden.

Mit der Aufnahme von Zeitreihen bei der Messung der Bodenfeuchte über einen Messzeitraum von bis zu sechs Tagen nach der Beregnung sind Aussagen über den zeitlichen Verlauf der Austrocknung sowie des Auffüllens der Wasservorräte im Dammkörper möglich. Sowohl bei geringen als auch bei mittleren Wassergaben sank die Bodenfeuchte in der obersten Bodenschicht, in der sich Keimling und Jungpflanzen befinden, teilweise schon nach zwei Tagen, spätestens jedoch nach drei Tagen auf bzw. unter die Ausgangswerte der Bodenfeuchte, die direkt vor der Beregnung gemessen wurden. Lediglich bei höheren Wassergaben hielt der Vorrat an Wasser im Dammkörper länger an. Dabei wurde das Wasser jedoch zusätzlich wie oben beschrieben aufgrund des Oberflächenabflusses und der Vernässung der Furchen über den Dammfuß aufgenommen. Allein durch die Wasseraufnahme über die Dammkrone konnte der Bodenwasservorrat nicht ausreichend aufgefüllt werden. Erneute Beregnungsgaben wären innerhalb von drei Tagen notwendig und sind im Hinblick auf die Betriebswirtschaft mit hohen Maschinen- und Arbeitskräftekosten verbunden. Aus Gründen der Effizienz ist eine Auffüllung des definierten durchwurzelten Bodenraums auf 80 % - 90 % nFK Ziel einer Beregnungsmaßnahme (SOURELL, 2014). Mit der Dammkronenberegnung konnte dies nicht im gewünschten Umfang erreicht werden.

Arbeitsthese 1c) Einsparpotential der Dammkronenberechnung

Zu Beginn der Untersuchungen wurde davon ausgegangen, dass die Dammkronenberechnung im Vergleich zur flächendeckenden Berechnung aufgrund der reduzierten Berechnungsfläche ein hohes Einsparpotential von Wasser und damit Energie besitzt. Das Einsparpotential fällt jedoch aufgrund der Migration von Wasser in die trockenen Randzonen des Damms geringer aus, als zunächst angenommen. Um eine zu herkömmlichen Verfahren vergleichbare Durchfeuchtung zu erzielen, muss mehr Wasser auf die Dammkrone appliziert werden. Aufgrund der Reduzierung der Berechnungsfläche um $\frac{2}{3}$ kann bei der neuen Methode insgesamt Wasser eingespart werden. Aus dem gewählten Versuchsansatz konnte kein konkretes Einsparpotential abgeleitet werden.

Die Arbeitsthese 1 kann aufgrund der Untersuchungsergebnisse nicht angenommen werden: Mit dem entwickelten Dammschlitten kann Wasser streifenförmig ausschließlich auf die Dammkrone appliziert werden. Mit der neuen Methode der Dammkronenberechnung kann der Bodenwasservorrat im Damm jedoch nicht wirksam aufgefüllt und für einen Zeitraum von mehr als drei Tagen gespeichert werden. Die Einsparung fällt geringer aus als ursprünglich angenommen.

Arbeitsthese 2:

Die Teilung einer Gesamtwassergabe in zwei Teilwassergaben bewirkt im Vergleich zur Einzelwassergabe in gleicher Höhe eine effektivere Wasseraufnahme und eine verbesserte Bestandsentwicklung. Gleichzeitig werden Wasserverluste und Wassererosion minimiert.

Arbeitsthese 2a) Wirksamkeit der Teilung der Wassergabe in Bezug auf die Bodenfeuchte

Durch die Teilung einer Gesamtwassergabe in zwei Teilwassergaben wird die Wasseraufnahme der Dammkrone verbessert. Die Ergebnisse der Feldversuche zeigen bei zweigeteilter Wassergabe signifikant höhere Bodenfeuchtwerte bei mittleren Berechnungsgaben. Bei geringen Wassergaben (< 10 mm) durch hohe Überfahrtgeschwindigkeiten zeigte sich dagegen kein Einfluss einer Teilung der Wassergabe. Grund dafür ist die kürzer werdende Berechnungspause zwischen den Teilwassergaben mit steigender Überfahrtgeschwindigkeit des Regners. Bei hohen Wassergaben kam es hingegen zu Wasserverlusten, da diese über dem Wasseraufnahmevermögen des Bodens lag und oberflächlich abfloss. Hohe Wassergaben (> 19 mm) werden daher nicht empfohlen. Stattdessen wird die (nochmalige) Aufteilung in weitere Teilwassergaben angeraten.

Arbeitsthese 2b) Einfluss der Ausgangsbodenfeuchte

Ein signifikanter Einfluss der Ausgangsbodenfeuchte auf die Wasseraufnahme konnte mit den Versuchsergebnissen nicht nachgewiesen werden. Die zweigeteilte Wassergabe verzeichnete durchweg einen höheren Anstieg der Bodenfeuchte bei unterschiedlichen Ausgangswerten der Bodenfeuchte. Gerade bei den Versuchen mit einer geringeren Bodenfeuchte wurde von einer potentiell höheren Neigung zur Benetzungshemmung und dadurch von einer hohen Wirksamkeit der zweigeteilten Wassergabe ausgegangen. Mit den relativ hohen Ausgangswerten der Bodenfeuchte aufgrund feuchter Witterungsbedingungen konnte dies im Feld jedoch nicht gezeigt werden.

