

Tropfbewässerung und Fertigation bei Hopfen



Impressum

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

Redaktion: Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
Arbeitsgruppe Hopfenbau, Produktionstechnik
Kellerstr. 1, 85283 Wolnzach
E-Mail: hopfenbau.wolnzach@LfL.bayern.de
Telefon: 08161 8640-2400

Druck: 1. Auflage, März 2021

Schutzgebühr: 10,00 Euro

© LfL Alle Rechte beim Herausgeber



Tropfbewässerung und Fertigation bei Hopfen

Johannes Stampfl

Stefan Fuß, Jakob Münsterer, Johann Portner, Andreas Schlagenhauser

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
1 Einleitung	11
2 Besondere Eigenschaften des Hopfens.....	12
3 Aufbau von Bewässerungsanlagen.....	16
3.1 Wassergewinnung.....	16
3.2 Anlagenplanung	20
3.3 Filter und Verteilstation.....	23
3.4 Wasserverteilung	25
3.5 Bewässerungsverfahren	29
4 Auswirkungen von Bewässerung und Fertigation.....	36
4.1 Bedeutung von Fertigation	37
4.2 Ertrag und Qualität	38
4.3 Effekte durch Fertigation.....	43
4.4 Umweltrelevante Effekte	46
5 Bewässerungsmanagement	50
5.1 Wasserbedarf des Hopfens	50
5.2 Wasserspeichervermögen des Bodens.....	53
5.3 Ermittlung des Bewässerungsbedarfs.....	56
5.4 Wasserausbringung und Bewässerungsintervalle.....	60
5.5 Düngereinspeisung – N-Düngesysteme mit Fertigation.....	66
6 Literatur	74

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: unbewässerter Hopfen (links) und bewässerter Hopfen (rechts) im Jahr 2015.....	11
Abb. 2.1: Hopfengerüstanlage mit V-förmiger Aufleitungsform und 3,2 m Reihenabstand.	12
Abb. 2.2: Morphologie des Wurzelsystems einer Hopfenpflanze (eigene Darstellung nach: Graf (2016)).....	13
Abb. 2.3: Biomasseentwicklung des Hopfens im Wachstumsverlauf (eigene Darstellung nach: Niedermeier (2020) und Portner et al. (2007)).	14
Abb. 3.1: Schematischer Aufbau einer Bewässerungsanlage.....	16
Abb. 3.2: Errichtung eines Schachtbrunnens.....	18
Abb. 3.3: Errichtung eines Tiefbrunnens im trockenen Rammkern-Bohrverfahren.	18
Abb. 3.4: Errichtung eines Tiefbrunnens im Nass- bzw. Spülbohrverfahren.....	19
Abb. 3.5: Unterwasserpumpe und Einbau in einen Tiefbrunnen.	20
Abb. 3.6: Anlagenplan einer Bewässerungsanlage für 23,5 ha, 13 Parzellen und 3 Bewässerungsgruppen.....	22
Abb. 3.7: Beispiele für die Errichtung einer Filter- und Verteilstation in einem Gebäude (oben) bzw. einem Container (unten).	23
Abb. 3.8: Beispiel für eine Düngerdosierstation im Bypass-Verfahren (verändert nach: Netafim (2017)).....	24
Abb. 3.9: Errichtung eines Hauptleitungsnetzes mit Grabenfräse und Minibagger.....	25
Abb. 3.10: Errichtung einer Ventilstation in einem Elektroinstallationskasten oder einem Schachtring.....	26
Abb. 3.11: Unterirdische Errichtung der Kollektorleitung.....	27
Abb. 3.12: Errichtung der Kollektorleitung am Gerüst mit zusätzlichem Seil.....	28
Abb. 3.13: Möglichkeiten zur Positionierung des Tropfschlauches - schematische Darstellung.	30
Abb. 3.14: Oberirdische Verlegung des Tropfschlauches in einer Führungsfurche auf dem Bifang und Aufrollen der Tropfschläuche im Herbst nach der Ernte.	31
Abb. 3.15: Unterirdische Installation des Tropfschlauches neben dem Bifang.	32
Abb. 3.16: Installation des Tropfschlauches in der Fahrgassenmitte.	32
Abb. 3.17: Spülung der unterirdischen Tropfschläuche.....	33
Abb. 3.18: Befestigung des Tropfschlauches auf Gerüsthöhe.....	34

Abb. 4.1: Versuchsaufbau zur Bewässerung mit Fertigation	36
Abb. 4.2: Vergleich eines N-Düngesystems mit ausschließlich granulierter N-Düngung und eines kombinierten Systems mit Fertigation.	38
Abb. 4.3: Versuchsvarianten eines 3-jährigen Feldversuchs im Zeitraum von 2017 bis 2019 an der Sorte Perle auf einem sandigen Boden zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen.	38
Abb. 4.4: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Doldenertrag und Alphasäuregehalt (3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019) der Sorte Perle auf einem sandigen Boden; N-Düngung: 150 bis 180 kg N/ha.	39
Abb. 4.5: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Alphaertrag (3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019) der Sorte Perle auf einem sandigen Boden; N-Düngung: 150 bis 180 kg N/ha.	40
Abb. 4.6: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Doldenertrag und Alphasäuregehalt – Relative Darstellung der Ergebnisse in den Einzeljahren 2017, 2018 und 2019; Referenz: Keine Bewässerung & Gestreut.....	41
Abb. 4.7: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Doldenertrag und Alphasäuregehalt in Abhängigkeit der Bodenqualität (Differenzierung in Hangober- vs. Hangunterseite) – 3-jährige Mittelwerte der Sorte Perle von 2017 bis 2019.	42
Abb. 4.8: Wasserverteilung im Boden in Abhängigkeit der Bodenart (ALB Bayern, 2020).	43
Abb. 4.9: Einfluss von Fertigation auf den Alphaertrag der Sorte Herkules bzw. Doldenertrag der Sorte Perle bei exakt gleicher Bewässerung – 3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019 eines sandigen und lehmigen Bodens (je Sorte n = 6).....	44
Abb. 4.10: Einfluss des N-Düngesystems auf den Alphasäuregehalt der Sorte Herkules.	45
Abb. 4.11: Einfluss von Bewässerung auf die Pflanzenmasse und Stickstoffaufnahme der Sorte Perle auf einem sandigen Standort und Nmin-Gehalt im Boden im Herbst nach der Ernte.....	47
Abb. 4.12: Einfluss von Bewässerung und Fertigation auf den Verlauf des Nmin-Gehalts im Zeitraum von 2017 bis 2020.....	48

Abb. 4.13: Einfluss von Fertigation auf die Pflanzenmasse und N-Aufnahme der Sorte Perle auf einem lehmigen Boden (2-jährige Mittelwerte der Jahre 2018 und 2019).	49
Abb. 5.1: Entwicklung von Evaporation und Transpiration im Wachstumsverlauf einer Pflanze (eigene Darstellung nach: Allen et al. (1998)).	51
Abb. 5.2: Wachstumsverlauf, täglicher Wasserverbrauch und Bewässerungsperiode bei Hopfen (eigene Darstellung nach Niedermeier (2020)).	52
Abb. 5.3: Einteilung der Porengrößen eines Bodens.	54
Abb. 5.4: Ergebnisdarstellung der Bewässerungs-App (verändert nach ALB Bayern (2020)).	59
Abb. 5.5: Ergebnisdarstellung der Bewässerungs-App (verändert nach ALB Bayern (2020)).	59
Abb. 5.6: Möglichkeiten zur Verteilung des berechneten Bewässerungsbedarfs über einen 7-tägigen Zeitraum.	61
Abb. 5.7: Wasserverteilung im Boden in Abhängigkeit der Bodenart (ALB Bayern, 2020).	61
Abb. 5.8: Mittlerer Boden mit ausreichender horizontaler Wasserverteilung bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung neben dem Bifang.	62
Abb. 5.9: Oberirdische Wasseransammlung bei unterirdischer Bewässerung neben dem Bifang auf tonigem Boden bei Ausbringung zu hoher Einzelgaben.	62
Abb. 5.10: Einbau von Bodenfeuchtesensoren im Feld bei Hopfen (verändert nach Münsterer (2012)).	65
Abb. 5.11: Beispiel 1 - Mineralisches N-Düngesystem mit 50 % Fertigation und Ausbringung ab KW25	67
Abb. 5.12: Düngereinspeisung – Nur einzelne Wassergaben enthalten Stickstoff.	69
Abb. 5.13: Düngereinspeisung – Jede Wassergabe enthält Stickstoff.	70
Abb. 5.14: Leckage an den Tropfschläuchen durch falsche Befestigung am Reihenende (links) oder mechanische Beschädigung des Tropfschlauches innerhalb der Reihe (rechts).	71
Abb. 5.15: Beispiel eines Einspeisevorgangs mit 3,5 Std. Gesamtlaufzeit.	72

Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1: Hopfenspezifische kc-Faktoren (Allen et al. (1998) und eigene Versuchserfahrungen).	52
Tab. 5.2: Zusammenhang zwischen Porengröße und Speicherkapazität (eigene Darstellung nach Eckelmann (2005)).	54
Tab. 5.3: nFK-Werte für unterschiedliche Bodenarten in Vol.% bzw. mm pro 10 cm Bodentiefe (eigene Darstellung nach Müller und Ebertseder (2020)).	55
Tab. 5.4: Beispiel 1 - Mineralisches N-Düngesystem mit 50 % Fertigation und Ausbringung ab KW26	68
Tab. 5.5: Beispiel 2 - Mineralisches N-Düngesystem mit 33 % Fertigation und Ausbringung ab KW25 bzw. KW26	68
Tab. 5.6: Beispiel 3: Mineralisches / Organisches N-Düngesystem mit 28 % Fertigation.	68

1 Einleitung

Die Sonderkultur Hopfen stellt für eine optimale Pflanzenentwicklung und ein stabiles Ertrags- und Qualitätsniveau hohe Ansprüche an die Wasserversorgung. In den semiariden Anbaugebieten der Welt ist Bewässerung deshalb eine Grundvoraussetzung, ohne die der Hopfenanbau dort nicht möglich wäre. Der globale Klimawandel führt jedoch auch in eher humiden Regionen wie der Hallertau in Bayern, dem bedeutendsten Hopfenanbaugebiet der Welt, zu einer Zunahme der Häufigkeit sowie Intensität von Wetterextremen wie Trockenperioden und Starkniederschlägen. Die Folge daraus ist eine ungleichmäßige Wasserversorgung, wodurch die Pflanzenentwicklung eingeschränkt wird und erhebliche Ertrags- und Qualitätseinbußen resultieren. Somit hat die Bewässerung des Hopfens zur Stabilisierung von Ertrag und Qualität und zur Minimierung des Anbaurisikos in den vergangenen Jahren auch in der Hallertau stark an Bedeutung gewonnen.

Neben der Sicherstellung der Wasserversorgung von Pflanzen bieten Bewässerungssysteme weiterhin die Möglichkeit, zusammen mit dem Wasser bedarfsgerecht und gezielt Pflanzennährstoffe auszubringen. Diese, als Fertigation bezeichnete Form der Düngung, ist hocheffizient und kann zukünftig einen wesentlichen Beitrag zur Verringerung von Nährstoffausstragen in andere Ökosysteme leisten.



Abb. 1.1: unbewässerter Hopfen (links) und bewässerter Hopfen (rechts) im Jahr 2015.

2 Besondere Eigenschaften des Hopfens

Da eine Hopfenpflanze bei optimaler Bewirtschaftung je nach Sorte und Standort 25 Jahre und länger gleichbleibend hohe Erträge liefern kann, wird die Sonderkultur Hopfen auch als Dauerkultur bezeichnet. Im Anbaugebiet Hallertau erfolgt der Anbau der Dauerkultur unter 6 bis 7 m hohen Gerüstanlagen, da die Triebe der Pflanzen sogenannte Aufleitdrähte oder Aufleitschnüre als Kletterhilfe benötigen. Dazu werden je Pflanze zwei Eisendrähte im Stockbereich im Boden verankert und in einer V-förmigen Anordnung oben am Drahtgerüst befestigt (vgl. Abb. 2.1). Jeweils drei manuell angeleitete Triebe pro Draht wachsen von Mai bis Ende Juni in Form einer zylindrisch gestalteten Hopfenrebe in die Höhe. Bei einem Reihenabstand von 3,2 Meter beträgt der Pflanzabstand innerhalb der Reihe in der Regel 1,5 Meter, wodurch sich ein Standraum von 4,8 m² je Einzelpflanze oder 2,4 m² je Hopfenrebe bei einer Gesamtanzahl von ca. 2.000 Pflanzen je Hektar ergeben. Die Bereiche zwischen den einzelnen Pflanzreihen dienen vor allem als Fahrspuren für Kulturmaßnahmen und werden regelmäßig mit Zwischenfrüchten zum Erosionsschutz begrünt.



Abb. 2.1: Hopfengerüstanlage mit V-förmiger Aufleitungsform und 3,2 m Reihenabstand.

Die perennierenden Eigenschaften der Dauerkultur Hopfen beruhen auf unterirdischen, im Boden überdauernden Pflanzenorganen. Diese können aufgrund morphologischer sowie funktioneller Unterschiede unterteilt werden. Während die Knospen am größtenteils verholzten Sprossgewebe des Vorjahres für den Austrieb verantwortlich sind, dienen die verschiedenen Wurzeltypen des Wurzelsystems der Aufnahme von Wasser und Nährstoffen, aber auch der Speicherung von Reservestoffen für den Wiederaustrieb. Eine Besonderheit des Hopfens stellt die horizontale und vertikale Ausdehnung des Wurzelsystems dar, wodurch jede Einzelpflanze grundsätzlich ein großes Bodenvolumen erschließen kann (vgl. Abb. 2.2). Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Ausbreitung (Morphologie) des

Wurzelsystems maßgeblich durch Faktoren wie Bodeneigenschaften (Bodenart und Bodentyp, Verdichtungshorizonte, Staunässe), die Sorte sowie die Bewirtschaftung beeinflusst wird. Vor allem unterhalb der jeweils unmittelbar neben den Pflanzreihen verlaufenden Fahrspuren können Verdichtungszone entstehen, wodurch sich die Durchwurzelungsintensität in diesem Bereich verringert. Bei Wurzelgrabungen erreichten einzelne, vertikal verlaufende Wurzeln unmittelbar unterhalb des Wurzelstocks eine Tiefe von bis zu 1,8 m. Da die Durchwurzelungsintensität jedoch variiert und in der Fahrspurenmitte deutlich geringer ist, kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere Durchwurzelungstiefe bei 80 bis 100 cm liegt, vorausgesetzt die Bodenverhältnisse lassen dies zu.

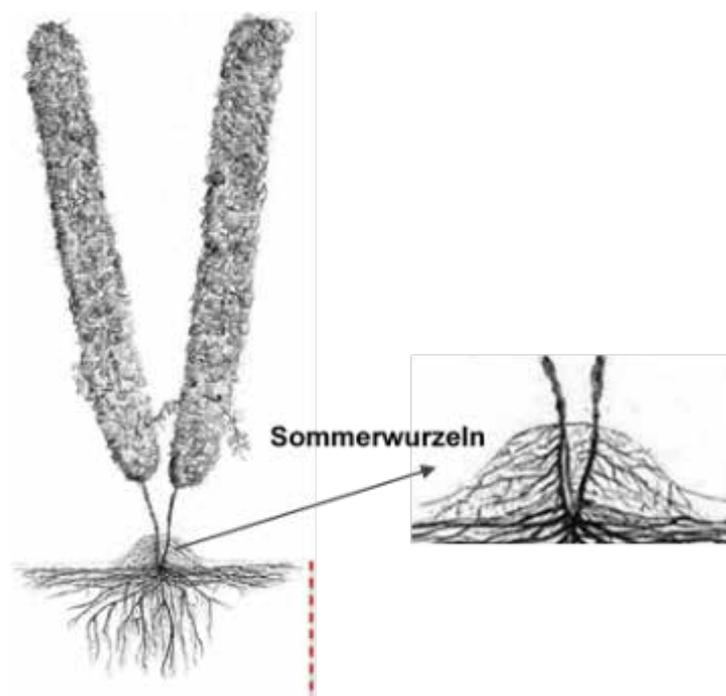


Abb. 2.2: Morphologie des Wurzelsystems einer Hopfenpflanze (eigene Darstellung nach: Graf (2016))

Im Zuge der Ernte werden alle oberirdischen Teile der Hopfenpflanze entfernt, weshalb die Einlagerung von Reservestoffen bei Hopfen von besonderer Bedeutung ist. Der Wiederaustrieb im darauffolgenden Frühjahr erfolgt durch die über diese Reservestoffe ernährten Knospen. Die Einlagerung der Reservestoffe in die Speicherwurzeln dauert bis zum Blattfall (physiologische Reife) oder wie bei der Kultivierung bis zur Ernte der Pflanzen. Erfolgt jedoch eine zu frühe Ernte, sind noch nicht ausreichend Reservestoffe in die Speicherwurzeln eingelagert, wodurch die Pflanzen im Folgejahr eine geringere Vitalität und Widerstandskraft aufweisen.

Im Frühjahr werden je nach Anbaugebiet verschiedene mechanische und chemische Verfahren zur zeitlichen Steuerung des Austriebs sowie zur Unterdrückung von falschem und echtem Mehltau angewendet. In der Hallertau erfolgt in der Regel ein mechanisches Zurückschneiden der unterirdischen Sprossorgane des Vorjahres, wodurch ein Teil der Knospen sowie der aufgeschüttete Damm entfernt werden. Aus den verbleibenden Knospen

entwickeln sich von einer Pflanze anschließend bis zu 40 Triebe, von denen Ende April bis Anfang Mai je 3 an die zwei Aufleitdrähte oder -schnüre angeleitet werden.

Im Vegetationsverlauf werden durch das zweimalige sogenannte Aufackern entlang der Pflanzreihen neue Dämme (Bifänge) aufgeschüttet und geformt, wodurch das Austreiben weiterer Triebe aus dem Wurzelstock verhindert und das Unkrautwachstum unterdrückt wird. Am unteren Abschnitt der verschütteten Haupttriebe bilden die Pflanzen sogenannte sekundäre Sommerwurzeln aus, die eine weitere Besonderheit des Hopfens darstellen (vgl. Abb. 2.2). Diese direkt am Spross gebildeten Feinwurzeln können sehr effektiv Nährstoffe und Wasser aufnehmen. Die Intensität der Durchwurzelung variiert in Abhängigkeit von Bodenart, Witterung und Bewirtschaftung, häufig wird das gesamte Dammvolumen erschlossen.

Im Hinblick auf die Beurteilung des Wasserverbrauchs sowie des Bewässerungsbedarfs ist vor allem die Biomasseentwicklung der Hopfenpflanze im Wachstumsverlauf von Bedeutung (vgl. Abb. 2.3). Nach dem Anleiten der Haupttriebe findet zunächst unter geringem Biomassezuwachs das Längenwachstum dieser statt. Die Haupttriebe sind durch Nodien untergliedert, deren Anzahl und Abstand von der Sorte, dem Anbaujahr und den Wachstumsbedingungen abhängig sind.

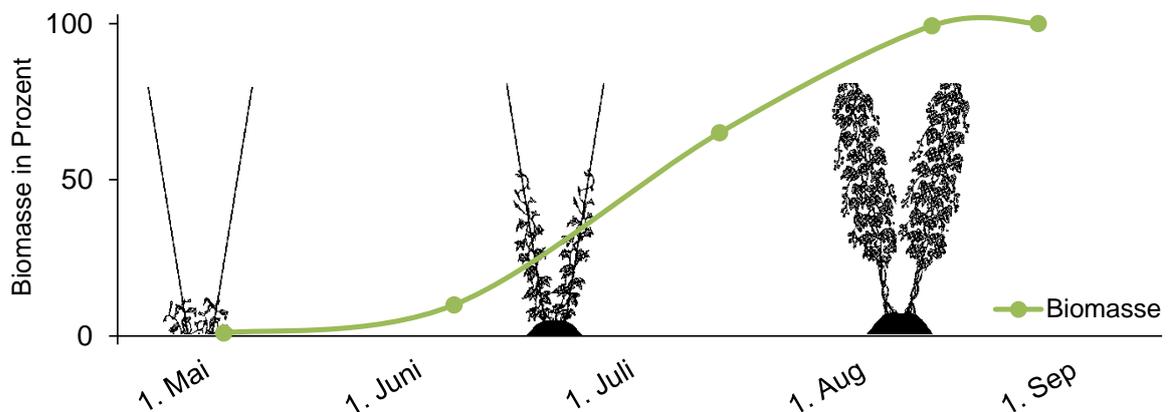


Abb. 2.3: Biomasseentwicklung des Hopfens im Wachstumsverlauf (eigene Darstellung nach: Niedermeier (2020) und Portner et al. (2007)).