Arbeitsthese 2c) Oberflächenabfluss, Bodenabtrag und Verschlämmung

Bei den Untersuchungen zur Bodenerosion durch Wasser zeigte sich, dass durch die zweigeteilte Wassergabe signifikant weniger Wasser durch Oberflächenabfluss verloren ging als durch die Einzelwassergabe gleicher Höhe. Die Unterschiede bei der Umlagerung des Feinbodens von der Dammkrone in die Furche waren zwischen den Beregnungstypen hingegen nicht signifikant. Die Untersuchungen zur Durchlässigkeit der Dammkrone ergaben keine signifikant niedrigere Durchlässigkeit durch Verschlämmung der obersten Bodenschicht der beregneten Varianten im Vergleich zur Nullvariante. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Dammkronenberegnung lediglich in geringem Ausmaß zu einer zusätzlichen Schädigung der Bodenoberfläche auf der Dammkrone beiträgt. Die Teilung der Wassergabe führte nicht zu einer signifikant geringeren Durchlässigkeit im Vergleich zur Einzelwassergabe gleicher Höhe. Der Einfluss natürlicher Niederschläge auf die Umlagerung von Bodenpartikeln und die Verschlämmung der Bodenoberfläche ist unter Feldbedingungen hoch, so dass hieraus bei dem gewählten Versuchsansatz keine Schlussfolgerungen auf den tatsächlichen Einfluss der Beregnungsvarianten gezogen werden können.

Arbeitsthese 2d) Bestandsentwicklung

Der signifikante Einfluss der Beregnungsvariante auf die Bestandsentwicklung konnte sowohl durch die Erhebungen des Bedeckungsgrades als auch durch die Vermessung des Ernteguts nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass die zweigeteilte Wassergabe eine bessere Wasseraufnahme und Durchfeuchtung des durchwurzelten Bodenraums bewirkte und somit zu einer verbesserten Bestandsentwicklung führte.

Die Arbeitsthese 2 kann aufgrund der Untersuchungen bestätigt werden. Die zeitversetzte Applikation von zwei Teilwassergaben anstatt einer Einzelwassergabe gleicher Höhe erhöhte die Wasseraufnahme durch die Dammkrone in den Damm und verbesserte die Bestandsentwicklung. Gleichzeitig konnten die Wasserverluste reduziert werden, während sich keine Änderung in Bezug auf Erosion zeigte.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Mit der Dammkronenberegnung wurde eine wassersparende Methode speziell für Dammkulturen entwickelt. Ausgangspunkt der Untersuchungen war die Hypothese, dass durch streifenförmige Beregnung ausschließlich der Dammkrone ausreichend Wasser in den Damm aufgenommen, um den Bodenwasservorrat für einen Zeitraum von mindestens drei Tagen aufzufüllen. Dadurch sollte die Wasserversorgung der Dammkulturen insbesondere während Trockenperioden sichergestellt werden. Im Fokus stand dabei die Keim- und Jugendphase von direkt in den Damm gesäten Kulturen wie der Möhre, die bei Trockenheit einem hohen Risiko ausgesetzt sind. Für ein gleichmäßiges Auflaufen werden in den ersten acht Wochen lediglich geringe Wassergaben benötigt, um den durchwurzelte Bodenraum in der oberen Dammschicht (bis max. 15 cm Tiefe) ausreichend feucht zu halten.

Bei allen Beregnungsversuchen mit der neuen Methode der Dammkronenberegnung stieg die Bodenfeuchte in der Dammkrone an. Allerdings konnte durch geringe Wassergaben (< 10 mm) keine ausreichende Durchfeuchtung des durchwurzelten Bodenraums unter der Dammkrone erzielt werden. Dagegen führten mittlere Wassergaben (10 mm bis 30 mm) zu höheren Bodenfeuchtwerten in der Dammkrone und in der darunterliegenden Bodenschicht. Hohe Wassergaben (> 30 mm) konnten dagegen nur teilweise vom Damm aufgenommen werden, da ein Teil des Wassers oberflächlich von der Dammkrone in die Furchen abfloss und damit für die Kulturpflanzen verloren ging. Durch die Applikation von zwei zeitversetzten Teilwassergaben konnte bei mittleren und hohen Wassergaben die Wasseraufnahme durch die Dammkrone in die durchwurzelte Bodenzone verbessert werden.

Probleme bereiteten dagegen die längerfristige Auffüllung des Bodenwasservorrats und die Speicherung im Damm. Ein Grund dafür liegt in der Migration des Wassers von durchfeuchteten Bereichen unter der Dammkrone und im Dammkern in trockene Randbereiche des Damms, wo es verdunstete. So konnte nur ein Teil des aufgenommenen Wassers länger als zwei Tage im Damm gespeichert werden. Eine erneute Beregnung der Dammkronen ist innerhalb von drei Tagen notwendig. Bei der Methode der streifenförmigen Beregnung der Dammkrone ist daher von einem höheren Wasserbedarf pro benetzter Flächeneinheit im Vergleich zur herkömmlichen, flächendeckenden Beregnung auszugehen. Der höhere Wasserbedarf der Dammkronenberegnung wird allerdings durch die um $\frac{2}{3}$ reduzierte Beregnungsfläche ausgeglichen, so dass dennoch von einer Wassereinsparung von schätzungsweise 30 – 50 % pro Fläche ausgegangen werden kann.

Untersuchungen zur Beregnungsintensität und ihrer bodenschädigenden Wirkung sowie einer potentiellen Grundwassergefährdung durch Nährstoffauswaschungen infolge hoher Beregnungsgaben sind seit Jahrzehnten Gegenstand der Forschungen im Themenfeld der flächendeckenden Beregnung. Auch in der vorliegenden Arbeit konnte das Problem hoher Beregnungsgaben mit der neuen Beregnungsmethode nicht gelöst werden. Durch die Nähe zum Boden benetzen die Applikatoren eine relativ geringe Fläche auf der Dammkrone mit Wasser. Hohe Gesamtwassergaben sind aufgrund des Risikos einer Schädigung der Bodenoberfläche sowie möglicher Wasserverluste durch Oberflächenabfluss zu vermeiden und sollten daher als Teilwassergaben appliziert werden. Eine Ausdehnung der Beregnungspausen zwischen den

einzelnen Teilwassergaben wäre aus bodenkundlicher Sicht empfehlenswert. Technisch ist dies nur durch eine Längenausdehnung des Dammschlittens auf mehrere Meter zu realisieren, wodurch sich die Beregnungspausen zwischen den Teilwassergaben in Abhängigkeit von der Überfahrgeschwindigkeit vergrößert. Als Zusatzmodul zum Düsenwagen sind dem Dammschlitten aus konstruktiver Sicht Grenzen gesetzt, da die Düsenwagenausleger nur in geringem Umfang Zugkräfte aufnehmen können. Eine Verlängerung und damit Vergrößerung des Applikationssystems erschwert so die Handhabbarkeit in der Praxis. Die Weiterentwicklung des Dammschlittens für den Praxiseinsatz wird aus den oben genannten Gründen unabhängig vom Düsenwagen empfohlen. Ein in der Längsausdehnung vergrößerter Dammschlitten kann zur Beregnung von Dammkulturen auf kleineren Schlägen zum Einsatz kommen. Ein mehrere Dämme überspannendes Dammschlittenmodul, das mit einem Wassertank auf einem Traktor verbunden ist, könnte beispielsweise vier oder sechs Dämme gleichzeitig beregnen. Auch dabei wäre eine zeitversetzte Applikation mehrerer Teilwassergaben in einem Arbeitsgang möglich. Die Entwicklung von selbstfahrenden, roboterartigen Düsendammschlitten mit Selbstauftankfunktion könnte in Zukunft mit einer teilflächenspezifischen Beregnung kombiniert werden, um in Verbindung mit Bodensensorik oder satellitengestützter Datenauswertung den aktuellen Wasserbedarf der Kulturpflanzen zu decken.

Das geringe Wasserentnahmeentgelt in Deutschland wird Landwirte vorerst nicht zu hohen Investitionen und damit nicht zum Einsatz wassersparender Bewässerungsverfahren motivieren. Wirksamer könnten hingegen Änderungen im Wasserrecht mit einschränkender Entnahme in Trockenzeiten sein. Dies trifft insbesondere auf Gebiete zu, in denen die Wasservorräte schon jetzt in Trockenperioden knapp werden. Ein Einsatz der Dammkronenberegnung in der Praxis wird in Deutschland möglicherweise erst in Zukunft für die landwirtschaftliche Produktion interessant werden.

7 Zusammenfassung

Im Freilandgemüsebau der gemäßigten Klimazone Europas erhöhen Witterungsunsicherheiten und Trockenstress im Frühjahr und Sommer das Risiko für Ernteeinbußen und –ausfälle. Mit zusätzlicher Bewässerung kann das Risiko für Ertragsminderungen durch Niederschlagsmangel reduzieren. Ziel der Bewässerung ist die Auffüllung des Bodenwasservorrats, um ein optimales Pflanzenwachstum sicherzustellen. Länger andauernde Trockenheit und intensive Nutzung führen bereits heute in einigen Regionen zu einer Verknappung des Wassers. Durch den Einsatz wassersparender Bewässerungsverfahren sowie einer optimierten Steuerung kann der Wasserverbrauch in der Landwirtschaft reduziert werden.

In Deutschland ist die Beregnung nach wie vor das am weitesten verbreitete Bewässerungsverfahren. Mithilfe stationärer oder mobiler Beregnungsanlagen wird Wasser auf die gesamte Fläche gebracht. Hohe Beregnungsintensitäten führen oftmals zu Oberflächenabfluss und Tiefensickerung und gehen somit den Kulturpflanzen verloren. Auch Dammkulturen werden bisher flächendeckend beregnet, wobei das Wasser sowohl auf den Dämmen als auch in den Furchen gleichmäßig verteilt wird. Mit der neuen Beregnungsmethode sollte das Wasser jedoch nur an die Stelle gebracht werden, an der es von den Dammkulturen benötigt wird: auf die Dämme selbst. Untersuchungen zur streifenförmigen Beregnung von Dammkulturen waren bisher nicht Gegenstand von Forschungsarbeiten. Bei der entwickelten Methode der streifenförmigen Beregnung wird Wasser daher ausschließlich auf die Dammkronen appliziert, während Dammfanken und Dammfurchen ausgespart bleiben. Durch die Reduzierung der zu beregnenden Fläche um zwei Drittel verringert sich der Wasserbedarf deutlich. Neben der Einsparung von Wasser kann gleichzeitig der Energieverbrauch gesenkt werden. Damit wird ein Beitrag zum effizienten und nachhaltigen Umgang mit Ressourcen in der Landwirtschaft geleistet.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Kernfrage nachgegangen, ob durch die Beregnung der Dammkronen Dammkulturen ausreichend Wasser zur Verfügung gestellt werden kann. Eine gut durchfeuchtete Dammkrone bietet direkt im Damm abgelegten Saaten optimale Auf- und Wachstumsbedingungen während der Keim- und Jugendphase. Um während Trockenperioden den Trockenstress für Dammkulturen möglichst gering zu halten, ist der Bodenwasservorrat im Damm bei Bedarf durch zusätzliche Beregnung aufzufüllen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass mit der Bestandsentwicklung sowohl der Wasserbedarf als auch die Größe des durchwurzelten Bodenraums zunimmt. Aufgrund der Damngeometrie besitzen Dämme eine im Vergleich zum Flächbau größere Oberfläche und damit ein höheres Evaporationspotential. Bei hohen Außentemperaturen verdunstet Bodenwasser verstärkt über Dammfanken und Dammkrone. Durch die zunehmende Bestandsentwicklung wird die Austrocknung des Damms aufgrund der steigenden Transpirationsrate verstärkt. Durch kapillaren Aufstieg kann Wasser aus tieferen Bodenschichten in den Damm gelangen und Kulturpflanzen, deren Wurzeln bis in den Dammfuß reichen, versorgen. Alleine durch kapillaren Aufstieg kann jedoch weder die Dammkrone noch der obere Dammbereich ausreichend mit Wasser versorgt werden.