An den Nodien bilden die Pflanzen zwei gegenständige langgestielte Laubblätter aus. Nachdem die Hopfenpflanze eine bestimmte Wuchshöhe und Anzahl an Nodien erreicht hat, etwa bei halber Gerüsthöhe, beginnt zwischen Ende Mai und Mitte Juni die Ausbildung der in den Blattachsen angelegten Seitentriebe. Die Biomassebildungsrate der Hopfenpflanze steigt kontinuierlich an. Nach dem Erreichen der Gerüsthöhe (Ende Juni) werden in der Regel die höchsten Zuwachsraten erreicht. Hinsichtlich des Wasserverbrauchs ist auch die Blattflächenentwicklung von Bedeutung, diese kann je nach Sorte stark variieren. Im Gegensatz zu anderen Kulturpflanzen erreicht Hopfen mit einem Blattflächenindex (BFI) von bis 9 eine deutlich höhere Blattfläche.

Der Übergang vom vegetativen Wachstum in die generative Phase beginnt unter den Bedingungen in der Hallertau ab Anfang Juli, ausgelöst durch bestimmte Lichtverhältnisse. Je nach Sorte und Wachstumsverhältnissen vollzieht sich die Blüte über einen Zeitraum von 3 bis 4 Wochen. Im Verlauf der Ausdoldung entwickeln sich die Blüten ab Anfang August zu einer zusammengesetzten Dolde, bestehend aus einer gewellten Spindel mit Deck- und Vorblättern. An den Vorblättern sitzen die Lupulindrüsen, welche nach der Ausbildung der Dolde ein gelbes klebriges Pulver (Lupulin) mit den wertgebenden Inhaltsstoffen synthetisieren. Da die Reifezeitpunkte der Hopfensorten stark variieren, unterschieden sich auch die sortenspezifischen Erntefenster. Je nach Sorte unterscheidet sich somit auch die Länge der Bewässerungsperiode. Aufgrund dessen, dass Hopfen nicht im Zustand der physiologischen Reife geerntet wird, können bis zur Ernte noch hohe Verdunstungsraten erreicht werden.

3 Aufbau von Bewässerungsanlagen

Im Rahmen dieses Kapitels werden unterschiedliche Aspekte erläutert, die beim Aufbau von Bewässerungsanlagen zu beachten sind. Nachfolgend wird zunächst der grundsätzliche schematische Aufbau einer Bewässerungsanlage dargestellt (Abb. 3.1).

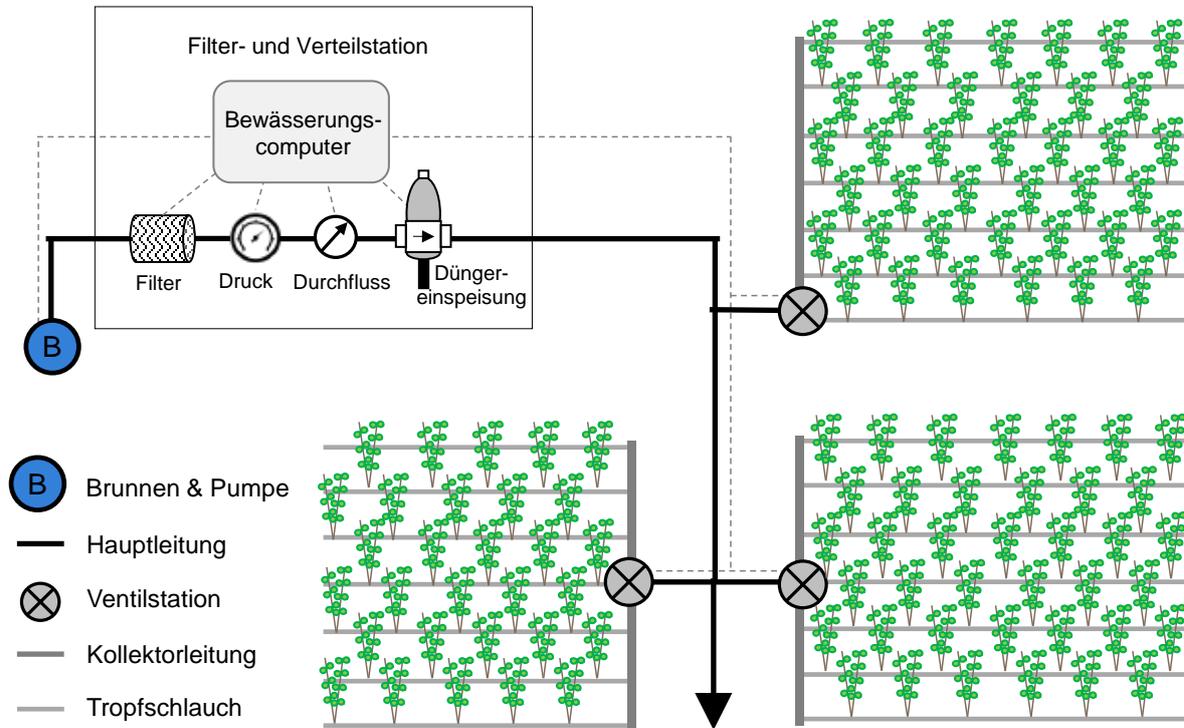


Abb. 3.1: Schematischer Aufbau einer Tropfbewässerungsanlage.

3.1 Wassergewinnung

Vor der Errichtung einer Bewässerungsanlage ist zunächst zu prüfen, welche Wasserressourcen zur Gewinnung von Bewässerungswasser überhaupt genutzt werden können. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit der Speicherung von Niederschlagswasser oder die Entnahme aus Oberflächengewässern und aus dem Grundwasser. Bei der Auswahl der Wasserressourcen ist neben der Ergiebigkeit vor allem das nachhaltig und umweltverträglich nutzbare Wasserdargebot unter Berücksichtigung des klimatischen Wandels von Bedeutung. Neben der im Folgenden näher beschriebenen Entnahme aus dem Uferfiltrat bzw. oberflächennahen Grundwasser sollten künftig vermehrt die Möglichkeiten zur Wasserspeicherung (z. B. Folienspeicher) in die Betrachtung miteinbezogen werden.

Rechtliche Rahmenbedingungen:

Die Entnahme von Wasser aus Oberflächengewässer oder dem Grundwasser zur Bewässerung ist grundsätzlich genehmigungspflichtig. Grundlegende Informationen zum Thema Wasserbeschaffung für Bewässerung sowie Antragsformulare werden vom Landesamt für Umwelt zur Verfügung gestellt.



<https://www.lfu.bayern.de/wasser/bewaesserung/index.htm>

Antragsformulare sind auch auf der Internetseite des „Haus des Hopfens“ zu finden.



<https://www.haus-des-hopfens.org/infos-zu-bewaesserung>

Zu beachten ist, dass die Errichtung einer Wassergewinnungsanlage sowie die anschließende Wasserentnahme bei der zuständigen Kreisverwaltungsbehörde und dem zuständigen Wasserwirtschaftsamt zu beantragen sind.

Errichtung von Wassergewinnungsanlagen:**Schachtbrunnen:**

Die Errichtung von Schachtbrunnen erfolgt in der Regel im Bereich des Uferfiltrats von Flüssen oder im Falle von oberflächennahen kieshaltigen wasserführenden Schichten in Tal-lagen (vgl. Abb. 3.2). Der Ausbau eines Schachtbrunnens ist technisch bedingt nur bis zu einer Tiefe von 6 bis 8 Metern möglich. Informationen zum sicheren Umgang mit Schachtbrunnen sind auf der Website der ALB im Beratungsblatt „Sicherer Umgang mit Bewässerungsbrunnen“ zu finden:



<https://www.alb-bayern.de/De/Bewaesserung/BewaesserungsforumBayern/ressourcenschonend-umweltvertraeglich-effizient-Ergebnisse>



Abb. 3.2: Errichtung eines Schachtbrunnens.

Tiefbrunnen:

An Standorten, an denen die wasserführenden Kiesschichten tiefer als 6 bis 8 Meter liegen, ist die Errichtung eines Tiefbrunnens im Bohrverfahren notwendig. Dabei kann das sogenannte trockene Rammkern-Bohrverfahren (vgl. Abb. 3.3) oder das Nass- bzw. Spülbohrverfahren (vgl. Abb. 3.4) eingesetzt werden.



Abb. 3.3: Errichtung eines Tiefbrunnens im trockenen Rammkern-Bohrverfahren.



Abb. 3.4: Errichtung eines Tiefbrunnens im Nass- bzw. Spülbohrverfahren.

Brunnenleistung:

Die Leistung eines Brunnens wird durch den Wasserzufluss aus den umliegenden Bodenschichten bestimmt. Sind wasserführende Schichten vorhanden, gilt: Je höher der Kiesanteil und je größer der Kies, desto stärker ist der Zufluss (vgl. Abb. 3.4). Zu beachten ist, dass der Grundwasserpegel im Brunnen nur bis zu einem bestimmten Niveau abgesenkt werden darf. Die Leistung eines Brunnens wird i.d.R. in Liter pro Sekunde oder in Kubikmeter pro Stunde angegeben ($\text{m}^3/\text{Std.} = \text{Liter}/\text{Sek.} \times 3,6$). Hinsichtlich der Brunnenleistung ist zu unterscheiden zwischen der konstanten Leistung und der Spitzenleistung. Die Ermittlung der tatsächlichen Leistung erfolgt im Rahmen eines Pumpversuchs.

Dimensionierung der Pumpe:

Die Förderleistung der Pumpe ist zwingend an die Brunnenleistung anzupassen. Ist die Pumpenleistung zu groß dimensioniert, kann dies zu Schäden am Brunnen und Verringerung der Leistung des Brunnens führen. Hinsichtlich des maximal notwendigen Pumpendrucks sind die Brunntiefe sowie die spezifischen Gegebenheiten des Gebiets, in dem die Bewässerungsanlage errichtet werden soll (Höhenunterschiede, Zuleitungslänge), zu berücksichtigen. Grundsätzlich empfiehlt sich der Einsatz drehzahl geregelter Pumpen, so dass eine stufenlose Anpassung der Förderleistung ($\text{m}^3/\text{Std.}$) möglich ist. Die Regelung der Pumpe kann entweder druck- oder volumenbasiert erfolgen. Häufig werden sogenannte Unterwasserpumpen genutzt (Abb. 3.5). Diese können sowohl bei Schacht- als auch bei Tiefbrunnen

eingesetzt werden. In Abhängigkeit der Gegebenheiten des zu bewässernden Gebiets kann zusätzlich der Einsatz einer Druckerhöhungspumpe notwendig sein.



Abb. 3.5: Unterwasserpumpe und Einbau in einen Tiefbrunnen.

3.2 Anlagenplanung

Die Anlagenplanung und -auslegung ist der erste Schritt im Rahmen der Errichtung einer Bewässerungsanlage. Für die Durchführung der Planung werden folgende Informationen benötigt:

- zur Verfügung stehende Wassermenge oder Brunnenleistung
- Bewässerungsverfahren und Wasserbedarf
- Fläche der zu bewässernden Schläge und Gesamtfläche
- Entfernung der Schläge vom Brunnen
- möglicher Zuleitungsverlauf
- Relief und Höhenunterschiede

Ermittlung des Wasserausstoßes:

Ein wesentlicher Aspekt in der Planung ist die Ermittlung des Wasserausstoßes in Kubikmeter je Stunde und Hektar auf Basis des verwendeten Bewässerungsverfahrens. Für ein Tropfbewässerungssystem wird der Wasserausstoß in Abhängigkeit des Reihenabstands und verwendeten Tropfschlauches mit nachfolgender Formel berechnet. Zu beachten ist bei der Berechnung des tatsächlichen Wasserbedarfs je Hektar, dass bei Hopfen aufgrund des Vorgehendes nicht die gesamte Fläche bewässert wird.

$$\text{Ausstoß} = [(10.000 \text{ m}^2 / \text{Reihenabstand}) / \text{Tropfabstand}] \times (\text{Tropferausstoß} / 1000)$$

Berechnungsbeispiel:

Tropfschlauch: 0,5 m Tropfabstand, 1,0 l/Std. Tropferausstoß

Reihenabstand: 3,2 m

$$[(10.000 \text{ m}^2 / 3,2 \text{ m}) / 0,5 \text{ m}] \times (1,0 \text{ l/Std.} / 1000) = 6,25 \text{ m}^3/\text{Std.}$$

$$6,25 \text{ m}^3/\text{Std.} = 0,625 \text{ mm/Std.}$$

Einteilung der Bewässerungsparzellen:

In einem weiteren Schritt müssen im Rahmen der Planung feste Einheiten, z. B. ein einzelnes Feld oder eine bestimmte Anzahl an Reihen eines Feldes, die immer gleichzeitig bewässert werden, eingeteilt werden. Diese werden auch als zu bewässernde Parzellen bezeichnet. Wichtig dabei ist, dass keine zu großen Einheiten gebildet werden. Bei sehr großer Reihenlänge oder starker Differenzierung des Bodens innerhalb der Reihe kann unter Umständen auch eine Unterteilung innerhalb der Reihen sinnvoll sein. Folgende Kriterien sollten bei der Einteilung der zu bewässernden Parzellen berücksichtigt werden:

- einzelne Schläge (evtl. Unterteilung großer Schläge)
- Sortentrennung
- Bodenunterschiede
- Anpassung der Parzellengröße an Brunnenleistung

Bildung von Bewässerungsgruppen:

In der Regel wird je nach verfügbarer Wassermenge nicht nur eine einzelne Einheit oder Parzelle bewässert, sondern mehrere gleichzeitig. Deshalb erfolgt die Bildung sogenannter Bewässerungsgruppen, bestehend aus mehreren Parzellen. Die Zuteilung einer Einheit oder Parzelle zu einer Gruppe kann nach folgenden Faktoren vorgenommen werden:

- Sorten
- Bodenarten
- Tropfschlauchposition
- N-Düngung (im Hinblick auf Fertigation)
- Entfernung von der Filter- und Verteilstation (nicht sinnvoll ist z.B. die Zusammenfassung mehrerer Einheiten am Ende einer langen Hauptleitung)

Wie viele Gruppen tatsächlich gebildet werden müssen, ist abhängig von der verfügbaren Brunnenleistung, dem berechneten Wasserausstoß sowie der gesamten zu bewässernden Fläche. Die notwendige Anzahl an Gruppen kann nach folgendem Schema ermittelt werden:

Berechnungsbeispiel:

40 ha Hopfenfläche, 18 Schläge, Brunnenleistung 42 m³/Std.

40 ha x 6,25 m³/ha/Std. = 250 m³/Std.

250 m³/Std. ÷ 42 m³/Std. = **6 Gruppen** mit je 42 m³/Std.

24 Std. ÷ 6 Gruppen = 4 Std. pro Gruppe und Tag

4 Std./Tag x 6,25 m³/ha/Std. = **25 m³/ha/Tag**

Der limitierende Faktor bei der Anlagenplanung ist häufig die maximal je Stunde zur Verfügung stehende Wassermenge. Ursächlich hierfür ist meist eine zu geringe Brunnenleistung oder Wasserbevorratung. Bei einer geringen verfügbaren Wassermenge ist es sinnvoll in der Planung nur einen Teil der gesamten Fläche, vor allem Schläge mit einem geringen Wasserspeichervermögen zu berücksichtigen.

Exemplarischer Anlagenplan:

Nachfolgend dargestellter Anlagenplan (Abb. 3.6) zeigt exemplarisch den Aufbau einer Bewässerungsanlage für eine Gesamtfläche von 23,5 ha. Verteilt auf 3 Gruppen werden insgesamt 13 Parzellen bewässert.

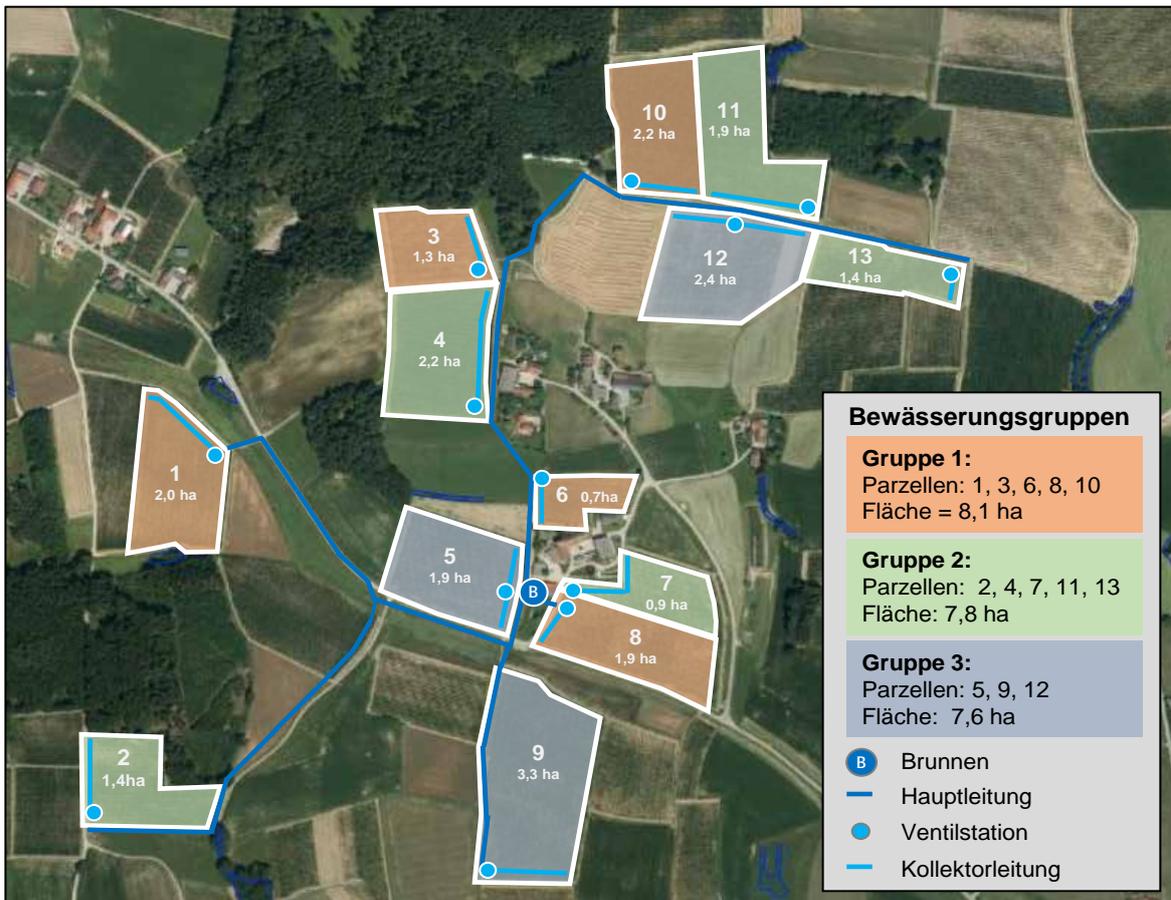


Abb. 3.6: Anlagenplan einer Bewässerungsanlage für 23,5 ha, 13 Parzellen und 3 Bewässerungsgruppen.

3.3 Filter und Verteilstation

Nach der Förderung des Wassers folgt die Aufbereitung in einer sogenannten Filter- und Verteilstation. Liegt die Wassergewinnungsanlage in der Nähe des Betriebsgeländes kann diese Station in einem bestehenden Gebäude errichtet werden (vgl. Abb. 3.7). Alternativ können auch Container im Feld aufgestellt werden (vgl. Abb. 3.7). optional: Automatische Filterreinigung (nach Druckdifferenz oder Zeit)

Folgende Punkte sind bei der Errichtung der Filter- und Verteilstation zu berücksichtigen:

- Anpassung der Filter an die Wasserqualität (Sand, Schwebstoffe)
- Grad der Filtrierung in Abhängigkeit des Bewässerungsverfahrens
- Durchfluss- und Druckmessung
- Vorrichtung zur Düngerdosierung
- Bewässerungscomputer
- Rückflusssicherung
- optional: Automatische Filterreinigung (nach Druckdifferenz oder Zeit)



Abb. 3.7: Beispiele für die Errichtung einer Filter- und Verteilstation in einem Gebäude (oben) bzw. einem Container (unten).