Mit dem Prototyp des Dammschlittens wurde von der Autorin eine funktionsfähige Applikationstechnik für die Dammkronenberegnung entwickelt, die auf der Düsenwagentechnik basiert. Mit dem Dammschlitten können verschiedene Applikatoren, wie Düsen oder Gießköpfe, mittig über der Dammkrone geführt werden und die Bodenoberfläche gleichförmig benetzen. Bei den Beregnungsversuchen wurde eine hohe Applikationsgenauigkeit auf der Dammkrone erreicht. Lediglich bei Wind kam es zu geringen Abweichungen aufgrund von Abdrift. Die Universität Kassel hat die Erfindung des Dammschlittens mit zweigeteilter Wassergabe in Anspruch genommen und zum Patent angemeldet.

Bei den Untersuchungen zur Wirksamkeit der Dammkronenberegnung wurde beobachtet, dass die Bodenfeuchtegehalte in der Dammkrone nach der Beregnung anstiegen. Allerdings migrierte ein Teil des aufgenommenen Wassers aufgrund der Potentialunterschiede in trockene Randbereiche des Damms, wo es verdunstete. Bei geringen Wassergaben (< 10 mm) drang das Wasser nicht bis in den durchwurzelten Bodenraum unter der Dammkrone ein. Mittlere Wassergaben (10 – 30 mm) führten zu höheren Bodenfeuchtwerten in der Dammkrone und der darunterliegenden Bodenschicht. Allerdings war die Wirkdauer gering, da eine fortlaufende Wasserbewegung aus feuchten Bereichen im Inneren des Damms zu den Randbereichen der Dammflanken stattfand. Nach weniger als drei Tagen wurden bereits die vor der Beregnung gemessenen Ausgangswerte der Bodenfeuchte wieder erreicht. Eine wirksame Auffüllung des Bodenwasservorrats im Damm konnte auch nicht durch hohe Wassergaben (> 30 mm) erzielt werden, da nur ein Teil des applizierten Wassers durch die Dammkrone in den Damm infiltrierte. Der größere Teil des Wassers floss oberflächlich ab und ging damit für die Kulturpflanzen verloren. Verluste durch Sickerwasser unter die durchwurzelte Bodenzone wurden dagegen nicht beobachtet, wodurch Nährstoffauswaschungen und damit eine Grundwassergefährdung als Folge der Dammkronenberegnung ausgeschlossen werden können.

Zur Verbesserung der Wasseraufnahme, insbesondere von höheren Wassergaben, wurde eine Wassergabe in zwei Teilwassergaben aufgeteilt und zeitversetzt auf die Dammkrone appliziert. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass eine zweigeteilte Wassergabe im Vergleich zur Einzelwassergabe gleicher Höhe zu höheren Bodenfeuchtwerten sowohl in der Dammkrone als auch im Dammkern führte. Das lässt auf eine verbesserte Wasseraufnahme im Damm schließen und führte zu einer signifikant besseren Bestandsentwicklung. Es konnte auch beobachtet werden, dass die zeitversetzte Applikation von Teilwassergaben zu weniger Oberflächenabfluss führte, wohingegen eine Reduzierung von Bodenabtrag und Verschlammung der Dammkrone nicht nachgewiesen werden konnte. Der positive Effekt der Teilung der Wassergabe war bei mittleren und hohen Wassergaben sichtbar, sank allerdings bei geringen Wassergaben durch die Zunahme der Überfahrungszeit und einer daraus resultierenden Verkürzung der Beregnungspausen zwischen den einzelnen Wassergaben.

Im Vergleich zur flächendeckenden Beregnung ist bei der Dammkronenberegnung aufgrund der Migration von Wasser in trockene Randbereiche des Damms von einem erhöhten Wasserbedarf pro benetzter Fläche auszugehen. Es muss also mehr Wasser auf den schmalen Streifen der Dammkrone appliziert werden, um eine vergleichbare Durchfeuchtung im darunterliegenden Bodenbereich zu erzielen. Eine Verbesserung in Bezug auf die Beregnungsintensität konnte durch das Prinzip der Aufteilung einer Wassergaben in mehrere, zeitversetzte Teilwassergaben erreicht werden und wird aufgrund der erzielten Ergebnisse in dieser Arbeit als bodenschonende, die Wasseraufnahme erhöhende Methode weiterempfohlen. Für die Übertragung dieses Erkenntnisgewinns auf herkömmliche Beregnungsverfahren bedarf es weiterer Untersuchungen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden: Bei der neu entwickelten Methode der Dammkronenberegnung wird die Wirksamkeit und Wirkdauer erhöht, indem mittlere und höhere Wassergaben als zeitversetzte Teilwassergaben appliziert werden. Die Dammkronenberegnung eignet sich nicht für die Ausbringung geringer Wassergaben (< 10 mm). Mit dem Vorgehen wird eine wassersparende Beregnung ermöglicht. Das Einsparpotential der neuen Methode fällt allerdings geringer aus als zu Beginn der Untersuchungen angenommen. Trotz des höheren Wasserbedarfs pro benetzter Fläche können mit der Methode der Dammkronenberegnung aufgrund der Reduzierung der zu beregnenden Fläche bis zu 50 % des Wassers eingespart werden.

Summary

In field vegetable farming in temperate climate regions of Europe, weather uncertainties and drought stress in spring and summer increases the risks of crop losses. Irrigation can reduce the risk of yield depression due to precipitation deficiency. The aim of irrigation is to recharge the soil moisture at root level to ensure optimum plant growth. Already now, however, prolonged drought and intensive water use are threatening water reserves in some regions. Water-saving irrigation methods, optimized control and improved management can reduce water consumption in agriculture, and can contribute to protect water reserves from depletion.

In Germany, overhead sprinkling is still the most widely used irrigation method. With the help of stationary or mobile sprinkler irrigation systems, water is sprinkled on the entire soil surface with comparatively high water intensities. This practice leads to inefficient use of irrigation water with high water losses and soil degradation. Ridge cultures, common in field vegetable farming, are irrigated in the same manner, whereby the water is evenly distributed on both the ridges and the furrows. In analogy to drip irrigation, water saving can be realized by applying it only to the point where it is needed, on the ridges themselves in this instance. However, investigations on the strip-sprinkler irrigation of ridge cultures have not been the subject of research so far. In this study, the result of a newly developed strip sprinkler is presented. Irrigation water is applied exclusively on the ridge crest while the flanks of the ridges and the furrows are not sprinkled on directly. The area to be wetted by irrigation water is reduced by approximately two-thirds, which could significantly reduce water consumption, with lower energy usage to deliver water. This can contribute to the efficient and sustainable use of resources in agriculture.