Dosiertechnik:

Die Dosierung und Einspeisung von Düngemitteln zum Bewässerungswasser erfolgen erst nach der Filtrierung des Wassers. Hierfür existieren unterschiedliche technische Vorrichtungen. Sollen sogenannte Düngesysteme mit Fertigation zur gezielten und bedarfsgerechten Nährstoffversorgung eingesetzt werden, ist bei der Auswahl der Dosiertechnik darauf zu achten, dass der zusätzliche Aufwand für das Betreiben möglichst gering ist. Elektrische Düngerdosierpumpen arbeiten hocheffizient und präzise bei gleichzeitig minimalem Arbeitsaufwand. Diese Pumpen können auch direkt über einen Bewässerungscomputer angesteuert werden. Über den Bewässerungscomputer ist auch die Festlegung, Überwachung und Aufzeichnung der täglich oder wöchentlich auszubringenden Nährstoffmenge möglich. Folgende Anforderungen sollten bei der Auswahl der Dosiertechnik beachtet werden:

- geringer Arbeitsaufwand während des Betriebs
- vollautomatische Ansteuerung über Bewässerungscomputer
- einfache Anpassung der Düngermenge an Bewässerungsgruppen und -parzellen

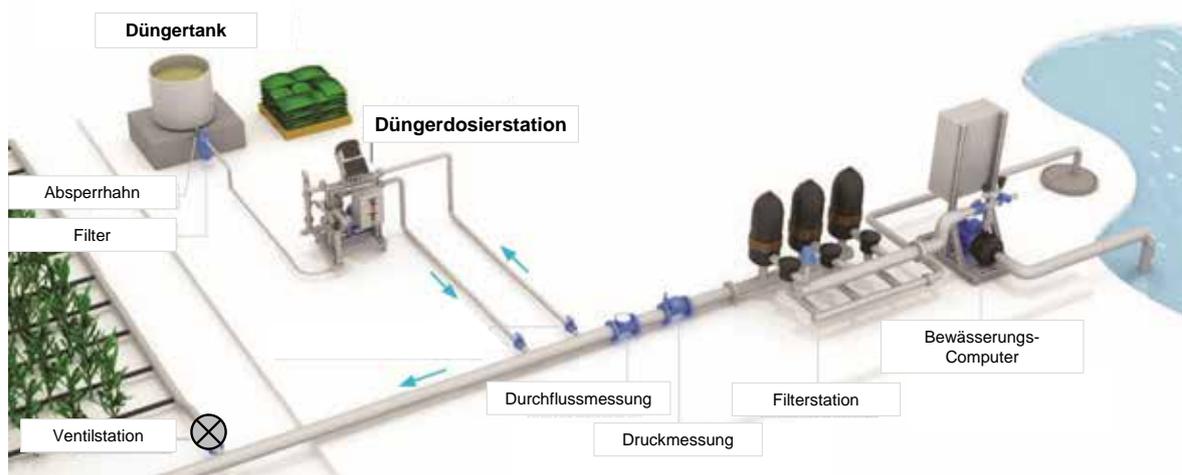


Abb. 3.8: Beispiel für eine Düngerdosierstation im Bypass-Verfahren (verändert nach: Netafim (2017)).

Automatisierte Steuerung:

Um eine automatisierte Steuerung der Bewässerungsanlage zu ermöglichen, müssen die Magnetventile der Ventilstationen der einzelnen Parzellen mit einem **zentralen Bewässerungscomputer** verbunden werden. Dies erfolgt in der Regel über mehradrige Steuerkabel, welche bereits beim Bau der Zuleitungen mitverlegt werden. Werden Steuerkabel genutzt, ist zwingend auf eine ausreichende Anzahl an Kabeladern zu achten, damit jedes Ventil einzeln angesteuert werden kann und auch zu einem späteren Zeitpunkt eine Erweiterung der Anlage möglich ist. Der benötigte Querschnitt des Kabels ist abhängig vom verwendeten Magnetventil und der Gesamtkabellänge. Grundsätzlich gibt es auch kabellose Lösungen zur Ansteuerung der im Feld befindlichen Magnetventile. Hierbei ist jedoch unbedingt zu beachten, dass diese erprobt sind und absolut störungsfrei funktionieren.

Der Einsatz eines Bewässerungscomputers nach aktuellem Stand der Technik ermöglicht grundsätzlich einen vollautomatischen Betrieb der Bewässerungsanlage. Dabei ist auch eine durchfluss- und druckbasierte Überwachung der Anlage während des Betriebs möglich. Des Weiteren können Bewässerungsmaßnahmen auch direkt aufgezeichnet werden. Je nach Hersteller und Ausführung kann mit einem Computer eine bestimmte Anzahl an Ventilen angesteuert, Filter automatisch gespült sowie Dünger dem Bewässerungswasser zudosiert werden. Die Computer arbeiten häufig auf Basis eines 24-Stunden- und 7-Tage-Rhythmus. Wichtig ist, dass mehrere Ventile gleichzeitig angesteuert und dadurch Bewässerungsgruppen gebildet werden können. Durch die Erstellung von Bewässerungsprogrammen wird festgelegt welche Parzellen innerhalb einer Gruppe zusammen bewässert werden und welche Wassermenge an welchem Wochentag ausgebracht wird. Bei vielen Systemen werden auch eine Online-Anbindung sowie eine webbasierte Benutzeroberfläche angeboten. Die Steuerung und Überwachung der Bewässerungsanlage können dadurch vom Smartphone oder dem PC erfolgen.

3.4 Wasserverteilung

Hauptleitungsnetz:

Nachdem das Bewässerungswasser in der zentralen Filter- und Verteilstation aufbereitet und eventuell mit Dünger (Pflanzennährstoffen) versetzt wurde, wird es über Rohrleitungen, auch bezeichnet als sogenanntes Hauptleitungsnetz (vgl. Abb. 3.9), zu den einzelnen Schlägen oder Parzellen geleitet. Das Hauptleitungsnetz verbindet alle zu bewässernden Parzellen mit der Filter- und Verteilstation (vgl. Abb. 3.1). Die Dimensionierung der Rohrdurchmesser ist abhängig von der Zuleitungslänge und der zu fördernden Wassermenge. Um eine hohe Effizienz zu gewährleisten sind für die Dimensionierung des Hauptleitungsnetzes detaillierte hydraulische Berechnungen notwendig. In der Regel ist das gesamte Hauptleitungsnetz mit Wasser gefüllt und steht unter Druck.



Abb. 3.9: Errichtung eines Hauptleitungsnetzes mit Grabenfräse und Minibagger.

Ventilstationen:

An den einzelnen zu bewässernden Parzellen werden sogenannte Ventilstationen errichtet (vgl. Abb. 3.1, Abb. 3.10). Diese Stationen stellen über ein elektrisch angesteuertes Magnetventil eine Verbindung zwischen dem Hauptleitungsnetz und der zu bewässernden Parzelle her. Werden die Magnetventile über kabelgebundene Lösungen angesteuert, sollten die Kabel beim Hauptleitungsbau unbedingt mitverlegt werden. Bei der Auswahl des Magnetventils sollte darauf geachtet werden, dass der Druck einstellbar ist. Die Errichtung der Ventilstation erfolgt in der Praxis häufig in einem Elektroinstallationskasten oder einem Schachtring aus Beton (vgl. Abb. 3.10).



Abb. 3.10: Errichtung einer Ventilstation in einem Elektroinstallationskasten oder einem Schachtring

Kollektorleitungen:

Die Ventilstationen stellen über das Magnetventil eine Verbindung zwischen dem Hauptleitungsnetz und der nachfolgenden Kollektorleitung her. Zwischen der Kollektorleitung und den Tropfschläuchen wird über Anbohrschellen eine direkte Verbindung hergestellt. Soll eine bestimmte Parzelle bewässert werden, öffnet das Ventil der entsprechenden Ventilstation und das Wasser gelangt aus der Hauptleitung zunächst in die Kollektorleitung und anschließend in die Tropfschläuche. Die Dimensionierung der Kollektorleitung ist abhängig von der Fläche der zu bewässernden Parzelle sowie der Anzahl an Reihen. In Hanglagen sollte die Errichtung der Kollektorleitung grundsätzlich an der Hangoberseite erfolgen, damit hangabwärts bewässert werden kann und dadurch längere Tropfschlauchlängen realisiert werden können.

Bei oberirdischer Positionierung des Tropfschlauches kann die Installation der Kollektorleitung entweder im Boden (vgl. Abb. 3.11) oder am Gerüst (vgl. Abb. 3.12) erfolgen. Beide Varianten haben Vor- und Nachteile. Wird die Kollektorleitung im Boden verlegt, ist der Aufwand für die Errichtung höher. Außerdem muss bei jeder Kulturmaßnahme darauf geachtet werden, die Anschlussstellen am Reihenanfang nicht zu beschädigen.

Erfolgt die Installation der Kollektorleitung am Gerüst, sollten die vertikal nach unten verlaufenden Schläuche der Reihen ohne Säulen außerhalb der Bewässerungsperiode an den Ankern oder oben am Gerüst befestigt werden, um Beschädigungen vorzubeugen. Häufig wird bei der Errichtung am Gerüst ein zusätzliches Seil oberhalb der bereits vorhandenen Stirnseile gespannt.



Abb. 3.11: Unterirdische Errichtung der Kollektorleitung.



Abb. 3.12: Errichtung der Kollektorleitung am Gerüst mit zusätzlichem Seil.

Be- und Entlüftung:

Bei beiden Installationsformen ist darauf zu achten, dass am höchsten Punkt der Kollektorleitung ein Be- und Entlüftungsventil installiert wird. Dieses ermöglicht beim Abschalten der Anlage (Schließen des Magnetventils), dass Luft in die Kollektorleitung gelangt und die Tropfschläuche vollständig auslaufen können. Vor allem in Hanglagen wird dadurch auch verhindert, dass an der Hangoberseite Erdpartikel in die Tropfschläuche eingesaugt werden, welche langfristig zu einer Verstopfung der Tropfelemente führen.

3.5 Bewässerungsverfahren

Bewässerungsverfahren können aufgrund bestehender Unterschiede in Konstruktion, verwendetem Material und Einsatzart in drei Gruppen eingeteilt werden. Weltweit sind davon die Verfahren zur Oberflächenbewässerung, wie Furchen-, Becken- sowie Landstreifenbewässerung, mit rund 77 % nach wie vor am bedeutendsten (ICID, 2016). Problematisch bei diesen Verfahren ist die sehr geringe Wasserausnutzungseffizienz. Technisch höher entwickelte und effizientere Formen werden den Gruppen Beregnung oder Mikrobewässerung zugeordnet. Bei den Verfahren der Mikrobewässerung erfolgt grundsätzlich eine langsame Wasserapplikation und es wird nur ein Teil des gesamten Bodenvolumens durchfeuchtet.

Tropfbewässerung:

Zu den Verfahren der Mikrobewässerung zählt auch die Tropfbewässerung. Tropfbewässerung wird definiert als Bewässerungsmethode, durch welche das Wasser in Tropfenform über Emitter auf die Bodenoberfläche ausgebracht wird. Da bei Tropfbewässerungssystemen nur ein geringerer Anteil der gesamten Bodenoberfläche befeuchtet wird, liegt die Wasserausnutzungseffizienz auf einem sehr hohen Niveau. Ein weiterer Vorteil der Tropfbewässerung liegt in der Möglichkeit zur gezielten Ausbringung von Düngemitteln zusammen mit dem Wasser, wodurch die Düngung exakt an den Bedarf des Pflanzenbestands angepasst werden kann. Pflanzennährstoffe werden dabei direkt in die aktive Wurzelzone appliziert mit dem Effekt, dass die Effizienz von Düngemitteln optimiert wird, verbesserte Wachstumsbedingungen geschaffen werden und zugleich das Risiko für Auswaschungsverluste minimiert wird.

Positionierung des Tropfschlauches:

Der Einsatz von Tropfbewässerungssystemen ist vor allem bei Reihenkulturen wie dem Hopfen mit großen Reihenabständen sinnvoll. Hinsichtlich der Positionierung des Tropfschlauches gibt es bei Hopfen folgende Möglichkeiten (vgl. auch Abb. 3.13):

- oberirdisch auf dem Bifang (AB)
- unterirdisch neben dem Bifang (NB)
- unterirdisch in der Fahrgassenmitte
- Befestigung der Tropfschläuche auf Gerüsthöhe über dem Bifang

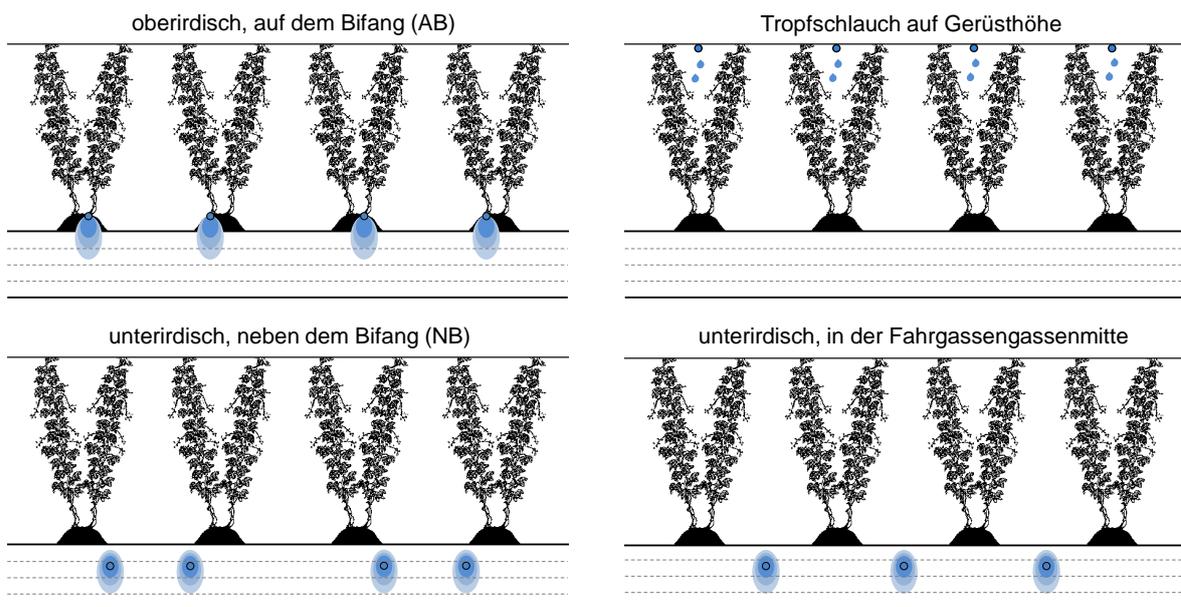


Abb. 3.13: Möglichkeiten zur Positionierung des Tropfschlauches - schematische Darstellung.

Oberirdisch auf dem Bifang (AB):

Bei oberirdischer Bewässerung auf dem Bifang (AB) wird der Tropfschlauch jährlich nach dem letzten Aufackern mit einer seitlich am Schlepper angebauten Vorrichtung auf den Bifang ausgelegt (vgl. Abb. 3.14). Eine Führungsfurche, in die der Tropfschlauch dabei eingelegt wird, verhindert ein Abrutschen der Schläuche in die Fahrspuren. Die im aufgeschütteten Bifang gebildeten Sommerwurzeln garantieren auf unterschiedlichen Böden eine höchst effektive Aufnahme von Wasser und Nährstoffen. In mehrjährigen Feldversuchen zeigte sich: Je niedriger die Bodenqualität, desto eher sollte die Bewässerung oberirdisch auf dem Bifang erfolgen (vgl. Kapitel 4). Die ausgelegten Tropfschläuche müssen entweder im Herbst oder bereits während der Ernte wieder aufgerollt werden. Je nach Mechanisierung und Schlaggröße liegt der Arbeitszeitbedarf für beide Arbeitsschritte zusammen bei 3 bis 4 Akm und 2 Schlepperstunden je Hektar.



Abb. 3.14: Oberirdische Verlegung des Tropfschlauches in einer Führungsfurche auf dem Bifang und Aufrollen der Tropfschläuche im Herbst nach der Ernte.

Unterirdisch neben dem Bifang (AB):

Bei unterirdischer Bewässerung neben dem Bifang (NB) werden in jeder zweiten Fahrspur zwei Tropfschläuche dauerhaft in einer Tiefe von 30 cm und etwa ebenso weit von der Mitte der Pflanzreihen entfernt, etwa im Bereich unterhalb der Fahrspuren verlegt (vgl. Abb. 3.15). Die Positionierung der Tropfschläuche in jeder 2. Fahrspur hat den Hintergrund, dass ein Befahren der Fläche zur Durchführung notwendiger Pflege- und Pflanzenschutzmaßnahmen auch bei feuchten Bodenverhältnissen möglich ist, ohne dass schädliche Bodenverdichtungen im Bereich der Tropfschläuche zu befürchten sind. Im Rahmen mehrjähriger Feldversuche hat sich gezeigt, dass die oberirdische Bewässerung auf dem Bifang (AB) pflanzenbaulich wie auch ökonomisch effektiver als die unterirdische Bewässerung neben dem Bifang (NB) ist. Dabei stellte sich jedoch auch heraus, dass die Effektivität der unterirdischen Bewässerung stark abhängig von den Bodeneigenschaften im Bereich des Tropfschlauches ist. Weitere Informationen sowie Versuchsergebnisse hierzu werden im Kapitel 4 erläutert.



Abb. 3.15: Unterirdische Installation des Tropfschlauches neben dem Bifang.

Unterirdisch in der Fahrgassenmitte:

Bei der dauerhaften unterirdischen Positionierung des Tropfschlauches in der Fahrgassenmitte (vgl. Abb. 3.16) besteht die Problematik, dass der Schlauch weit von der eigentlichen Pflanzreihe und somit dem Hauptwurzelbereich des Hopfens entfernt ist. Dieses System kann nur auf sehr guten Böden mit einem hohen Anteil an Mittel- und engen Grobporen funktionieren, welche entweder eine optimale Wasserverteilung oder intensive Durchwurzelung des Bereichs in der Fahrgassenmitte garantieren.



Abb. 3.16: Installation des Tropfschlauches in der Fahrgassenmitte.

Erfolgt die Installation der Tropfschläuche unterirdisch, muss zwingend darauf geachtet werden, dass ein Spülen der Schläuche möglich ist, da die Tropfelemente am Ende der Schläuche sonst langfristig verstopfen. Eine Möglichkeit hierfür ist, jeden Schlauch einzeln am Ende aus dem Boden heraus zu legen. Des Weiteren können alle Schläuche nach dem Prinzip der Errichtung der Kollektorleitung auch am Ende miteinander verbunden werden und dadurch gespült werden (vgl. Abb. 3.17).



Abb. 3.17: Spülung der unterirdischen Tropfschläuche

Befestigung der Tropfschläuche auf Gerüsthöhe über dem Bifang:

Eine weitere Möglichkeit ist die Anbringung des Tropfschlauches auf Gerüsthöhe über dem Bifang (vgl. Abb. 3.18). Damit die Tropfen während des Bewässerungsvorgangs nicht zusammenlaufen und in unregelmäßigen Abständen zu Boden tropfen, weil sich bei Wärme einwirkung die Kunststoffschläuche ausdehnen und durchhängen, muss zwischen jeder Tropfstelle der Schlauch an einem zusätzlich am Gerüst angebrachten Spanndraht befestigt werden. Die Installation dieses Bewässerungsverfahrens ist mit ca. 40 Akh/ha daher sehr aufwändig. Ferner ist zu beachten, dass aufgrund der Blattbenetzung zum einen sich das Risiko für Infektionen mit Peronospora erhöht, insbesondere wenn am Tag bewässert wird. Zum anderen nehmen Verdunstungsverluste zu. Außerdem besteht die Problematik, dass die Tropfen je nach Windverhältnissen sowohl links als auch rechts vom Bifang auf dem Boden aufkommen können. Ist im Anschluss ein Befahren jeder zweiten Fahrspur z. B. für Pflanzenschutzmaßnahmen notwendig, können schädliche Bodenverdichtungen entstehen.



Abb. 3.18: Befestigung des Tropfschlauches auf Gerüsthöhe.

Auswahl des Tropfschlauches:

Bei Tropfbewässerungssystemen stellt sich häufig die Frage, welcher Tropfschlauch verwendet werden soll. Im Hinblick auf eine gleichmäßige Wasserverteilung über die gesamte Reihenlänge sind grundsätzlich nur druckkompensierte Tropfrohren zu empfehlen. Folgende Parameter sind bei der Auswahl des Tropfschlauches zu beachten:

- Ausstoßrate eines einzelnen Tropfelements in Liter/Std.
- Abstand der Tropfelemente in cm
- Wandstärke und Durchmesser des Schlauches in mm

In der Praxis erwiesen sich Tropfrohren mit einem Tropfabstand von 50 cm und einer Ausstoßrate von 1,0 Liter/Std. je Tropfer als tauglich. Im Hinblick auf die Wandstärke zeigte sich, dass Schläuche mit 1,2 mm ausreichend robust sind, sowohl bei ober- als auch bei unterirdischer Verlegung. Schläuche mit geringerer Wandstärke erwiesen sich in der Praxis hingegen als anfällig für Beschädigungen und Wildverbiss (z. B. Hasen). Der Durchmesser des Schlauches beeinflusst die maximal mögliche Schlauchlänge. Um eine gleichmäßige Wasserverteilung im Feld zu erreichen, sollte der Schlauchdurchmesser im Zweifelsfall erhöht werden.

Weitere Bewässerungsverfahren im Hopfen:

Neben der Tropfbewässerung können grundsätzlich auch andere Bewässerungsverfahren eingesetzt werden, die jedoch einen höheren Anteil der gesamten Fläche bewässern. Zum einen ist die Installation von Sprinklersystemen auf Gerüsthöhe möglich, wodurch die gesamte Hopfenfläche gleichmäßig beregnet wird. Auch der Einsatz von Mikrosprinklersystemen, die auf Gerüsthöhe installiert werden, ist möglich. Da mit diesen Verfahren deutlich mehr Wasser pro Zeiteinheit ausgebracht wird, ist die Wasserbereitstellung und die Dimensionierung des Leitungssystems auf den erhöhten Wasserbedarf entsprechend anzupassen. Der Nachteil dieser Systeme ist auch, dass aufgrund der Höhe einer Hopfengerüstanlage von

6 bis 7 Metern sowie der großen Blattfläche des Hopfens deutlich höhere Verdunstungsverluste entstehen. Außerdem steigt das Infektionsrisiko für Krankheiten (insbesondere Peronospora) aufgrund der regelmäßigen Blattbenetzung. Als positiver Effekt für das Pflanzenwachstum und die Inhaltsstoffbildung kann ein günstigeres Mikroklima im Bestand angeführt werden.

4 Auswirkungen von Bewässerung und Fertigation

Für ein stabiles Ertrags- und Qualitätsniveau stellt der Hopfen neben einer ausgeglichenen Nährstoffversorgung vor allem hohe Ansprüche an die Wasserversorgung. Dabei ist nicht nur die absolute Wassermenge, sondern auch die zeitliche Verteilung der Niederschläge von Bedeutung. Unter den klimatischen Bedingungen in Deutschland erstreckt sich die Hauptwachstumsperiode des Hopfens von Anfang Mai bis September (vgl. Abb. 2.3). Trockenheit kann vor allem in den Monaten Juni, Juli und August zu erheblichen Ertrags- und Qualitätseinbußen führen. Der weltweite Klimawandel führt bereits jetzt zu einem messbaren Temperaturanstieg und einer Zunahme der Häufigkeit sowie Intensität von Wetterextremen wie Trockenperioden und Starkniederschlägen, auch in deutschen Hopfenanbaugebieten. Daraus resultiert eine Verschlechterung der Wasserversorgung, wodurch die Produktion von Hopfen in ausreichender Quantität und hoher Qualität zunehmend erschwert wird. Die zusätzliche Bewässerung von Hopfen hat somit auch in humiden Gebieten wie der Hallertau zur Ertragsabsicherung sowie Risikominimierung an Bedeutung gewonnen. Neben der Sicherstellung der Wasserversorgung von Pflanzen bieten Bewässerungssysteme auch die Möglichkeit, zusammen mit dem Wasser bedarfsgerecht und gezielt Nährstoffe auszubringen (= Düngereinspeisung). Diese Form der Düngung wird auch als Fertigation bezeichnet.

Im Zeitraum von 2017 bis 2020 wurden im Rahmen eines Forschungsprojekts am Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung die Auswirkungen von Tropfbewässerung und Fertigation (Düngereinspeisung) bei Hopfen an verschiedenen Standorten in der Hallertau untersucht. Im Verlauf dieses Kapitels wird auf Basis von Versuchsergebnissen an unterschiedlichen Beispielen aufgezeigt, welche Effekte sich auf den Ertrag und die Qualität einerseits sowie die Umwelt andererseits ergeben.



Abb. 4.1: Versuchsaufbau zur Bewässerung mit Fertigation

4.1 Bedeutung von Fertigation

Der Begriff Fertigation bedeutet, dass über ein Bewässerungssystem nicht nur Wasser ausgebracht wird, sondern auch Pflanzennährstoffe. Diese Form der Düngung ist hocheffizient und wurde in der Landwirtschaft bisher vor allem in klimatisch sehr trockenen Regionen der Welt mit hohem Bewässerungsbedarf eingesetzt. Durch Fertigation kann eine Pflanze zum optimalen Zeitpunkt exakt und bedarfsgerecht mit der benötigten Nährstoffmenge versorgt werden. Hingegen ist die Pflanzenverfügbarkeit gestreut (granuliert) ausgebrachter Nährstoffe vor allem unter trockenen Bedingungen stark eingeschränkt.

Grundsätzlich kann jeder Pflanzennährstoff über Fertigation ausgebracht werden. Der mengenmäßig wichtigste und am stärksten ertragslimitierende Nährstoff ist bei Hopfen, wie bei vielen anderen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen auch, der Stickstoff (N). Die maximale Höhe der N-Düngung wird im deutschen Hopfenbau aufgrund der zusätzlich hohen Umweltrelevanz von Stickstoff jedoch zunehmend durch gesetzliche Regelungen begrenzt. Aus diesen Gründen wurde im Rahmen des Forschungsprojekts schwerpunktmäßig untersucht, wie sich die Ausbringung von Stickstoff über das Bewässerungswasser auswirkt.

Im Vordergrund stand dabei zunächst die Entwicklung von sogenannten **„Stickstoff-Düngesystemen mit Fertigation“**. Dabei handelt es sich um kombinierte N-Düngesysteme, bei denen die auszubringende Gesamt-N-Menge zum Teil in granulierter Form (gestreut) und zum Teil über das Bewässerungswasser ausgebracht wird. Im Rahmen des 4-jährigen Forschungsprojekts wurde eine Vielzahl an unterschiedlichen N-Düngesystemen mit Fertigation geprüft. Ein mögliches N-Düngesystem mit Fertigation wird nachfolgend exemplarisch einem System mit ausschließlich granulierter N-Düngung gegenübergestellt (vgl. Abb. 4.2). Dabei werden zwei Drittel der gesamten auszubringenden N-Menge verteilt auf 6 Einzelgaben über einen 6-wöchigen Zeitraum ab Kalenderwoche 25 während der Hauptbiomassebildung der Hopfenpflanze mit dem Bewässerungswasser ausgebracht. Im Gegensatz zu einem System mit ausschließlich gestreuter N-Düngung, verteilt auf 3 Teilgaben in gleicher Höhe, wird bei diesem System nur 1/3 des Stickstoffs in granulierter Form ausgebracht. Als Düngemittel in granulierter Form wurde ausschließlich Kalkammonsalpeter (KAS) mit den N-Formen Ammonium und Nitrat eingesetzt. Über das Bewässerungswasser wurde hingegen Ammoniumnitrat-harnstoff-Lösung (AHL) mit den N-Formen Ammonium, Nitrat und Harnstoff ausgebracht. Weitere N-Düngesysteme mit Fertigation werden in Kapitel 5 „Bewässerungsmanagement“ thematisiert.

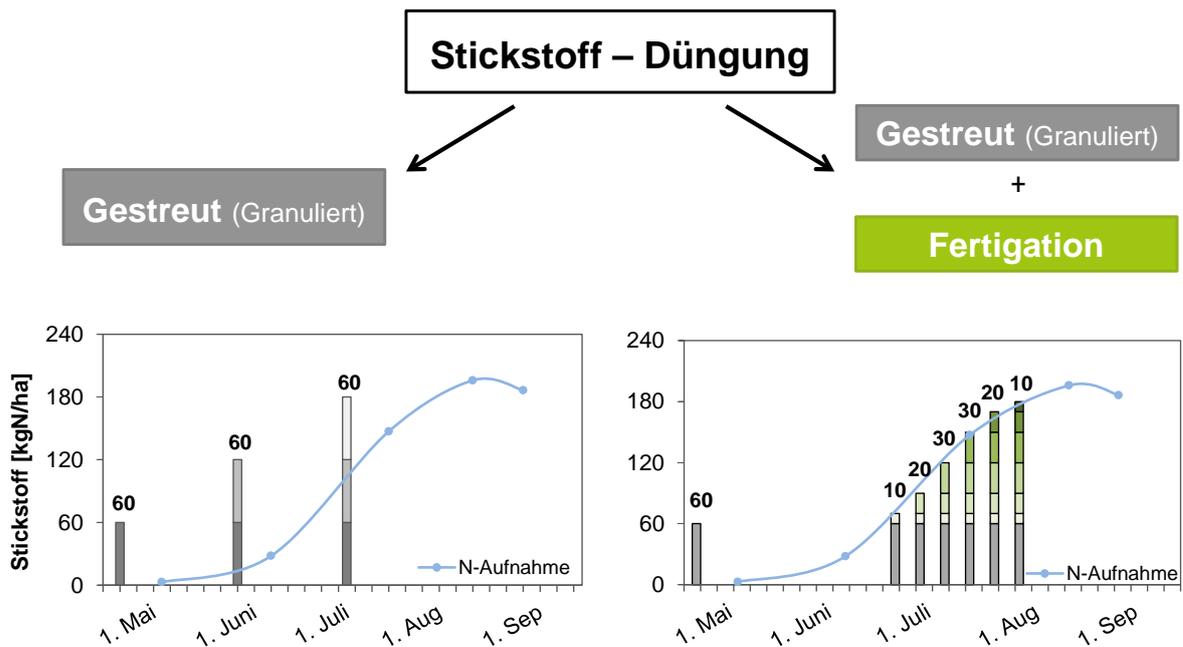


Abb. 4.2: Vergleich eines N-Düngesystems mit ausschließlich granulierter N-Düngung und eines kombinierten Systems mit Fertigation.

4.2 Ertrag und Qualität

Im Rahmen eines dreijährigen Feldversuchs (2017 bis 2019) wurden an der Sorte Perle auf einem sandigen Boden die Auswirkungen unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen untersucht (vgl. Abb. 4.3). Die Festlegung der Gesamthöhe der N-Düngung erfolgte jährlich in Abhängigkeit des Nmin-Wertes sowie weiterer Faktoren und lag bei 150 bis 180 kg N/ha. Die Ausbringung des Stickstoffs erfolgte entsprechend den in Abb. 4.2 dargestellten Düngesystemen.

Ohne Bewässerung:	Mit Bewässerung: Oberirdisch (AB)	Mit Bewässerung: Unterirdisch (NB)
<p><u>N-Düngung:</u></p> <p>Gestreut 3/3 Gest. (KAS)</p>	<p><u>N-Düngung:</u></p> <p>Gestreut 3/3 Gest. (KAS)</p> <p>Fertigation 1/3 Gest. (KAS) 2/3 Fert. (AHL)</p>	<p><u>N-Düngung:</u></p> <p>Gestreut 3/3 Gest. (KAS)</p> <p>Fertigation 1/3 Gest. (KAS) 2/3 Fert. (AHL)</p>

Abb. 4.3: Versuchsvarianten eines 3-jährigen Feldversuchs im Zeitraum von 2017 bis 2019 an der Sorte Perle auf einem sandigen Boden zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen.

In jedem der drei Versuchsjahre traten zu unterschiedlichen Zeitpunkten Trockenperioden auf. Im 3-jährigen Mittel bestanden sowohl hinsichtlich des Ertrags als auch Alphasäuregehalts Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsvarianten (vgl. Abb. 4.4). Erfolgte die N-Düngung ausschließlich in granulierter Form (Gestreut), führte eine oberirdische Bewässerung (AB), im Vergleich zu nicht bewässerten Pflanzen, zu einer Erhöhung des Ertrags um 7 % und Steigerung des Alphasäuregehalts um 15 %. Wurde bei gestreuter N-Düngung unterirdisch bewässert (NB), lagen Ertrag und Alphasäuregehalt nur um 1,5 bzw. 7 % höher. Im Gegensatz dazu erreichten oberirdisch bewässerte und zu 2/3 über Fertigation gedüngte Pflanzen, im Vergleich zu nicht bewässerten, einen um 15 % höheren Ertrag und um 23 % höheren Alphasäuregehalt. Unterirdische Bewässerung mit Fertigation führte zu einer Steigerung des Ertrags um 8,2 % und Alphasäuregehalts um 15 %.

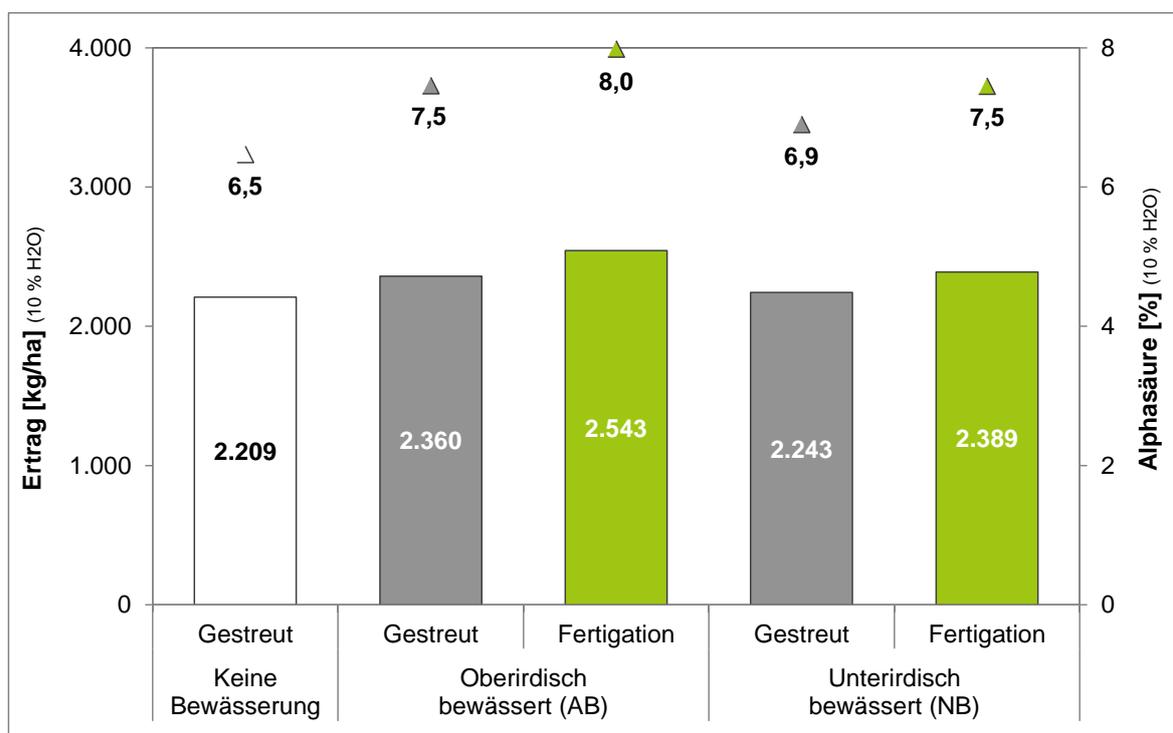


Abb. 4.4: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Doldenertrag und Alphasäuregehalt (3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019) der Sorte Perle auf einem sandigen Boden; N-Düngung: 150 bis 180 kg N/ha.

Im Durchschnitt der drei Untersuchungsjahre wurden bei der Sorte Perle an diesem Standort (sandiger Boden) durch Bewässerung und Fertigation sowohl der Ertrag als auch der Alphasäuregehalt beeinflusst. Deshalb können die Gesamteffekte durch eine Betrachtung des Alphaertrags besser beurteilt werden (vgl. Abb. 4.5).

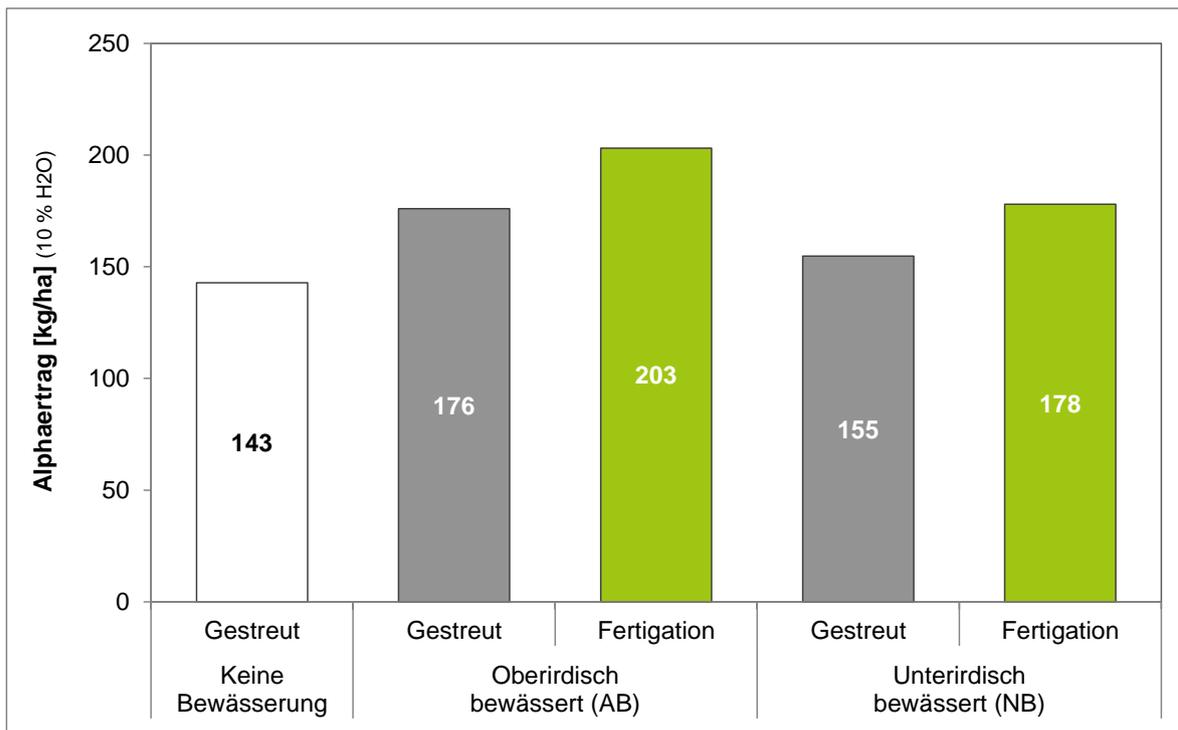


Abb. 4.5: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Alphaertrag (3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019) der Sorte Perle auf einem sandigen Boden; N-Düngung: 150 bis 180 kg N/ha.

Auf Basis der beschriebenen Ergebnisse können für die Sorte Perle (sandiger Boden) folgende **Aussagen** abgeleitet werden:

- Ø Stabilisierung von Ertrag und Alphasäuregehalt durch Bewässerung
- Ø oberirdische Tropfschlauchverlegung (AB) effektiver als unterirdische (NB)
- Ø Optimierungspotenzial und Effizienzsteigerung durch Fertigation

Einfluss von Einzeljahren:

Neben den durchschnittlichen Auswirkungen über drei Jahre (2017 bis 2019) ist für die Bewertung unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen entscheidend, inwieweit im Einzeljahr (z. B. bei Trockenheit) eine effektive Absicherung des Ertrags- und Qualitätsniveaus möglich ist (vgl. Abb. 4.6). Die Darstellung der Einzeljahre erfolgt jeweils relativ im Vergleich zu nicht bewässerten, ausschließlich granuliert gedüngten Pflanzen, die zuvor als „Keine Bewässerung Gestret“ bezeichnet wurden. Die stärksten Effekte wurden im Anbaujahr 2017 erfasst. Oberirdische Bewässerung mit Fertigation führte zu einem um 20 % höheren Ertrag und um 27 % höheren Alphasäuregehalt. Zu begründen sind diese deutlich positiven Effekte im Jahr 2017 durch die bis Ende Juli herrschende starke Trockenheit, wodurch Wachstum und Entwicklung ohne Bewässerung erheblich eingeschränkt wurden. Die relativen Ergebnisse zeigen außerdem, dass oberirdische Bewässerung in jedem Jahr effektiver als unterirdische war. Weiterhin führte die Nutzung eines Düngesystems mit Fertigation bei oberirdischer Bewässerung zu einer Stabilisierung von Ertrag und Qualität auf einem höheren Niveau.