The present work examines, whether sufficient water can be made available for ridge cultures by the sprinkling of the ridge crest only. A well-moistened ridge crest should provide seedlings a seedbed with optimal growth conditions during the germination and youth phase. In order to minimize the drought stress during drought periods, the soil moisture level in the ridge should be filled up with additional irrigation water if necessary. Plant growth increases both the demand for water and the size of the root zone area. Ridges have a larger geometrical surface area compared to planes, and thus a higher evaporation potential. At high outside temperatures, soil water evaporates more along the sides of the ridge flanks. During plant development evaporation and dehydration of ridges is intensified due to the increasing transpiration rate. By capillary rise water from deeper soil layers can get into the ridge. Crops whose roots reach into the ridge base can access the water. However, only by capillary rise neither the ridge crest nor the upper root zone, where the young plants are located, can be sufficiently supplied with water.

With the prototype of the ridge sledge, a functional application technique for ridge crest sprinkling irrigation was developed by the author. The ridge sledge is based on irrigation boom technique. With the newly developed method, various applicators, such as nozzles or pouring heads, can be guided centrally over the ridge crest and uniformly wet it. In all sprinkling experiments, a high application accuracy was achieved on the ridge crest. Wind led to small deviations due to drift. The University of Kassel has claimed the invention of the dam sledge and registered it as a patent.

During the investigation of the effectiveness of the ridge crest sprinkling irrigation it was observed that the soil moisture content in the ridge crest increased after irrigation. However, due to differences in energy potentials, part of the absorbed water migrated from wet to dry marginal areas of the ridge at the flanks. With small amounts of water (< 10 mm), the water did not penetrate into the rooted zone underneath the ridge crown. Average watering (10 – 30 mm) resulted in higher soil moisture levels in the ridge crest and the underlying soil layer. However, the effect duration was low, as there was a continuous movement of water from inside the ridge to the marginal areas exposed to sun and wind fostering evaporation. After less than three days, the initial moisture values were reached again. An effective refilling of the soil moisture level could not be achieved by high watering amounts (> 30 mm), since only a part of the applied water infiltrated via the ridge crest. Surface run-off was observed when applying high water amounts and water was thus lost to the crops. By contrast, losses due to deep drainage below the root zone were not observed. It can be assumed that nutrient leaching and groundwater contamination as a result of ridge crest sprinkling is excluded.

To improve the water absorption, especially of higher watering, a total water amount was divided into two partial water amounts and applied time-shifted on the ridge crest within one operation. In the investigations it could be shown that splitting water supply in two doses compared to a single water supply of the same water amount led to higher soil moisture levels both in the ridge crest and in the rooted zone underneath. This suggests an improved water absorption in the ridge and led to a significantly better plant growing. It could also be observed that the split application of two single water amounts led to less surface runoff, whereas a reduction of soil erosion and soil silting of the ridge crest could not be proven. The positive effect of the division of the water input was visible in medium and high water amounts, but decreased with low water amounts due to the increase in the speed of the irrigation boom and a resulting shortening of the irrigation intervals between the individual watering.

Compared to area-wide sprinkling irrigation, ridge crest sprinkling irrigation requires higher irrigation intensity per wetted area to compensate the migration of water to not-wetted areas. More water must therefore be applied to the narrow strip of the ridge crest in order to achieve comparable moisture penetration in the underlying rooted zone. Therefore, no improvement in irrigation intensity could be achieved with the new method. The principle of splitting the water into several, time-shifted partial water amounts in one operation is recommended because of the results obtained in this work as a soil-protecting, the water absorption increasing method. The transfer of this knowledge to conventional sprinkling irrigation methods requires further research.

In summary, it can be stated that the newly developed method of ridge crest sprinkling irrigation results in higher efficiency and longer duration of action that can be achieved with medium to high water loads, if these are applied in multiple, time-shifted doses. The method is not suitable for the application of water loads of less 10 mm. This procedure allows water saving sprinkling irrigation with low water losses and soil degradation. The water savings potential of the new method is lower than assumed at the beginning. Despite the higher water requirements due to the reduction of the surface to be wetted with the new method, up to 50% of the water can be saved by the ridge crest sprinkling irrigation method.

8 Literaturverzeichnis

- AG Boden. 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung. (5. Aufl.). Hannover: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Auerswald, K. 1998. Bodenerosion durch Wasser. In: G. Richter (Hg.), Bodenerosion: Analyse und Bilanz eines Umweltproblems. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Bachmann, Jörg. 1988. Auswirkungen der organischen Substanz verschiedenen Zersetzungsgrades auf physikal. Bodeneigenschaften, Dissertation. Universität Hannover.
- Bayerische Landesversuchsanstalt für Landwirtschaft. 2016. Tropfbewässerung im Kartoffelanbau. Online, Zugriff am 02.10.2018 von https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/tropfbewaesserung-kartoffelbau_lfl-schriftenreihe.pdf.
- Benjamin, L. 1982. Some effects of differing times of seedling emergence, population density and seed size on root-size variation in carrot populations. *The Journal of Agricultural Science*, 98(3), 537-545.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. 2017. Modellvorhaben für „Demonstrationsbetriebe zur Effizienzsteigerung der Bewässerungstechnik und des Bewässerungsmanagements im Freilandgemüsebau“. Online, Zugriff am 6.12.18 von https://www.ble.de/DE/Projektfoerderung/Foerderungen-Auftraege/Modellvorhaben/Pflanzliche-Erzeugung/Bewaesserungssteuerung/bewaesserungssteuerung_node.html.
- Blum, Winfried E. H. 2012. Bodenkunde in Stichworten. Stuttgart: Schweizerbart Science Publishers.
- Blume, H.P., Brümmer, G.W., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., et al. 2016. Scheffer/Schachtschabel Soil Science. (1 ed.). Berlin: Springer.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. 2015. Monitoringbericht Klimaanpassungsmassnahmen. Online, Zugriff am 15.10.2018 von <https://www.bmu.de/pressemitteilung/folgen-des-klimawandels-in-deutschland-deutlich-spuerbar/>.
- Brandt, M., Wildhagen, H., Heß, J. 2001. Flächendeckendes Bodenmonitoring auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen: Kartier- und Analyseergebnisse. Bodenkundliche Arbeitsberichte 5, Universität Kassel Projektbericht.
- Dekker, L., Ritsema, C. J. 1994. How water moves in a water repellent sandy soil: 1. Potential and actual water repellency. *Water Resources Research Journal*. Vol. 30:9, 2507-2517.
- Dekker, L., Ritsema, Cohen J. 2000. Wetting patterns and moisture variability in water repellent Dutch soils. In: *Journal of Hydrology*. Vol. 231:232, 148-164.
- Dekker, L., Doerr, S.H., Oostindie, K., Ziogas, K., Ritsema, C.J. 2001. Water Repellency and Critical Soil Water Content in a Dune Sand. In: *Soil Science Society of America* Vol. 65:6, 1667-1674.

- Deutscher Wetterdienst. 2018. Niederschlagsintensität. Online, Zugriff am 16.01.2018 von <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=101812&lv3>.
- Deutsches Institut für Normung (Hrsg.). 1972. DIN 19682-6. Bodenuntersuchungsverfahren im Landwirtschaftlichen Wasserbau. Felduntersuchungen, Bestimmung der Feldkapazität. Berlin: Beuth Verlag.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., Dekker, L. W. et al. 2006. Occurrence, prediction and hydrological effects of water repellency amongst major soil and land-use types in a humid temperate climate. In: *European Journal of Soil Science*. Vol. 57, 741–754.
- Dyśko, J. /Kaniszewski, S. 2007. Effect of Drip Irrigation, N-Fertigation and Cultivation Methods on the Yield and Quality of Carrot. In: *Vegetable Crops Research Bulletin*. Vol. 67, 25-33.
- Eghbal, R. E. 2017. *Ökologischer Gemüsebau: Handbuch für Beratung und Praxis*. Mainz: Bioland Verlag GmbH.
- Ehlers, W. 1996. *Wasser in Boden und Pflanze: Dynamik des Wasserhaushalts als Grundlage von Pflanzenwachstum und Ertrag*. Stuttgart: Eugen Ulmer Verlag.
- Evers, A., Tuuri, H., Hägg, M. et al. 1997. Soil forming and plant density effects on carrot yield and internal quality. In: *Plant Foods Hum Nutr*. Vol. 51, 283-294.
- Fiedler, H. J. 2008. *Bodenwissenschaften und Landschaftsökologie: Böden, Standorte, Ökosysteme*. Renningen: expert-Verlag.
- Ferreira, A., Coelho, C., Walsh, R. et al. 2000. Hydrological implications of soil water-repellency in *Eucalyptus globulus* forests, north-central Portugal. In: *European Journal of Soil Science*. Vol. 231-232, 165-177.
- Finch-Savage, W., Steckel, J., & Phelps, K. 1998. Germination and post-germination growth to carrot seedling emergence: Predictive threshold models and sources of variation between sowing occasions. In: *New Phytologist*. Vol. 139:3, 505-516.
- Finnern, H. 1996. *Bodenkundliche Kartieranleitung*. Ad-Hoc Arbeitsgruppe Boden, 4. Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.). Stuttgart: Schweizerbart
- Fricke, E. 2010. *Berechnungsflächen in Deutschland*. Online, Zugriff am 02.10.2015 von <https://www.uni-giessen.de/fbz/fb09/forschung/hst/hst-2012/vortraege/frede.pdf>
- Flury, M., Flühler, H., Jury, W. et al. 1994. Susceptibility of soils to preferential flow of water: A field study. In: *Water resources research: a journal of the sciences of water*. Vol. 30, 1945-1954.
- Hack et al. 1992. Die erweiterte BBCH-Skala. Online, Zugriff am 02.10.2018 von <http://pub.jki.bund.de/index.php/BBCH/article/view/457/407>.
- Hartge, K. & Horn R. 2014. *Einführung in die Bodenphysik: mit 24 Tabellen*. Stuttgart: Schweizerbart

- Höing, C. 2013: Entwicklung und Konstruktion einer Düsenwagentechnik zur mehrphasigen Bewässerung von Dammkulturen. Masterarbeit am Lehrstuhl und Institut für Allgemeine Konstruktionstechnik des Maschinenbaus, Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen. RWTH Aachen.
- International Assessment of Agricultural Knowledge, Science & Technology for Development. 2009. Global report. In B. D. McIntyre (ed.), Washington, DC: Island Press.
- Köhler, W., Schachtel, G., Voleske, P. 2002. Biostatistik: eine Einführung für Biologen und Agrarwissenschaftler. Berlin: Springer.
- Krause, U., Koch, H., Schlinker, G. et al. 2007. Einfluss des Dammanbaus von Zuckerrüben auf Pflanzenentwicklung und Bodenparameter im Vergleich zur Flachsart. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Vol. 19, 172-173.
- Krebs, A., Egli, M., Schulin, H.R., Tobias, S. (ed.) 2017. Bodenschutz für die Praxis. Bern: Haupt Verlag.
- Krug, H. 2002. Gemüseproduktion: ein Lehr- und Nachschlagewerk für Studium und Praxis. Stuttgart: Ulmer.
- KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. 2013. Datensammlung „Freilandbewässerung – Betriebs- und Arbeitswirtschaftliche Kalkulationen“, Darmstadt: KTBL.
- Laber, H. 2014. Gemüsebau. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer Verlag.
- Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, 2017. Wetter. Online abgerufen am 3.3.2017 von <https://www.llh.hessen.de/pflanze/wetter/>
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen. 2012. AQUARIUS: Dem Wasser Wege geben. Projektbericht. Uelzen: LK Niedersachsen.
- Landwirtschaftskammer Schleswig-Holstein. 2018. 20% Gemüseanbaufläche Möhre. Online, Zugriff am 24.02.2018 von <https://www.lksh.de/landwirtschaft/pflanze/freilandgemuese/moehren/>
- Matsubara, H., Sugiyama, T. 1965. Influence of soil moisture content on germination and emergence of seeds. Journal of Japanese Agriculture. Vol. 34:2, 105-112.
- Meier, U. 2001. Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen: BBCH Monografie. Open Agrar Repository.
- Merdun, H., Meral, R., Riza Demirkiran, A. et al. 2008. Effect of the initial soil moisture content on the spatial distribution of the water retention. In: Eurasian Soil Science. Vol. 41, 1098–1106.
- Michel, R. 2014. Der Wasserhaushalt von mit Pflanzen bewachsenen Standorten. In: Bewässerung in der Landwirtschaft. Agrimedia [Clenze].
- Miegel, K. 2014. Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Bewässerungsbedarf. In: Bewässerung in der Landwirtschaft. Agrimedia [Clenze].