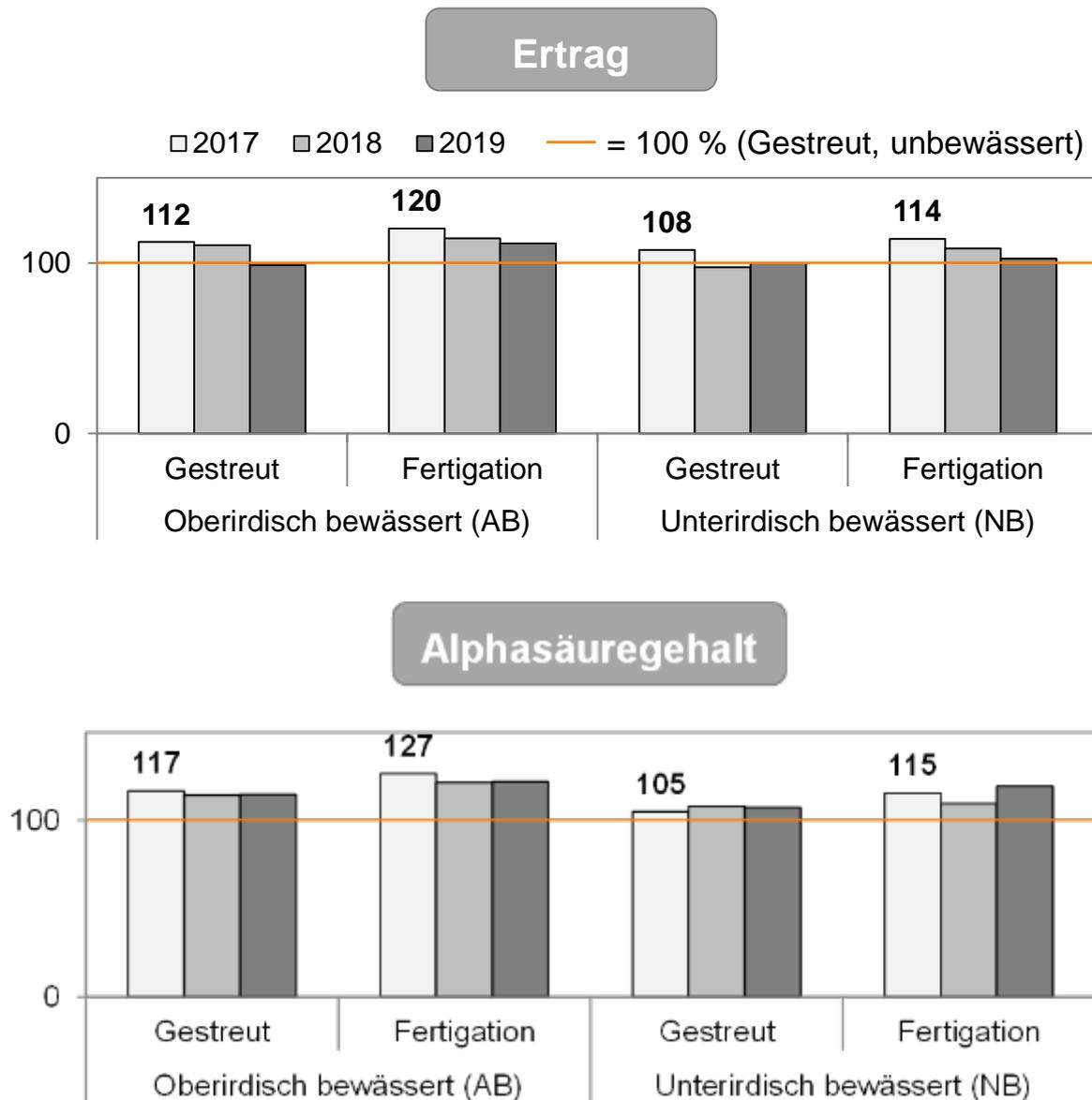


Abb. 4.6: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Dol-denertrag und Alphasäuregehalt – Relative Darstellung der Ergebnisse in den Einzeljahren 2017, 2018 und 2019; Referenz: Keine Bewässerung & Gestreut

Einfluss der Bodenqualität:

Der Versuchsstandort lag an einem Hang mit den Pflanzreihen in Richtung des Gefälles. Infolge langjähriger Erosion wies der Boden an der Hangoberseite einen erhöhten Sand- und Kiesanteil auf, während an der Hangunterseite eine deutliche Kolluviumbildung festzustellen war. Somit unterschied sich die Bodenqualität innerhalb der Versuchsfläche. Nachfolgend werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Wasser- und N-Applikationsformen im Mittel der drei Versuchsjahre deshalb in Abhängigkeit der Bodenqualität bzw. Bodengüte thematisiert (vgl. Abb. 4.7).

Nicht bewässerte, ausschließlich granuliert gedüngte Pflanzen reagierten auf die bessere Bodenqualität an der Hangunterseite im 3-jährigen Mittel (2017 bis 2019) nicht nur mit einer

höheren Ertragsbildung, sondern auch mit einem höheren Alphasäuregehalt. Im Gegensatz zu unterirdisch bewässerten Varianten konnte diese Differenz durch oberirdische Bewässerung ausgeglichen werden. Oberirdische Bewässerung in Kombination mit gestreuter N-Düngung führte an der Hangoberseite zu einer Steigerung des Ertrags und Alphasäuregehalts um 13 bzw. 25 %. Unterirdisch bewässerte Pflanzen erreichten an der Hangoberseite hingegen keinen Mehrertrag und nur einen um 10 % höheren Alphasäuregehalt. Hinsichtlich des Einflusses der Tropfschlauchposition in Abhängigkeit der Bodenqualität kann somit die Aussage getroffen werden, dass die oberirdische Verlegung des Tropfschlauches vor allem bei niedriger Bodengüte von Vorteil ist.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass eine allgemeingültige Aussage, in welchem Umfang Ertrag und Alphasäuregehalt gesteigert bzw. auf welchem Niveau diese durch Bewässerung und Fertigation stabilisiert werden können, nicht getroffen werden kann, da dies stark von der Bodenqualität und somit dem Ausgangsniveau abhängig ist. Während an der Hangoberseite des Feldes mit geringerer Bodenqualität durch oberirdische Bewässerung und Fertigation Ertrag und Alphasäuregehalt um 24 bzw. 34 % gesteigert werden konnten, wurden an der Hangunterseite 7 bzw. 15 % erreicht. Letztendlich können folgende allgemeingültigen Aussagen abgeleitet werden:

- Ø Je niedriger die Bodengüte (nutzbare Feldkapazität, Nährstoffspeichervermögen), desto stärkere Effekte sind durch Bewässerung und Fertigation zu erwarten
- Ø Je niedriger die Bodengüte, desto eher sollte der Tropfschlauch oberirdisch verlegt werden

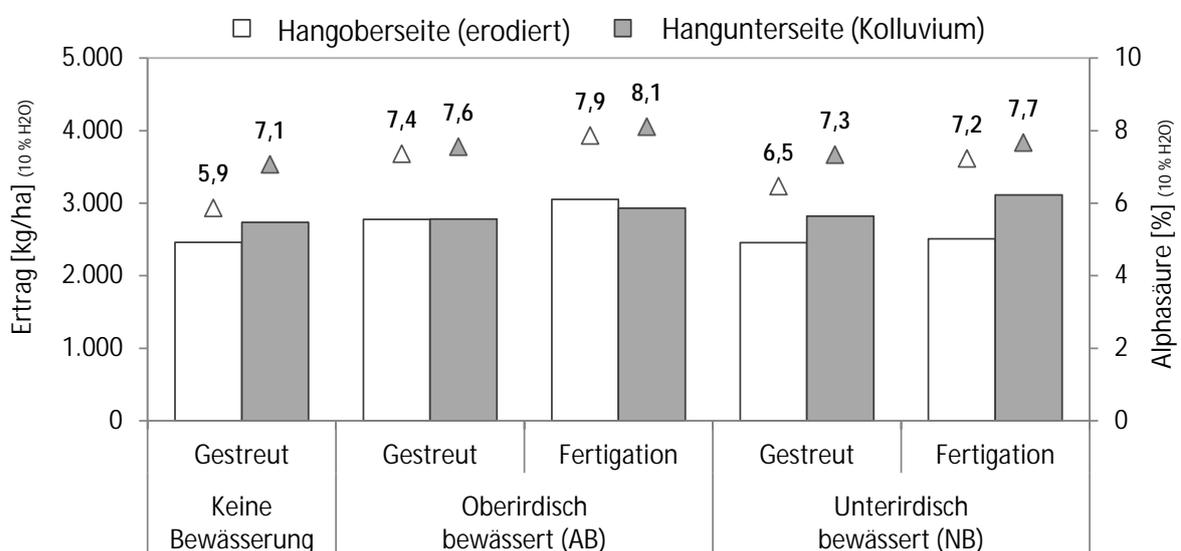


Abb. 4.7: Einfluss unterschiedlicher Wasser- und Stickstoffapplikationsformen auf den Doldenertrag und Alphasäuregehalt in Abhängigkeit der Bodenqualität (Differenzierung in Hangober- vs. Hangunterseite) – 3-jährige Mittelwerte der Sorte Perle von 2017 bis 2019.

Als Ursache dafür, dass durch unterirdische Bewässerung an der Hangoberseite deutlich geringere Effekte als durch oberirdische Bewässerung erzielt wurden, ist eine limitierte Verteilung des ausgebrachten Wassers im Boden anzuführen. Vor allem auf sandigen und

kiesigen Böden ist die horizontale Wasserverteilung stark eingeschränkt (vgl. Abb. 4.8), wodurch die geringere Effektivität der unterirdischen Bewässerung an der Hangoberseite erklärt werden kann. Somit kann die Aussage abgeleitet werden, dass unterirdische Tropfbewässerungssysteme an Standorten, deren hydraulische Bodeneigenschaften eine ausreichende horizontale Verteilung des Wassers verhindern (z. B. stark sandig oder kiesig), weniger effizient sind.

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass die Bodenschichten im Bereich des unterirdischen Tropfschlauches (30 cm Tiefe) geringere Nährstoffgehalte aufweisen. Untersuchungen der Feinwurzelverteilung zeigten auf, dass sich bei unterirdischer Bewässerung die Wurzel-dichte im aufgeschütteten Damm reduziert. Eine Zunahme der Wurzel-dichte in tieferen Bodenschichten, im Bereich des unterirdischen Tropfschlauches, wurde hingegen nicht erfasst, weshalb unterirdisch bewässerte Pflanzen insgesamt eine geringere Wurzel-dichte erreichten. Außerdem ist bekannt, dass die Ausbreitung von Pflanzenwurzeln vor allem dort erfolgt, wo Wasser, Sauerstoff und Nährstoffe gleichzeitig zur Verfügung stehen. Speziell der Sauerstoffgehalt kann bei unterirdischer Bewässerung im Hopfen einen limitierenden Faktor darstellen, da der Tropfschlauch unterhalb der Fahrspuren verlegt wird, wo der Boden im Vergleich zum aufgeschütteten Damm eine deutlich höhere Lagerungsdichte aufweist. Dieser Punkt wird vor allem auf schweren Böden mit hohen Tongehalten als problematisch gesehen.

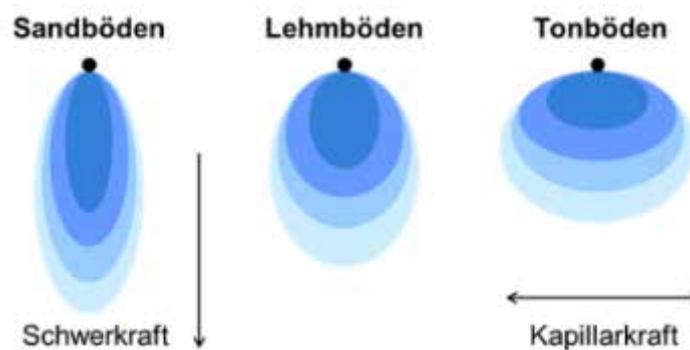


Abb. 4.8: Wasserverteilung im Boden in Abhängigkeit der Bodenart (ALB Bayern, 2020).

4.3 Effekte durch Fertigation

Eine zentrale Frage des mehrjährigen Forschungsprojekts war, ob durch die Nutzung von Stickstoff-Düngesystemen mit Fertigation positive Effekte zu erwarten sind. Grundsätzlich ist dabei zu differenzieren zwischen Effekten durch die Wasserversorgung an sich und durch eine verbesserte Stickstoffversorgung infolge der Ausbringung des Stickstoffs über das Bewässerungswasser. Wie bereits dargestellt, haben sowohl die Bewässerung als auch die Fertigation Auswirkungen.

Nachfolgend werden die Effekte eines N-Düngesystems mit Fertigation im Vergleich zur ausschließlich gestreuten N-Düngung betrachtet (vgl. Abb. 4.9). Beide Varianten wurden

exakt gleich oberirdisch bewässert. Zeitpunkt und Höhe der Wassergaben unterschieden sich nicht. Der Versuch wurde an 2 Sorten, 2 Standorten und in 3 Versuchsjahren (2017 bis 2019) in Hopfengärten in der Hallertau durchgeführt. Die absolute Höhe der N-Düngung wurde jährlich sorten- und standortspezifisch angepasst. Die Ausbringung des Stickstoffs erfolgte entsprechend den in Abb. 4.2 dargestellten Düngesystemen.

Bei exakt gleicher Höhe der N-Düngung führte die Nutzung des N-Düngesystems mit Fertigation (1/3 gestreut + 2/3 über Bewässerungswasser) im Vergleich zur ausschließlich gestreuten N-Düngung bei der Sorte Herkules zu einer Steigerung des Alphaertrags um 11 %. Bei der Sorte Perle wurde der Doldenertrag durch den Einsatz von Fertigation um 9 % erhöht. Somit führte die Ausbringung eines Anteils der insgesamt auszubringenden N-Menge über das Bewässerungswasser zu einer Verbesserung des Doldenertrags und Alphasäuregehalts.

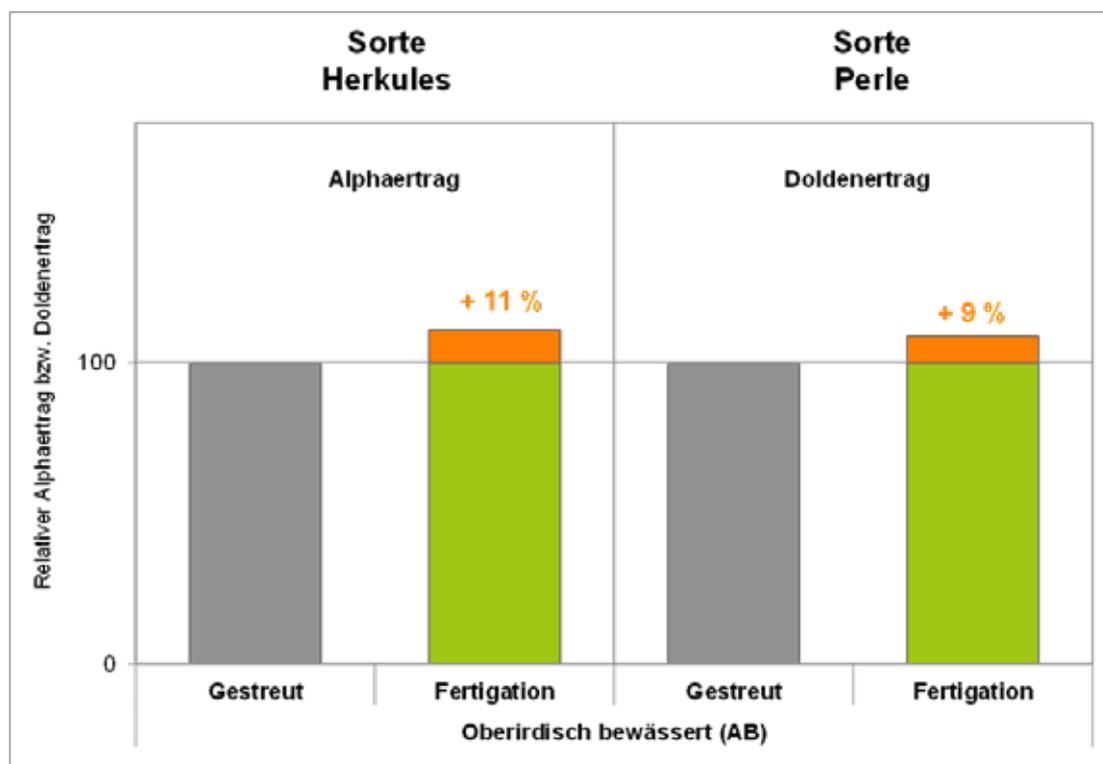


Abb. 4.9: Einfluss von Fertigation auf den Alphaertrag der Sorte Herkules bzw. Doldenertrag der Sorte Perle bei exakt gleicher Bewässerung – 3-jährige Mittelwerte von 2017 bis 2019 eines sandigen und lehmigen Bodens (je Sorte $n = 6$).

Ursachen für die höhere Effektivität:

Im Rahmen der untersuchten N-Düngesysteme mit Fertigation wurde in einem bestimmten Zeitraum einmal wöchentlich eine definierte Menge an Stickstoff direkt in die durch die Tropfbewässerung durchfeuchteten Zonen des intensiv durchwurzelteten Bifangs (Damms) appliziert. Somit stand der Pflanze in einem 6-wöchigen Ausbringenfenster im Zeitraum der Hauptbiomassebildung ein hoher Anteil der gesamten N-Menge unmittelbar zur Verfügung, wodurch Wachstum und Entwicklung optimal gefördert werden konnten. Die im Rahmen einer 15N-Tracer-Technik ermittelten Ergebnisse zeigen, dass über das

Bewässerungswasser ausgebrachter Stickstoff von den Hopfenpflanzen unmittelbar aufgenommen wird. Dadurch kann kurzfristig und effektiv in die Stickstoffernährung der Hopfenpflanze eingegriffen werden.

Erfolgte die Ausbringung des Stickstoffs hingegen ausschließlich gestreut, wurde zu den Zeitpunkten Ende April, Ende Mai und Anfang Juli jeweils ein Drittel der gesamten N-Menge ausgebracht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Streuen des Düngers auf ein etwa ein Meter breites Band erfolgte, wodurch im Vergleich zur Fertigation dieselbe N-Menge auf eine größere Fläche verteilt wurde. Dem gegenüber steht, dass Tropfbewässerungssysteme aufgrund der Anordnung der Tropfer nur Teilbereiche dieser gedüngten Fläche durchfeuchten. Somit muss trotz der Zusatzbewässerung davon ausgegangen werden, dass sich eine unregelmäßige Niederschlagsverteilung auf den Zeitpunkt und den Anteil der Pflanzenverfügbarkeit des ausgebrachten Stickstoffs auswirkt. Daraus resultiert, dass den Pflanzen im Vergleich zur N-Applikation über Fertigation wahrscheinlich ein geringerer Anteil der gesamten N-Menge während der Phase der Hauptbiomassebildung zur Verfügung stand.

Steigerung des Alphasäuregehalts:

Weiterhin zeigte sich im Rahmen der Feldversuche, dass ein hohes N-Versorgungsniveau der Pflanze ab Anfang August, während der Phase der Alphasäuresynthese, bei Hochalphasorten wie Herkules zu einer Reduktion des Alphasäuregehalts führen kann. Zu berücksichtigen ist dabei, dass eine hohe N-Versorgung der Pflanze nicht nur durch eine späte oder übermäßige N-Düngung zustande kommen kann, sondern auch durch einen hohen Vorrat an mineralischem Stickstoff im Boden oder einer hohen N-Nachlieferung.

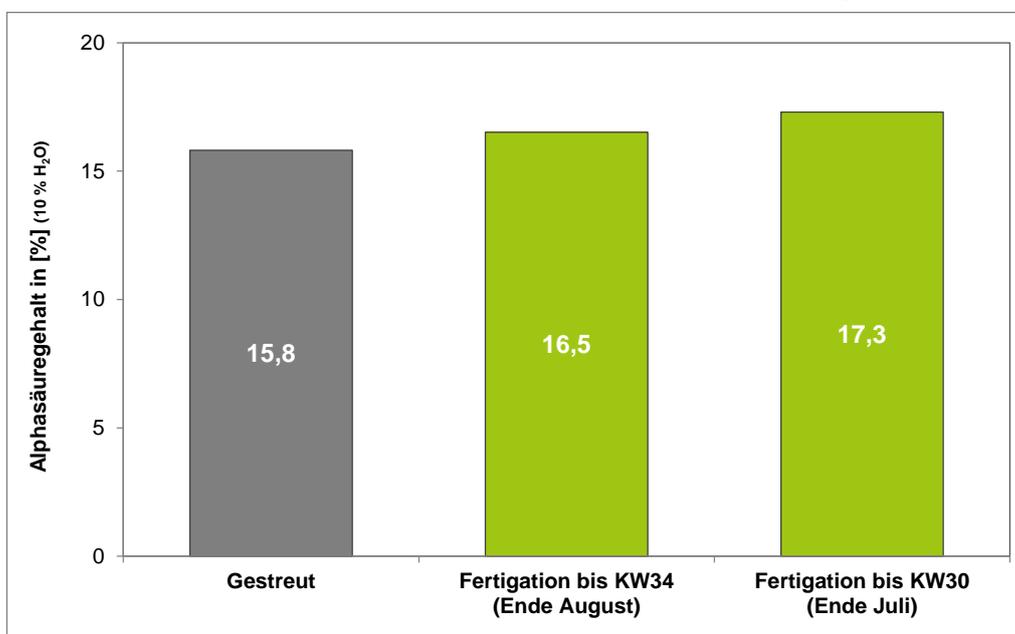


Abb. 4.10: Einfluss des N-Düngesystems auf den Alphasäuregehalt der Sorte Herkules.

Die Effekte können am Versuchsergebnis verdeutlicht werden (vgl.

Abb. 4.10). Im Vergleich zur ausschließlich gestreuten N-Düngung mit oberirdischer Bewässerung führte oberirdische Bewässerung mit Fertigation (1/3 gestreut + 2/3 über Bewässerungswasser) mit Verteilung des über Fertigation auszubringenden N-Anteils über einen 6-wöchigen Zeitraum von KW25 bis KW30 zu einer Steigerung des Alphasäuregehalts um 9,5 %. Erfolgte die Verteilung derselben N-Menge über Fertigation hingegen auf 11 Wochen von KW25 bis KW35 verringerte sich der Alphasäuregehalt.

Ursächlich für diesen Effekt ist die Wasserverteilung bei Tropfbewässerungssystemen, die aufgrund der Anordnung der Tropfer nur Teilbereiche der gedüngten Fläche durchfeuchten. Bei Trockenheit sind dadurch Anteile des granuliert applizierten Stickstoffs zunächst nicht pflanzenverfügbar. Die im Versuchsjahr 2017 bis Ende Juli herrschende Trockenheit führte dazu, dass ein erhöhter Anteil des granuliert gedüngten Stickstoffs erst mit den ab Anfang August einsetzenden Niederschlägen und somit im Zeitraum der Alphasäuresynthese pflanzenverfügbar wurde. Diese Pflanzen wiesen folglich ein messbar höheres N-Versorgungsniveau auf. Wurde hingegen ein Teil des Stickstoffs über Fertigation appliziert, reduzierte sich der Anteil an Stickstoff, der ab Ende Juli mit den eintretenden Niederschlägen kurzfristig pflanzenverfügbar wurde.

Die Nutzung von Fertigation ermöglicht somit eine gezielte Steuerung der N-Versorgung und damit Optimierung des Alphasäuregehalts. Vor allem bei unterirdischer Bewässerung in Kombination mit oberflächlich gestreuter N-Düngung wird dieser Effekt als problematisch angesehen. Inwieweit bei unterirdischer Bewässerung und Fertigation eine Verzögerung der N-Wirkung eintritt wurde im Rahmen der Feldversuche nicht explizit untersucht.

4.4 Umweltrelevante Effekte

Als weiteres Ergebnis der durchgeführten Feldversuche stellte sich heraus, dass durch die Nutzung von Bewässerung und vor allem von N-Düngesystemen mit Fertigation nicht nur agronomisch wichtige Parameter stabilisiert, sondern auch ökologisch relevante Kennzahlen wie der N-Saldo verbessert werden können. Der N-Saldo beschreibt die Differenz zwischen der ausgebrachten Menge an Stickstoff und der über die Biomasse der Pflanzen entzogenen N-Menge. Ein geringerer N-Saldo führt zu niedrigeren Nmin-Gehalten im Herbst nach der Ernte, wodurch sich das Risiko der Verlagerung und Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser reduziert. Die Effekte werden nachfolgend an unterschiedlichen Beispielen aufgezeigt.

Einfluss von Bewässerung:

Wird eine Hopfenpflanze in Trockenperioden bewässert, garantiert dies vor allem auf Standorten mit stark begrenzter Wasserspeicherfähigkeit des Bodens eine optimale, sortentypische Pflanzenentwicklung. Leidet die Pflanze hingegen an Trockenstress, werden Wachstum und Entwicklung eingeschränkt, wodurch sich die Biomassebildung und damit der Biomasseaufwuchs stark verringern.

Dieser Zusammenhang zeigte sich auch im Rahmen der durchgeführten Feldversuche (vgl. Abb. 4.11). Erfolgte die N-Düngung ausschließlich „Gestreut“, nahmen bewässerte Pflanzen, im Vergleich zu nicht bewässerten, durch eine verbesserte Biomassebildung auch eine höhere Menge an Stickstoff auf. Infolge einer verringerten N-Aufnahme nicht bewässerter Pflanzen erhöhte sich der nicht genutzte Anteil der ausgebrachten N-Menge und damit der N-Saldo. Daraus resultierte ein messbar höherer N_{min} -Gehalt des Bodens im Herbst nach der Ernte. Bewässerung bei Trockenheit trägt somit zu einer Verringerung des Risikos der Verlagerung und Auswaschung von Nitrat ins Grundwasser bei.

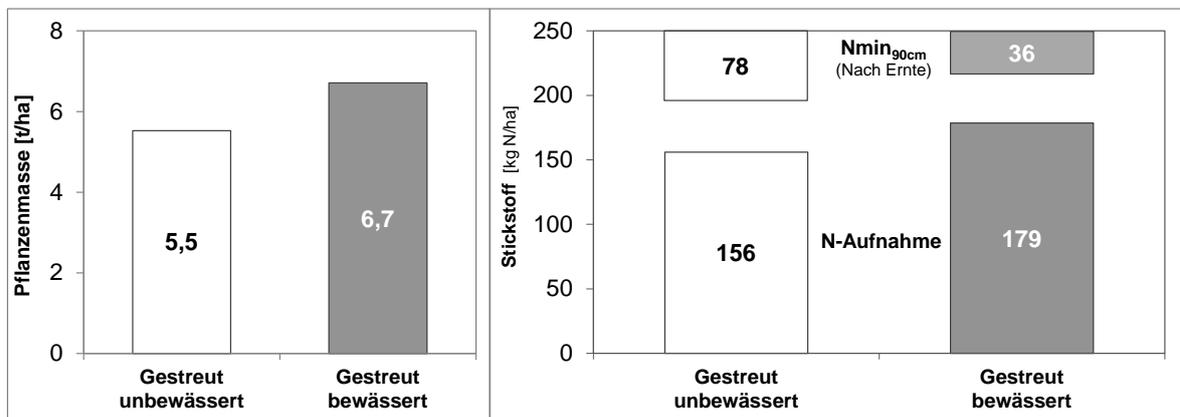


Abb. 4.11: Einfluss von Bewässerung auf die Pflanzenmasse und Stickstoffaufnahme der Sorte Perle auf einem sandigen Standort und N_{min} -Gehalt im Boden im Herbst nach der Ernte.

Einfluss von Fertigation:

Wie sich im Rahmen der Feldversuche außerdem zeigte, können auch durch die zusätzliche Nutzung von N-Düngesystemen mit Fertigation umweltökologisch relevante Faktoren wie der Stickstoffentzug und die Stickstoffausnutzung gezielt optimiert werden. Ein höherer N-Entzug der Pflanzen führte zu einer nachhaltigen Verringerung des Niveaus der N_{min} -Gehalte im Boden (vgl. Abb. 4.12), wodurch sich letztendlich das Risiko einer Nitrat-Auswaschung ins Grundwasser reduziert. Im Vergleich zu ausschließlich gestreut gedüngten und nicht bewässerten Pflanzen reduzierte sich der N_{min} -Gehalt durch die Nutzung von Fertigation im 3-jährigen Mittel von 61 auf 43 kg N/ha. Das Niveau des N_{min} -Gehalts lag damit bei Fertigation nur minimal über dem nicht mit Stickstoff gedüngter Pflanzen (38 kg N/ha).

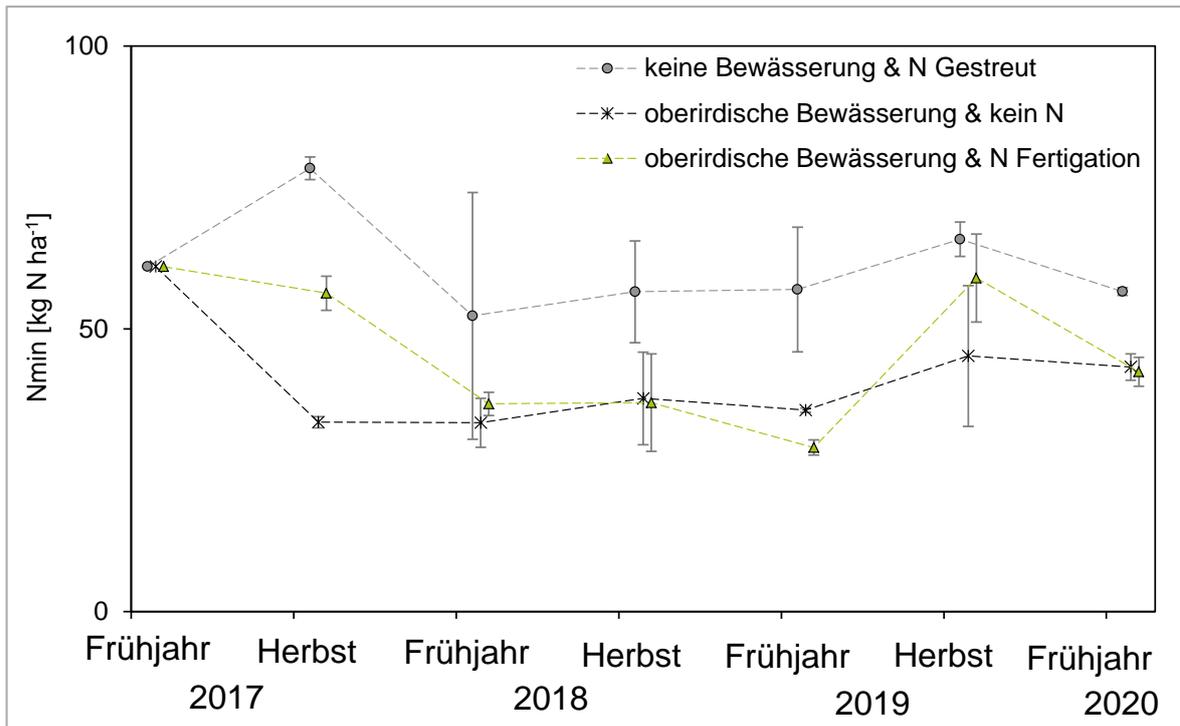


Abb. 4.12: Einfluss von Bewässerung und Fertigation auf den Verlauf des Nmin-Gehalts im Zeitraum von 2017 bis 2020.

In welchem Umfang die zusätzliche Nutzung von Fertigation bei Bewässerungssystemen zu einer Verbesserung der N-Aufnahme führt, ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Zum einen beeinflusst die Niederschlagsverteilung auch bei oberirdischer Bewässerung und gestreuter N-Düngung die Nährstoffverfügbarkeit und damit die Aufnahme eines Teils des Stickstoffs. Hintergrund hierfür ist, dass Tropfbewässerungssysteme nur Teilbereiche des Bodens durchfeuchten.

Zum anderen zeigte sich in den durchgeführten Untersuchungen, dass die Nutzung eines N-Düngesystems mit Fertigation vor allem bei einem niedrigen N-Düngeniveau zu einer deutlich höheren Effektivität führt. Nachfolgende Abb. 4.13 zeigt die Auswirkungen exemplarisch am Beispiel der Sorte Perle auf einem lehmigen Boden im Mittel der Jahre 2018 und 2019. Dabei wurden beide Versuchsvarianten oberirdisch bewässert, zudem unterschied sich die absolute Höhe der N-Düngung nicht. Die Ausbringung von 2/3 der gesamten N-Menge über das Bewässerungswasser führte zu einer Steigerung der Biomassebildung in Höhe von 15 %. Infolge der höheren Biomasse wurde die N-Aufnahme der Pflanze um 26 % gesteigert. Die Nutzung von Fertigation führte somit zu einer deutlich effizienteren Ausnutzung des ausgebrachten Stickstoffs.

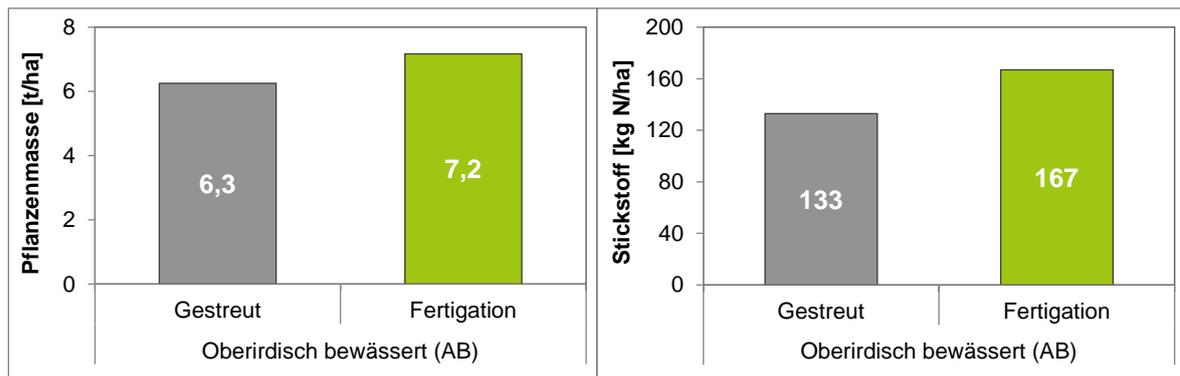


Abb. 4.13: Einfluss von Fertigation auf die Pflanzenmasse und N-Aufnahme der Sorte Perle auf einem lehmigen Boden (2-jährige Mittelwerte der Jahre 2018 und 2019).

Grundsätzlich besteht durch die Ausbringung von Stickstoff über das Bewässerungswasser (Fertigation) die Möglichkeit, die Hopfenpflanze zum optimalen Zeitpunkt bedarfsgerecht mit der benötigten N-Menge zu ernähren. Damit wird das Risiko, dass im Herbst nach der Ernte im Boden hohe Rest-N-Mengen ungenutzt verbleiben, deutlich vermindert.

5 Bewässerungsmanagement

Die Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen ist aus pflanzenbaulicher und ökonomischer Sicht erst dann sinnvoll, wenn das Pflanzenwachstum aufgrund einer mangelnden Wasserversorgung eingeschränkt wird und dadurch Ertrags- oder Qualitätseinbußen entstehen. Ein effektives und ressourcenschonendes Bewässerungsmanagement beinhaltet dabei die Bestimmung von Zeitpunkt und Höhe der Wassergaben sowie Zeitintervallen zwischen diesen auf Basis objektiver Bemessungskriterien. Das Ziel der Bewässerung liegt in der Aufrechterhaltung einer pflanzenartspezifischen optimalen Bodenfeuchte, so dass die Pflanzenentwicklung nicht beeinträchtigt wird. Dabei ist eine nachhaltige und umweltverträgliche Bewirtschaftung der Wasserressourcen zu verfolgen. Im Verlauf dieses Kapitels werden folgende Fragen im Hinblick auf die Bewässerung von Hopfen thematisiert.

- Ø In welchem Zeitraum ist die Bewässerung sinnvoll?
- Ø Wie kann die Höhe der Einzelgaben bemessen werden?
- Ø In welchen Zeitintervallen sollte bewässert werden?
- Ø Wann und in welchem Umfang ist die Einspeisung von Dünger sinnvoll?

Um ein effektives Bewässerungsmanagement zu erreichen, müssen auch betriebliche Abläufe angepasst werden. Im Hopfen ist bei oberirdischer Tropfschlauchverlegung vor allem wichtig, dass das Auslegen der Tropfschläuche rechtzeitig erfolgt. Das Ziel sollte Mitte Juni sein. Vorausgehende Kulturmaßnahmen sind möglichst danach auszurichten.

Bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung mit zwei Schläuchen in jeder zweiten Fahrspur ist zwingend darauf zu achten, dass diese Spuren ab dem Beginn von Bewässerungsmaßnahmen nicht mehr befahren werden. Ansonsten können in Abhängigkeit der Bodenart und -feuchte schädliche Bodenverdichtungen entstehen, wodurch das Wurzel- und Pflanzenwachstum eingeschränkt wird.

5.1 Wasserbedarf des Hopfens

Der Wasserverbrauch eines Pflanzenbestands entsteht durch Verdunstung. Dabei variiert die täglich verdunstete Wassermenge je nach Witterungsbedingungen, Pflanzenentwicklung und Standort. Eine Beschreibung der Verdunstung kann über den Prozess der sogenannten **Evapotranspiration (ET)** erfolgen. Evapotranspiration setzt sich zusammen aus:

- **Evaporation** = Verdunstung über die Bodenoberfläche
- **Transpiration** = Verdunstung über die Spaltöffnungen der Pflanze

Der Anteil von Evaporation bzw. Transpiration an der gesamten Verdunstung verändert sich im Wachstumsverlauf eines Pflanzenbestands (vgl. Abb. 5.1). Während in frühen Entwicklungsstadien nach der Aussaat, der Pflanzung oder dem Austrieb (bei Hopfen) die Verdunstung über die Bodenoberfläche (Evaporation) überwiegt, erhöht sich der Anteil der Verdunstung über die Pflanze (Transpiration) mit zunehmender Pflanzen- und Blattflächenentwicklung. Dabei gilt, je höher die Beschattung der Bodenoberfläche durch den Pflanzenbestand, desto geringer der Anteil der Evaporation.

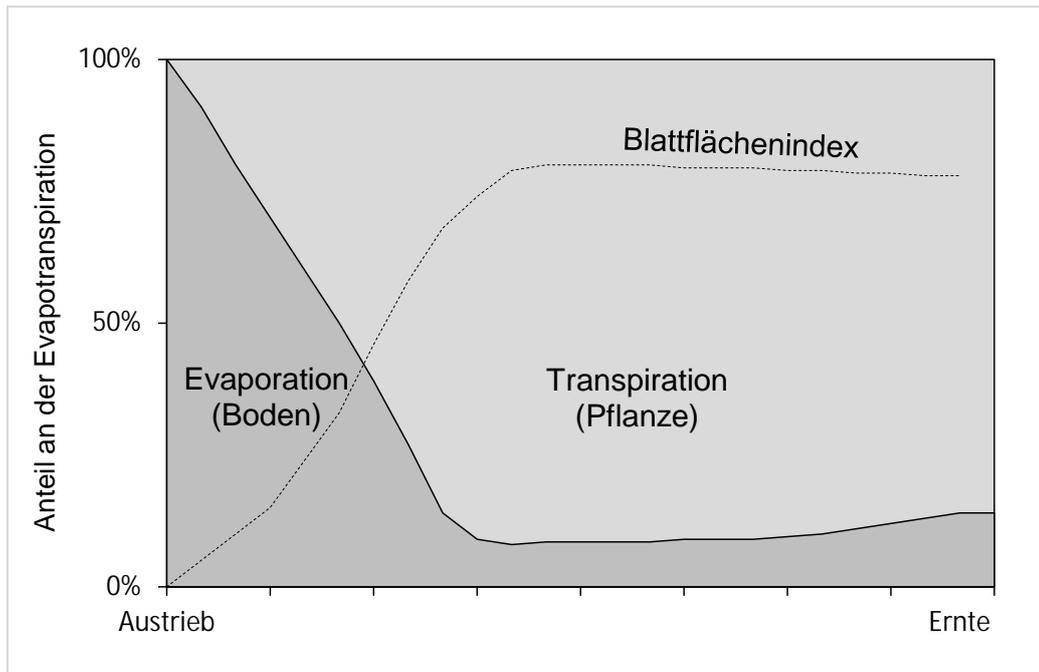


Abb. 5.1: Entwicklung von Evaporation und Transpiration im Wachstumsverlauf einer Pflanze (eigene Darstellung nach: Allen et al. (1998)).

Die Gesamthöhe der Evapotranspiration, auch bezeichnet als Verdunstungsrate, wird durch die Witterungsparameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung beeinflusst. Diese Parameter können an Wetterstationen gemessen und damit eine tägliche sogenannte Referenzverdunstungsrate berechnet werden. Als Referenzvegetation für die Berechnung dient zunächst ein Grasbestand mit optimaler Wasserversorgung, so dass die Verdunstung nicht durch Wassermangel limitiert ist. Diese Referenzverdunstung wird auch als potenzielle Evapotranspiration (ET_o) bezeichnet.

Die Angabe der Evapotranspiration erfolgt in der Einheit Millimeter. 1 mm Wasser je Quadratmeter entspricht einem Volumen von 1 Liter. Bei einer Evapotranspiration von 1 mm pro Tag ergibt sich eine Gesamt-Wassermenge von 10 m³ je Hektar. Die Berechnung der Verdunstung auf Basis von Witterungsdaten ermöglicht eine Bilanzierung des Wasserverbrauchs eines Pflanzenbestands.