- Müller, E. 2009. Das Dammkultur-System nach Turiel. Untersuchungen auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen. Kassel: University Press.
- Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. 2017. Anteil der Biomöhren in Niedersachsen. Online, Zugriff am 24.02.2018 von <https://www.ml.niedersachsen.de/aktuelles/pressemitteilungen/oekolandbau-in-niedersachsen-mit-kraeftigem-wachstumsschub-158468.html>.
- Pachauri, R., Reisinger, A. 2007: IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Geneva: Switzerland.
- Panagos et al. 2017. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. *Journal of Hydrology*. Vol. 548, 251–26.
- Paschold, Peter-J. 2010. Bewässerung im Gartenbau, Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- Pietola, L., Salo, T. 2000. Response of P, K, Mg and NO₃-N contents of carrots to irrigation, soil compaction, and nitrogen fertilization *Agricultural and Food Science in Finland*, Vol. 9:4, 319-331.
- Riediger, J., Breckling, B., Nuske, R.S. et al. 2014. Will climate change increases irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study of Northern Germany. In: *Environmental Sciences in Europe* 26:18, 569-570.
- Riediger, J., Breckling, B., Svoboda, N., Schröder, W., 2016. Modelling regional variability of irrigation requirements due to climate change in Northern Germany. *Sci. Total Environ.* Vol. 541, 329-340.
- Ritsema, C. J., Dekker, L. W.; Heijs, W. J. 1997. Three-dimensional Fingered Flow Patterns in a Water Repellent Sandy Field Soil. In: *Soil Science* 162:2, 79-90.
- Robinson, D. 1999. A comparison of soil-water distribution under ridge and bed cultivated potatoes. *Agricultural Water Management*. Vol. 42, 189 – 204.
- Rolbiecki, S., Rolbiecki, R., Rzekanowski, C. et al. 2000. The Influence of Sprinkler Irrigation on Yields of Some Vegetable Crops in the Region of Bydgoszcz, Poland. *Acta Hort.* Vol. 537, 871-877.
- Sauerborn, P. et al. 1999. Future rainfall erosivity derived from large-scale climate models – methods and scenarios for a humid region. In: *Geoderma*. Vol. 93, 269 – 276.
- Scheffer, F.; Schachtschabel, P. 2010. *Lehrbuch der Bodenkunde*. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Schumann, P. 2014: Bedeutung der Wasserversorgung für die Pflanzen. In: Michel, R., *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Agrimedia [Clenze].
- Sourell, H. 1994. *Bewässerung im Gartenbau*. KTBL-Schriftenreihe. Münster-Hiltrup: KTBL - Schriften-Vertrieb im Landwirtschaftsverl. KTBL-Schrift; 359.
- Sourell, H. 2014): Technik – Planung und Anlage der Bewässerung. In: *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Agrimedia [Clenze].

- Sponagel, H. 2005: Bodenkundliche Kartieranleitung. Ad-Hoc Arbeitsgruppe Boden, 5. Auflage, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (Hrsg.) – Stuttgart: Schweizerbart.
- Statistisches Bundesamt. 2016a. Bewässerung in landwirtschaftlichen Betrieben. Agrarstrukturerhebung. Online, Zugriff am 18.01.2017 von https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Betriebe/BetriebeBewaesserung5411205169004.pdf?__blob=publicationFile.
- Statistisches Bundesamt. 2016b. Anbaufläche Möhre. Online, Zugriff am 24.02.2018 von <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/LandForstwirtschaftFische rei/ObstGemueseGartenbau/Tabellen/BetriebeAnbauErntemengeGemuese>.
- Symader, W. 2004. Was passiert, wenn der Regen fällt? : Einführung in die Hydrologie, Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer.
- Tamet, V., /Boiffin, J., Dürr, C. et al. 1996. Emergence and early growth of an epigeal seedling (*Daucus carota* L.): influence of soil temperature, sowing depth, soil crusting and seed weight. In *Soil and Tillage Research*. Vol. 40, 25-38.
- Terry J. P., Shakesby R. A. 1993. Soil hydrophobicity effects on rain splash: Simulated rainfall and photographic evidence. *Earth surface processes and landforms*, Vol. 18:6, 519–525.
- Umweltbundesamt. 2013. Zu erwartende Klimaänderung bis 2100. Online, Zugriff am 27.11.15 von <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/zu-erwartende-klimaaenderungen-bis-2100>.
- Umweltbundesamt. 2015. Landwirtschaftliche Beregnung. Online, Zugriff am 13.03.2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/lw-r-6-das-indikator#textpart-1>.
- Umweltbundesamt. 2017. Indikator Nutzung der Wasserressourcen. Online, Zugriff am 12.03.2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/indikator-nutzung-der-wasserressourcen#textpart-1>.
- Umweltbundesamt. 2018. Nutzung von Wasserressourcen. Online, Zugriff am 5.8.2018 von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/wasser/wasserressourcen-ihre-nutzung>.
- United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. 2014. Zugriff am 4.7.18 von <http://www.unesco.de/wissenschaft/2014/weltwasserbericht2014.html>.
- Universität Kassel (Hrsg.) 2016. Versuchsanlage für Bewässerungs- und Solartechnik. Kennzeichnung des Klimas. Fachgebiet Agrartechnik. Online, Zugriff am 02.10.2017 von <https://www.uni-kassel.de/fb11agrar/de/fachgebiete-einrichtungen/versuchsgelaende-dach/standortbeschreibung/klima.html>.
- Universität Kassel (Hrsg.) 1996. Bodenkundliche Untersuchungen des kulturtechnischen Demonstrationsgeländes Am Sande /Witzenhausen. Fachgebiet Kulturtechnik. Universität Kassel-Witzenhausen.
- Wallis, M.G., Horne, D.J. 1992. Soil water repellency. In: *Advanced Soil Science*. Vol. 20, 91-146.
- Walling, D. E. 1983. The sediment delivery problem. In: *Journal of hydrology* 65, 209 – 237.