Die Ableitung der realen Evapotranspiration (ET_c) für eine bestimmte Pflanzenart, z. B. Hopfen erfolgt durch Multiplikation mit einem pflanzenartspezifischen Korrekturfaktor, dem sogenannten **kc-Faktor**: **$ET_c = ET_o * kc\text{-Faktor}$**

Der kc-Faktor beschreibt kulturindividuell den Wasserbedarf zu bestimmten Entwicklungsstadien. Hopfen erreicht aufgrund seiner großen Blattfläche (vgl. Kapitel 2) vor allem in den Monaten Juli und August sehr hohe kc-Faktoren (vgl. Tab. 5.1). Folgende kc-Faktoren wurden für Hopfen festgelegt:

Tab. 5.1: Hopfenspezifische kc-Faktoren in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium (verändert nach: Allen et al. (1998) auf Basis mehrjähriger Versuchsergebnisse).

Entwicklungsstadium	Erreichen des Stadiums	kc-Faktor
vor Austrieb	1. April	0,1
ab Austrieb	15. April	0,4
50% Gerüsthöhe	5. Juni	0,7
100% Gerüsthöhe	25. Juni	1,0
Beginn Blüte	10. Juli	1,1
Ende Doldenentwicklung	25. August	0,8
Erntereife	5. September	0,5

Wird auf Basis der potenziellen Evapotranspiration (Wetterstation) und des kc-Faktors die tatsächliche Verdunstungsrate für Hopfen berechnet, zeigt sich, dass Hopfen vor allem in den Monaten Juni, Juli und August einen hohen Wasserbedarf hat (vgl. Abb. 5.2). Unter den aktuellen klimatischen Bedingungen in der Hallertau kann als Bewässerungsperiode bei Hopfen der Zeitraum von Mitte Juni bis Mitte September (je nach Reifezeitpunkt der Sorte) festgelegt werden. In Extremjahren mit langen Trockenperioden kann sich ein Gesamt-Bewässerungsbedarf von bis zu 1500 m³/ha und Jahr bzw. 40 m³/ha und Tag ergeben.

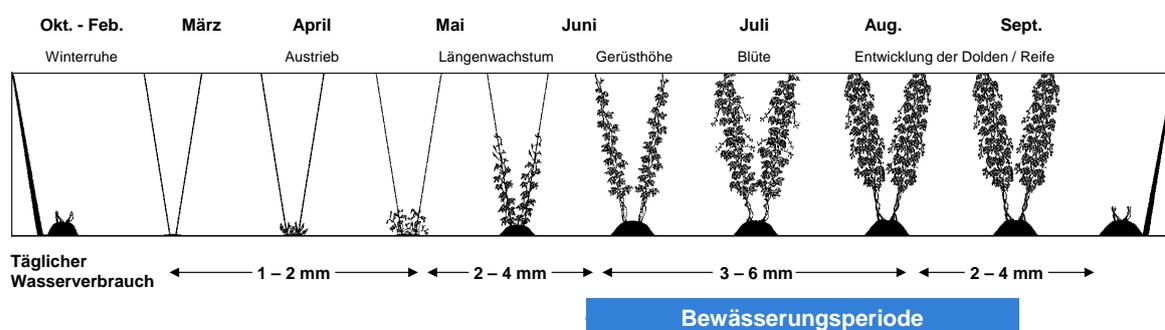


Abb. 5.2: Wachstumsverlauf, täglicher Wasserverbrauch und Bewässerungsperiode bei Hopfen (eigene Darstellung nach Niedermeier (2020)).

5.2 Wasserspeichervermögen des Bodens

Die Deckung des Wasserbedarfs eines Pflanzenbestands erfolgt grundsätzlich über den im Boden gespeicherten Wasservorrat, der in der Regel durch Niederschläge gespeist wird. Wassergaben durch Bewässerung sind erst dann erforderlich, wenn der Bodenwasservorrat in Trockenperioden unter ein bestimmtes Niveau sinkt und das Pflanzenwachstum dadurch eingeschränkt wird.

Somit stellt das Wasserspeichervermögen des Bodens eine wichtige Kennzahl für die Bemessung des Bewässerungsbedarfs dar. Wieviel Wasser der Boden eines Standortes speichern kann, wird von der Porengrößenverteilung bestimmt. Die Porengrößenverteilung eines Bodens ist vor allem von der Bodenart abhängig. Eine bestimmte Bodenart wird definiert durch eine charakteristische Zusammensetzung unterschiedlich großer Bodenteilchen, auch bezeichnet als Korngrößenzusammensetzung. Grundsätzlich werden dabei folgende Korngrößen unterschieden (nach: Eckelmann (2005)):

- **Sand:** 0,063 - 2 mm
- **Schluff:** 0,002 - 0,063 mm
- **Ton:** < 0,002 mm

Die Speicherung des Wassers erfolgt in Hohlräumen (Poren) zwischen den Bodenteilchen (vgl. Abb. 5.3). Je höher der Tonanteil eines Bodens, desto höher der Anteil an Feinporen, in denen gespeichertes Wasser starken Bindungskräften unterliegt, die durch Pflanzenwurzeln nicht überwunden werden können. Das in Feinporen gespeicherte Wasser ist somit nicht pflanzenverfügbar. Bei hohen Sandanteilen hingegen steigt der Anteil an Grobporen, in denen Niederschlagswasser nicht mehr entgegen der Schwerkraft festgehalten werden kann und versickert. Eine Besonderheit dabei stellen die engen Grobporen dar. In diesen versickert das Wasser nur sehr langsam und ist somit für die Pflanze verfügbar. Hohe Anteile an Schluff führen zu einem großen Volumen an Mittelporen. Dort kann das Wasser zum einen entgegen der Schwerkraft festgehalten und somit gespeichert werden. Zum anderen ist dieses Wasser aber auch pflanzenverfügbar, da die Pflanzenwurzeln die Bindungskräfte überwinden können.

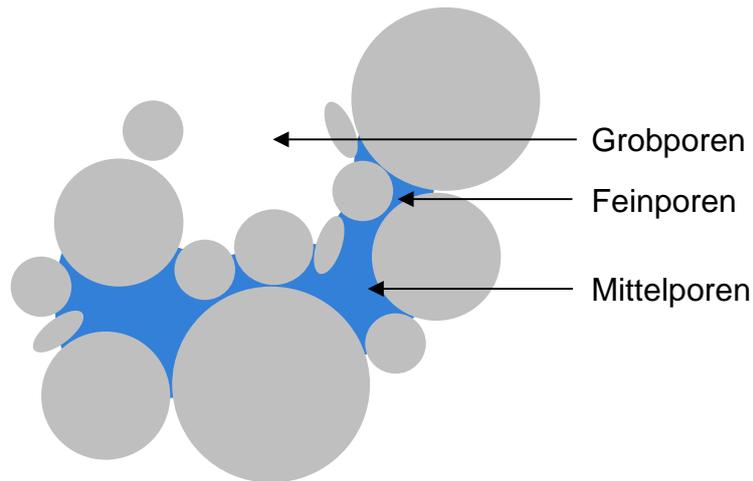


Abb. 5.3: Einteilung der Porengrößen eines Bodens.

Das Volumen der Mittel- und engen Grobporen ist das entscheidende Kriterium für die Speicherfähigkeit eines Bodens an pflanzenverfügbarem Wasser (vgl. Tab. 5.2). Bezeichnet wird dieses Volumen auch als nutzbare Feldkapazität (nFK). Die nutzbare Feldkapazität ist schließlich die maßgebende Kennzahl, um das pflanzenverfügbare Wasserspeichervermögen eines Standortes zu bewerten. Die Angabe der nFK erfolgt entweder in der Einheit Volumen-Prozent (Vol.-%) oder in mm pro 10 cm Bodentiefe (vgl. Tab. 5.3).

Tab. 5.2: Zusammenhang zwischen Porengröße und Speicherkapazität (eigene Darstellung nach Eckelmann (2005)).

Poren	Enthaltenes Wasser	Speicherkapazität
weite Grobporen	schnell beweglich	Luftkapazität (LK)
enge Poren	langsam beweglich	nutzbare Feldkapazität (nFK)
Mittelporen	pflanzenverfügbar	
Feinporen	nicht pflanzenverfügbar	Totwasser (TW)

Auf sogenannten leichten Böden (z. B. Sand, schwach lehmige Sande) leiden Pflanzen in Trockenperioden aufgrund eines insgesamt sehr niedrigen Wasserspeichervermögens und damit geringer nFK-Werte schneller an Wasserstress, weshalb Wassergaben durch Bewässerung früher erforderlich werden (vgl. Tab. 5.3). Hingegen besteht bei sehr schweren Böden (z. B. Ton) die Problematik, dass diese zwar grundsätzlich viel Wasser speichern können, ein hoher Anteil dieses Wassers jedoch in Feinporen gebunden und somit für die Pflanze nicht nutzbar ist.

Tab. 5.3: nFK-Werte für unterschiedliche Bodenarten in Vol.% bzw. mm pro 10 cm Bodentiefe (eigene Darstellung nach Müller und Ebertseder (2020)).

Bodenart		nFK / Vol.-%
leicht	Sand (S)	9
leicht	schwach lehmiger Sand (IS)	13
mittel	stark lehmiger Sand (IIS)	16
mittel	sandiger Lehm (sL)	19
mittel	schluffiger Lehm (uL)	22
schwer	toniger Lehm (tL)	17
schwer	lehmiger Ton (IT)	14
schwer	Ton (T)	10

Um letztendlich die Gesamt-Menge an pflanzenverfügbarem Wasser an einem Standort zu ermitteln, muss die nFK mit der durchschnittlichen Durchwurzelungstiefe multipliziert werden.

Berechnungsbeispiel:

Bodenart = sandiger Lehm (sL)

nFK = 16 Vol.-% ODER: 16 mm pro 10 cm Bodentiefe (pro Quadratmeter)

Durchwurzelungstiefe = 100 cm

nFK gesamt = 16 mm x (100/10 cm) = 160 mm

Bei der Bewertung der gesamten nutzbaren Feldkapazität eines Standortes ist zu beachten, dass sich die Bodenart tieferer Schichten und damit die nFK von der des Oberbodens unterscheiden kann. Treten z. B. innerhalb der Durchwurzelungstiefe stark sand- oder kieshaltige Schichten auf, sollten diese berücksichtigt werden. Des Weiteren können auch unterschiedliche Bodenarten im Gelände dazu führen, dass die nFK innerhalb eines Schlags variiert.

Im Frühjahr ist die gesamte nutzbare Feldkapazität unter den aktuellen klimatischen Bedingungen in der Hallertau in der Regel zu 100 % aufgefüllt. Im Wachstumsverlauf des Hopfens wird ein Teil des nutzbaren Bodenwasservorrats durch Verdunstung (Evapotranspiration) entleert. Dabei wird der Anteil des zu einem bestimmten Zeitpunkt noch zur Verfügung stehenden Bodenwasservorrats in Prozent der nFK angegeben. Während der Vegetation muss das Ziel sein, dass Niederschläge möglichst nicht durch Oberflächenabfluss verloren gehen,

sondern effektive pflanzenbauliche Maßnahmen getroffen werden, um die Infiltration zu maximieren und somit den Bodenwasservorrat wieder aufzufüllen. Treten während der Wachstumsphase des Hopfens jedoch längere Trockenperioden ohne Niederschläge auf, verringert sich der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat zunehmend.

5.3 Ermittlung des Bewässerungsbedarfs

Bewässerung ist erst dann erforderlich, wenn der Bodenwasservorrat bei ausbleibenden Niederschlägen durch zunehmende Austrocknung unter eine bestimmte kulturspezifische Schwelle fällt. Mit Bewässerungsschwellen (in % der nFK) wird angegeben, ab welcher Bodenfeuchte Zusatzwassergaben durch Bewässerung erforderlich sind, damit das Pflanzenwachstum aufgrund hoher Saugspannungswerte nicht eingeschränkt wird. Die Ermittlung des tatsächlichen Bewässerungsbedarfs kann auf Basis folgender Kriterien erfolgen:

- tägliche Verdunstungsrate (reale Evapotranspiration)
- Niederschlagsmenge und -verteilung
- Verlauf des Bodenwasservorrats

Bewässerungsbedarf – Ermittlung per App:

Die Bewässerungs-App der Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen (ALB) ist ein webbasiertes Entscheidungssystem zur Planung, Berechnung und Dokumentation von Bewässerungsmaßnahmen. Mit der App ist es möglich für verschiedene Kulturen, darunter auch Hopfen, standortbezogen den täglichen Bewässerungsbedarf zu ermitteln. Das Berechnungsmodell nutzt dabei die tägliche Verdunstungsrate, die Niederschlagsmenge und -verteilung sowie den Verlauf des Bodenwasservorrats. Eine detaillierte Beschreibung der Grundlagen der App ist in den Beratungsblättern der ALB zu finden.

Verfügbar ist die Anwendung kostenlos unter:



www.alb-bayern.de/app

Eine ausführliche Beschreibung der Funktionen und der Nutzung ist auf der ALB-Website unter „Infos & Erläuterungen zur Handhabung“ zu finden. Die App kann entweder im „Standardmodus“ oder im „Expertenmodus“ verwendet werden. Der Vorteil des Expertenmodus ist, dass kostenfrei ein Benutzerkonto angelegt werden kann, worin schlagbezogene Daten gespeichert und zu beliebigen Zeitpunkten wieder aufgerufen werden können. Im Rahmen dieses Kapitels werden Besonderheiten der App im Hinblick auf die Nutzung für Hopfen beschrieben.

Vorgehensweise zur Nutzung der App:

Wichtig für eine standortangepasste Berechnung des Bewässerungsbedarfs ist zunächst die Auswahl der nächsten **Wetterstation**. Neben einer Liste mit allen verfügbaren Wetterstationen steht auch eine Kartenansicht zur Verfügung, so dass die nächstgelegene Wetterstation einfach durch Anklicken übernommen werden kann. Die Witterungsdaten der ausgewählten Wetterstation dienen als Basis für die Berechnung der Verdunstungsraten sowie für die Bewertung des Wassereintrags durch Niederschläge. Da die Niederschlagsverteilung jedoch vor allem in den Sommermonaten kleinräumig sehr stark schwanken kann, steht seit dem Jahr 2020 die Zusatzfunktion „Hochauflösender Niederschlag“ zur Verfügung. Dabei werden zusätzlich Radolan-Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt, wodurch die Angabe der Niederschlagsverteilung in einem 1 km-Raster möglich ist.

Als nächstes muss die am Standort vorherrschende **Bodenart** ausgewählt werden. Über die Bodenart wird durch hinterlegte Daten die nutzbare Feldkapazität des Standortes festgelegt. Anschließend kann das System eine Bilanzierung des Bodenwasservorrats vornehmen. Die Durchwurzelbarkeit des Bodens (Grundeinstellung = 100 cm) sollte nur verändert werden, wenn z. B. eine ungünstige Unterbodenstruktur begrenzend wirkt.

Als **Kulturart** ist die Fruchtart Hopfen auszuwählen. Im Anschluss werden automatisch die Termine für bestimmte Entwicklungsstadien übernommen. Wichtig sind diese Termine zur Berechnung der realen Verdunstungsraten auf Basis festgelegter hopfenspezifischer kc-Faktoren (vgl. Tab. 5.1). Hinsichtlich der maximalen Wurzeltiefe ist anzuführen, dass bei Hopfen aufgrund des Anbaus in Reihen mit einem Abstand von 3,20 m in der Fahrspurenmitte eine geringere Durchwurzelungstiefe und -intensität als unmittelbar unterhalb des Wurzelstocks erreicht wird. Im Durchschnitt über die gesamte Fläche ist davon auszugehen, dass je nach Bodeneigenschaften Werte zwischen 80 und 100 cm erreicht werden. Grundsätzlich ist hierbei auch das Alter des Hopfens wichtig. Da die vollständige Entwicklung des Wurzelstocks einer Hopfenpflanze je nach Standort und Sorte 4 bis 5 Jahre dauert, muss anfangs von einer geringeren Durchwurzelungstiefe ausgegangen werden.

Mit der Auswahl der Fruchtart „Hopfen“ werden auch Grundeinstellungen hinsichtlich des Bewässerungssystems und der Bewässerungsintensität festgelegt. Diese können aber je nach vorhandenen Gegebenheiten am Betrieb jederzeit angepasst werden. Die **Bewässerungsschwelle** (in % der nFK) gibt, bezogen auf das gesamte durchwurzelte Bodenvolumen an, ab welcher Bodenfeuchte Zusatzwassergaben erforderlich werden. Ist während der Hauptwachstumsphase des Hopfens eine längere Trockenperiode mit hohen Verdunstungsraten absehbar, sollte die Bewässerungsschwelle anfangs mit 70 bis 80 % der nFK nicht zu niedrig angesetzt werden, um einen rechtzeitigen Beginn von Bewässerungsmaßnahmen zu ermöglichen. Obwohl der Hopfen ein weit verzweigtes Wurzelsystem aufweist, kann bereits eine beginnende Austrocknung des Bifangs und Hauptwurzelbereichs je nach Sorte zu Trockenstress und Ertragseinbußen führen. Wird mit der Bewässerung zu spät begonnen, können Ertrag und Qualität häufig nicht mehr rechtzeitig stabilisiert werden. Im weiteren Verlauf

der Bewässerungsperiode kann die Bewässerungsschwelle mit zunehmender Austrocknung des Bodens auch verringert werden.

Darstellung der Ergebnisse:

Die Ergebnisse der Berechnung werden in unterschiedlichen Diagrammen und Tabellen ausgegeben (vgl. Abb. 5.4 und Abb. 5.5). Im ersten Diagramm werden in der Grundeinstellung über den gesamten Berechnungszeitraum auf Tagesbasis folgende Parameter dargestellt:

- tägliche Verdunstungsrate bzw. reale Evapotranspiration (orange Säule)
- tägliche Niederschlagsmenge (blaue Säulen)
- Verlauf der Tagesdurchschnittstemperatur (rote Linie)
- Anteil der Versickerung bei hohen Niederschlagsmengen (lila Säulen)
- notwendige Bewässerungsmengen (grüne Säulen)

Mit Ausnahme der mittleren Tagestemperatur werden alle Parameter in der Einheit Millimeter angegeben.

Die Ermittlung der auszubringenden Wassermenge in Kubikmeter je Hektar erfolgt nach folgendem Prinzip:

Berechnungsbeispiel:

$$1 \text{ mm} = 1 \text{ Liter pro m}^2$$

$$1 \text{ Liter} \times 10.000 \text{ m}^2 (1 \text{ ha}) = 10.000 \text{ Liter bzw. } 10 \text{ m}^3/\text{ha}$$

$$\Rightarrow 1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha}$$

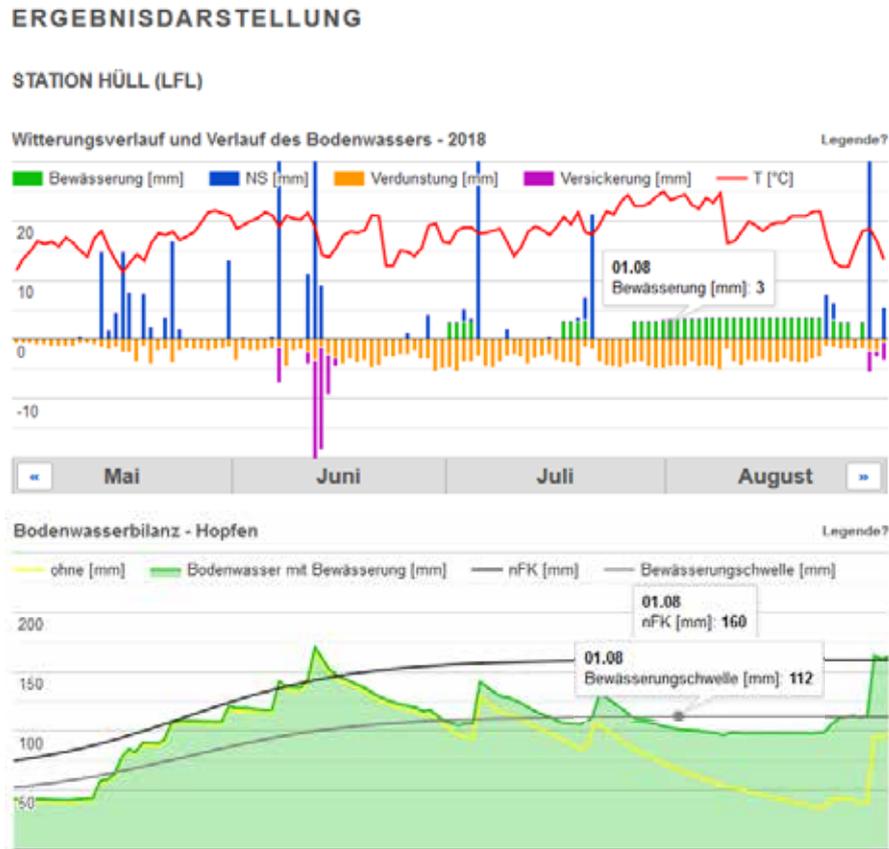


Abb. 5.4: Ergebnisdarstellung der Bewässerungs-App (verändert nach ALB Bayern (2020)).