- Wang Z. , Wu Q.J., Wu L., C.J., Dekker L.W., Feyen J. (2000): Effects of soil water repellency on infiltration rate and flow instability. *Journal of Hydrology*. Vol. 231:232, 265–276.
- Weltagrarbericht. 2019. Zugriff am 2.1.2019 von <https://www.weltagrarbericht.de/themen-des-weltagrarberichts/wasser.html>.
- Woche S.K., Goebel M.O., Kirkham M.B., Horton R., Van der Ploeg R.R., Bachmann J. 2005. Contact angle of soils as affected by depth texture and land management. *European Journal Soil Sciences*. Vol. 56, 239-251.
- Wonneberger, C. (2004). *Gemüsebau*. Mit 117 Tabellen. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer.
- WWAP United Nations World Water Assessment Programme. 2012. *The United Nations World Water Development Report: Water under Uncertainty and Risk*. Paris: UNESCO.
- WWAP United Nations World Water Assessment Programme. 2015. *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*. Paris, UNESCO.
- Yakoubi, S., Zayani K., Zapata, N. 2010. Day and night time sprinkler irrigated tomato: Irrigation performance and crop yield. In: *Biosystems Engineering*. Vol. 107:1, 25 - 35
- Zhang, Y.-G. et al. 2010. Projected rainfall erosivity changes under climate change from multimodel and multiscenerio projections in Northeast China. In: *Journal of Hydrology*. Vol. 384, 97-106.
- Zhang,Y., Wu, P., Zhao, X./ WangZ. 2013. Simulation of soil water dynamics for uncropped ridges and furrows under irrigation conditions. In: *Canadian Journal of Soil Science*. Vol. 93:1, 85-9.
- Zhang,Y, Zhao, X., Wu, P. 2015. Soil Wetting Patterns and Water Distribution as Affected by Irrigation for Uncropped Ridges and Furrows. In: *Pedosphere, Soil Science Society of China*. Vol. 25:3, 468–477.
- Zhang R. (1997) Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. In: *Soil Science Society of Amercia Journal*. Vol. 61, 1024 – 1030
- Wu, G., Yang, Z., Cui, Z., Liu, Y., Fang, N.F., Shi, Z. 2016. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity. *J. Hydrol*. Vol. 535, 54-60.

Danksagung

Allen, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben, danke ich sehr herzlich:

Herrn Prof. Dr. Oliver Hensel für die konstruktive Anregung und Diskussion in der wissenschaftlichen Betreuung sowie für das mir entgegengebrachte Verständnis,

Herrn Prof. Dr. Stephan Peth für die Übernahme des Korreferats, die fachliche Beratung und für die Nutzung der Labore des Fachgebiets Bodenkunde,

meinen Kolleginnen und Kollegen aus dem Fachbereich, insbesondere des Fachgebietes Agrartechnik, für die vielen konstruktiven Gespräche und Anregungen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Christian Schellert für die Unterstützung bei der Umsetzung der Feldversuche auf der Versuchsanlage für Solar- und Bewässerungstechnik in Witzenhausen sowie seiner positiven Draufsicht und seinem Ansporn,

Herrn Dr. Christian Krutzinna, Geschäftsführer der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen, sowie seinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern für die Unterstützung bei der Umsetzung der Feldversuche,

der Universität Kassel für die finanzielle Förderung des Promotionsvorhabens durch ein Abschlussstipendium für Promovierende

und nicht zuletzt

meiner Nachbarin Gerda für die Unterstützung bei der Bewältigung des Alltags als Alleinerziehende, für die unzähligen Stunden, in denen sie meine Tochter Naja liebevoll betreut und uns im täglichen Leben unterstützt hat. Ebenso danke ich meinen Freunden für das Zuhören, für kleine Auszeiten vom Alltag und die Lebensfreude, die sie mit mir geteilt haben. Mein besonderer Dank gilt einem guten Freund für die zahlreichen Gespräche zum Austausch und inneren Wachstum sowie für die zwölfmonatige finanzielle Unterstützung,

meinem Bruder Richard für sein offenes Ohr und seine technischen Tipps und meiner Mutter Erika für die vielen Momente des Bestärkens und Mutmachens zum Durchhalten sowie für die Korrektur der gesamten Arbeit. Als einst gelernte Meliorationstechnikerin und Ausstellerin der rollenden Beregnungsanlage *FREGAT* auf der Messe der Meister von Morgen 1973 in Leipzig setzt sich das Thema Beregnung in der Familie fort, auch wenn meine Mutter an ihre Ausbildung ein Pädagogikstudium anschloss. Am aller meisten freut sich meine Tochter Naja (Jg. 2010), dass ich „das Buch“ endlich fertig und wieder mehr Zeit für sie habe.