Das zweite Diagramm beinhaltet die Bodenwasserbilanz, ebenfalls in der Einheit Millimeter (vgl. Abb. 5.4). Angegeben wird die gesamte nutzbare Feldkapazität (nFK) (dunkelgraue Linie), bezogen auf die ausgewählte Bodenart und Durchwurzelungstiefe. Die hellgraue Linie entspricht der festgelegten Bewässerungsschwelle. Im ausgewählten Beispiel liegt diese bei 70 % der nFK. Letztendlich zeigen die grüne und gelbe Linie den Verlauf des Bodenwassergehalts mit (grün) und ohne (gelb) Zusatzwassergaben durch Bewässerung auf.

Abschließend werden in einer Tabelle über den gesamten Zeitraum zusammenfassend unterschiedliche Bewässerungsparameter dargestellt (vgl. Abb. 5.5).

Summenwerte von 20.04.2018 bis 30.09.2018

Kennwert	ohne Bewässerung	mit Bewässerung	Zunahme
Bewässerung	0 mm	132 mm	132 mm
Niederschlag NS	397 mm	397 mm	0 mm
Verdunstung	349 mm	413 mm	64 mm
Versickerung	61 mm	85 mm	23 mm

Abb. 5.5: Ergebnisdarstellung der Bewässerungs-App (verändert nach ALB Bayern (2020)).

Planung von Bewässerungsmaßnahmen:

Grundsätzlich stehen der Bewässerungs-App Wetterdaten für alle vergangenen Tage zur Verfügung. Um Bewässerungsmaßnahmen trotzdem vorausschauend planen zu können, kann die erwartete Witterung als „Witterungserwartung für die kommenden Tage“ berücksichtigt werden. Die Einstufungen haben Einfluss auf die veranschlagte Intensität der Verdunstung. Sollen zusätzlich auch "erwartete Niederschläge" miteinbezogen werden, können diese unter Korrekturen ergänzt werden. Bei den Korrekturen können auch Wassermengen eingetragen werden, die tatsächlich ausgebracht wurden.

5.4 Wasserausbringung und Bewässerungsintervalle

Die Bewässerungs-App ist ein effektives Entscheidungssystem, um festzulegen, ab welchem Zeitpunkt und in welcher Höhe Zusatzwassergaben durch Bewässerung erforderlich sind. Im Rahmen dieses Kapitels wird speziell für Hopfen beschrieben, welche Kriterien bei der Wasserausbringung und Festlegung der Bewässerungsintervalle zu beachten sind. Für die Planung von Bewässerungsmaßnahmen wird grundsätzlich empfohlen nicht nur Einzeltage zu betrachten, sondern einen längeren Zeitraum, z. B. eine Woche.

Berechnungsbeispiel:

Witterung: Hohe Verdunstungsraten, keine Niederschläge prognostiziert

Betrachtungszeitraum: 7 Tage

täglicher Bewässerungsbedarf: 2,5 mm = 25 m³/Tag

Gesamt-Bewässerungsbedarf in 7 Tagen: 17,5 mm = 175 m³/ha

Nach der Ermittlung des Gesamtbedarfs für einen bestimmten Zeitraum stellt sich in der Praxis häufig die Frage, wie diese Wassermenge verteilt wird, d. h. soll täglich bewässert werden oder sollen höhere Einzelgaben ausgebracht werden, dafür aber nur jeden zweiten oder dritten Tag (vgl. Abb. 5.6). Bei der Festlegung der Wasserverteilung sind unterschiedliche Faktoren zu beachten.

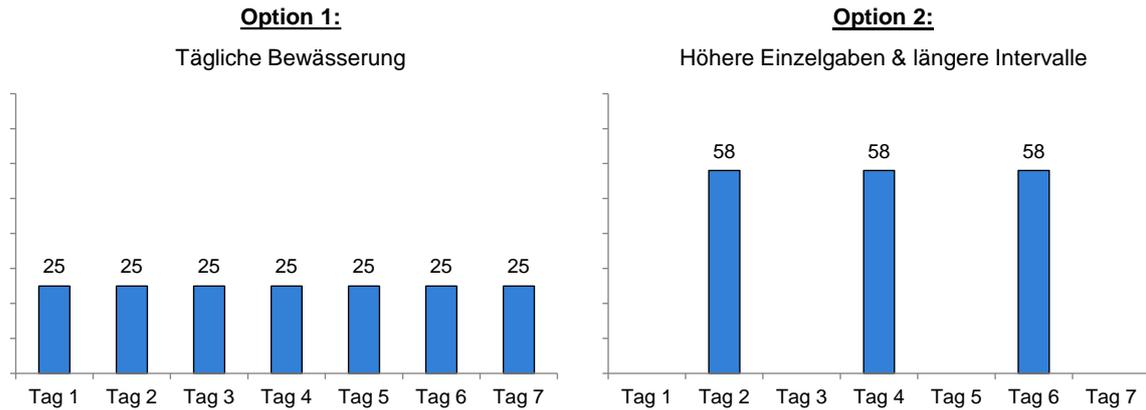


Abb. 5.6: Möglichkeiten zur Verteilung des berechneten Gesamt-Bewässerungsbedarfs von $175 \text{ m}^3/\text{ha}$ über einen 7-tägigen Zeitraum (Tropfschlauch: Ausstoßrate = $1,0 \text{ l/h}$; Abstand der Tropfauslässe = 50 cm).

Kriterien zur Festlegung der Wasserverteilung:

Auf sehr leichten Böden mit hohen Sand- oder Kiesanteilen ist darauf zu achten, dass das Wasser bei hohen Einzelgaben nicht zu tief und damit außerhalb des effektiven Wurzelraums versickert. Aufgrund der hydraulischen Bodeneigenschaften ist auf leichten Böden nur eine begrenzte horizontale Verteilung des Wassers möglich. Stattdessen verteilt sich das Wasser verstärkt in Richtung der Schwerkraft (vgl. Abb. 5.7). Dabei ist nicht nur der Oberboden wichtig, sondern auch die Zusammensetzung des Bodens in tieferen Schichten. Treten z. B. in 30 bis 50 cm Tiefe Schichten mit hohen Sand- oder Kies-Anteilen auf, sollten hohe Einzelgaben vermieden werden. Hingegen verbessert sich die horizontale Verteilung des Bewässerungswassers mit zunehmendem Schluff- und Tonanteil, weshalb auf mittleren und schwereren Böden auch höhere Einzelgaben möglich sind. Auf schwereren Böden besteht jedoch die Gefahr, dass bei sehr langen Wasserlaufzeiten (hohen Einzelgaben) Sauerstoffmangel im Boden entsteht, wodurch die Pflanzenwurzeln im Bereich unmittelbar um die Tropfstelle absterben können.

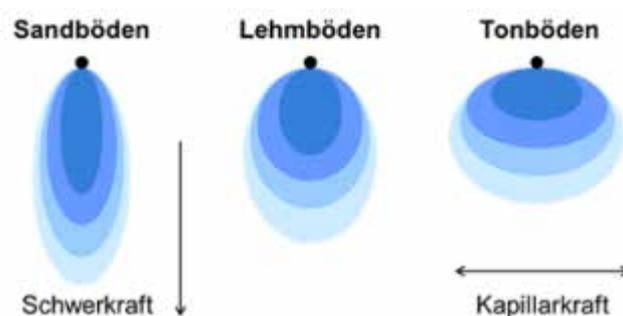


Abb. 5.7: Wasserverteilung im Boden in Abhängigkeit der Bodenart (ALB Bayern, 2020).

Neben den Bodeneigenschaften ist bei der Festlegung der Höhe der Einzelgaben auch die Positionierung des Tropfschlauches zu berücksichtigen. In Feldversuchen zeigte sich, dass unterirdische Bewässerung neben dem Bifang (NB) auf leichten Böden weniger effektiv war

als oberirdische Bewässerung auf dem Bifang (AB) (vgl. Kapitel 4). Ursächlich war eine zu geringe horizontale Verteilung des Wassers, wodurch der Hauptwurzelbereich nicht ausreichend durchfeuchtet wurde. Aus Feldversuchen und Praxiserfahrungen der vergangenen Jahre ist bekannt, dass längere Intervalle und höhere Einzelgaben bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung zu einer Verbesserung der Systeme führen, da ein größeres Bodenvolumen durchfeuchtet wird. Dies gilt jedoch ausschließlich für Böden, auf denen sich das Wasser auch horizontal verteilt (vgl. Abb. 5.8). Auf stark sandigen oder kiesigen Böden sind hohe Einzelgaben und längere Intervalle vor allem bei unterirdischer Bewässerung hingegen keine Option.



*Abb. 5.8: Mittlerer Boden mit ausreichender horizontaler Wasser-
verteilung bei unterirdischer Tropfschlauchverlegung neben dem
Bifang.*

Auch auf stark tonigen Böden ist die maximale Höhe einzelner Bewässerungsgaben häufig limitiert, da sich das Wasser nicht ausreichend schnell verteilt. Zu erkennen ist dies daran, dass sich das Wasser oberirdisch ansammelt. Dies sollte vermieden werden (vgl. Abb. 5.9).



*Abb. 5.9: Oberirdische Wasseransammlung bei unterirdischer Bewässerung neben
dem Bifang auf tonigem Boden bei Ausbringung zu hoher Einzelgaben.*

Wird der Tropfschlauch oberirdisch auf dem Bifang verlegt (AB), ist die Gefahr einer zu tiefen Versickerung geringer als bei unterirdischer Bewässerung. In Feldversuchen zeigte sich deutlich, dass aufgrund des speziellen Sommerwurzelsystems des Hopfens im aufgeschütteten Bifang auch auf leichteren Standorten höhere Einzelgaben möglich sind; denn im Bifang herrscht eine sehr hohe Durchwurzelungsintensität (vgl. Abb. 2.2 und Abb. 3.14).

Hinsichtlich der Höhe der Wassergaben ist weiterhin zu beachten, dass zu kleine Einzelgaben zu einem geringen durchfeuchteten Bodenvolumen führen. Die Folge daraus ist, dass sich die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen auf ein kleineres Bodenvolumen konzentriert, wodurch es bei länger anhaltenden Trockenperioden zu einer Nährstoffverarmung im Bewässerungshorizont bis hin zu einer Nährstoffunterversorgung kommen kann.

Ein weiteres Kriterium ist die zur Deckung des benötigten Wasserbedarfs zur Verfügung stehende Wassermenge. Wenn keine ausreichenden Wasservorräte zur Verfügung stehen und ausschließlich aus Brunnen gefördert wird, ist entweder die Wasserentnahmegenehmigung, die Brunnen- oder die Pumpenleistung ein begrenzender Faktor. Liegt die täglich verfügbare Wassermenge bei hohen Verdunstungsraten deutlich unter dem Bewässerungsbedarf, sollten, um ein möglichst großes Bodenvolumen zu durchfeuchten, die Höhe der Einzelgaben gesteigert und die Länge der Bewässerungsintervalle vergrößert werden.

Maximale Wassergaben:

- 1) leichte Standorte: bis zu 31 m³/ha pro Gabe
- 2) mittlere und schwere Standorte: bis zu 75 m³/ha pro Gabe

Die Begrenzung der maximalen Höhe der Einzelgaben führt dazu, dass auf sehr leichten Standorten bei starker Trockenheit täglich bewässert werden muss, wohingegen auf schwereren Standorten längere Bewässerungsintervalle möglich sind.

Ermittlung der Wasserlaufzeit:

Der Betrieb von Bewässerungsanlagen erfolgt häufig über Computer, die auf Basis eines 24 Stunden- und 7 Tage-Rhythmus arbeiten. Um eine bestimmte Wassermenge je Hektar auszubringen, muss deshalb die Wasserlaufzeit in Stunden ermittelt werden. Die Laufzeit variiert in Abhängigkeit des verwendeten Tropfschlauches und des Reihenabstands und kann wie folgt berechnet werden:

- Wasserausstoß in Kubikmeter je Stunde und Hektar
= [(10.000 m² / Reihenabstand) / Tropfabstand] x (Tropferausstoß / 1000)
- Wasserlaufzeit in Stunden
= Auszubringende Wassermenge [m³/ha] / Wasserausstoß [m³/ha/Std.]

Berechnungsbeispiel aus Kapitel 3.2

- Reihenabstand: 3,2 m
- Tropfschlauch: 0,5 m Tropfabstand, 1,0 l/Std. Tropferausstoß
- $[(10.000 \text{ m}^2 / 3,2 \text{ m}) / 0,5 \text{ m}] \times (1,0 \text{ l/Std.} / 1000) = 6,25 \text{ m}^3/\text{Std.}$
- $6,25 \text{ m}^3/\text{Std.} = 0,625 \text{ mm/Std.}$
- Auszubringende Wassermenge $62,5 \text{ m}^3 = 10 \text{ Std. Wasserlaufzeit}$

Überprüfung der Bewässerungsmaßnahmen im Feld:

Ein wesentlicher Bestandteil eines effektiven Bewässerungsmanagements ist auch die Überprüfung der Bewässerungsmaßnahmen im Feld. Das bedeutet regelmäßig zu kontrollieren, ob die ausgebrachte Wassermenge und die Wasserverteilung mit dem tatsächlichen Bedarf des Hopfens übereinstimmen. Folgende Faktoren können dazu führen, dass der Bedarf über- oder unterschätzt wird:

- wechselnde Bodenqualitäten innerhalb eines Schlags
- Sortenunterschiede
- Unterschiede in der Bestandsdichte
- Oberflächenabfluss von Niederschlagswasser in Hanglagen

Vor allem, wenn neu mit der Hopfenbewässerung begonnen wird, sollte auf jeden Fall durch regelmäßige Spatenproben überprüft werden, ob tendenziell zu viel oder zu wenig bewässert wird. In der Regel ist im Feld gut sichtbar, ob die Hopfenpflanzen das ausgebrachte Wasser aufnehmen oder die Bodenfeuchte zunimmt. Durch Aufgraben unterhalb einer Tropfstelle nach einer Wassergabe kann beispielsweise auch die Versickerungstiefe beurteilt und anschließend die Höhe einzelner Wassergaben standortspezifisch angepasst werden.

Messung der Bodenfeuchte:

Des Weiteren können Bewässerungsmaßnahmen auch durch die Messung der Bodenfeuchte überprüft werden. Hierfür existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Messmethoden und Sensoren.

Sogenannte **Tensiometer** bestehen aus einem mit Wasser gefülltem Plexiglasrohr, an dem unten eine luftdichte Keramik- oder Tonzelle und oben ein Manometer verbaut ist. Das Wasser im Tensiometer steht über die Poren der Zelle mit dem Bodenwasser in Verbindung. Mit zunehmender Austrocknung des Bodens steigt die Saugspannung im Boden an, wodurch im Plexiglasrohr des Tensiometers ein Unterdruck entsteht. Problematisch bei Tensiometern ist der Messbereich, da die Wassersäule im Rohr bereits bei ca. 700 mbar abreißt.

Eine Weiterentwicklung der direkten Saugspannungsmessung stellt die Erfassung des elektrischen Widerstands und anschließende Umrechnung der Messwerte in Saugspannungswerte dar. Sensoren dieser Art (z. B. **Watermark-Sensoren**) bestehen aus zwei Elektroden, die in ein granuläres Material eingebettet sind, das in direkter Verbindung mit dem umgebenden Boden und damit dem Bodenwasser steht. Diese wartungsfreien Sensoren liefern Messwerte bis 2000 mbar. Bei der Auswahl der Messmethode bzw. des Messsystems

ist zwingend darauf zu achten, dass eine kontinuierliche Aufzeichnung des Verlaufs der Bodenfeuchte möglich ist.

Ein grundsätzliches Problem bei der Messung der Bodenfeuchte im Freiland stellt die Heterogenität des Bodens dar. Das Finden einer repräsentativen Stelle für einen gesamten Schlag erweist sich in der Praxis häufig als schwierig. Bei starken Bodenunterschieden sollte als Messstelle ein Bereich ausgewählt werden, der dem Großteil des Feldes entspricht. Aber auch in der Reihe im Bereich des Tropfschlauchs und des Hauptwurzelsystems kann die Bodenfeuchte je nach Abschirmung der Niederschläge durch die Reben oder Lage der Wurzeln stark variieren. Dennoch können Sensoren zur Überprüfung der Bewässerungsmaßnahmen eingesetzt werden, um einen Trend zu erkennen, ob tendenziell zu viel oder zu wenig bewässert wird. In den vergangenen Jahren wurden in unterschiedlichen Feldversuchen im Hopfen Watermark-Sensoren zur Überprüfung der Bewässerungsmaßnahmen erfolgreich eingesetzt. Hinsichtlich des Einbaus dieser Bodenfeuchtesensoren sind im Hopfen folgende Punkte zu beachten:

- Einbau in der Reihe zwischen zwei Pflanzen, jeweils unterhalb der Tropfstelle
- Sensoren in unterschiedlichen Tiefen:
 - Sensor 1 knapp unter der Schneidsohle
 - Sensor 2 etwa 30 cm darunter

Des Weiteren hat sich gezeigt, dass pro Tiefe mehrere Sensoren genutzt werden sollten, um einen repräsentativen Mittelwert zu erhalten. Bewährt hat sich innerhalb einer Reihe in 3 aufeinanderfolgenden Abständen zwischen zwei Pflanzen jeweils 2 Sensoren in 2 Tiefen zu verbauen (vgl. Abb. 5.10). Wichtig ist, beim Einbau der Sensoren die jeweiligen Herstellerempfehlungen zu beachten.

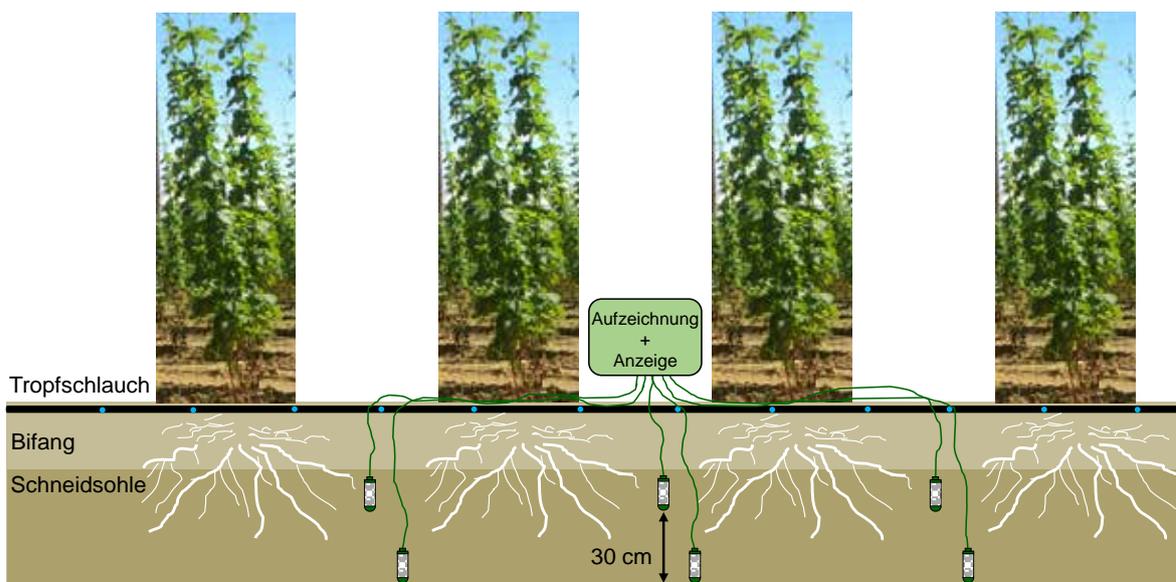


Abb. 5.10: Positionierung von Bodenfeuchtesensoren im Feld bei Hopfen (verändert nach Münsterer (2012)).

Die Messung und Erfassung der Bodenfeuchte ist eine wichtige Entscheidungshilfe zur Bewässerungssteuerung und Überwachung des Bewässerungsmanagements. Eine

Beschreibung aller Methoden und Sensoren würde den Umfang dieser Informationsbrochüre sprengen. Außerdem wurden nicht alle Sensoren im Hopfen erprobt. Weitergehende Informationen zur Erfassung der Bodenfeuchte für die Bewässerungssteuerung finden Sie im Bewässerungsforum der ALB Bayern e. V. im Beratungsblatt „Bodenfeuchtesensoren und Bewässerungssteuerung“



<https://www.alb-bayern.de/media/files/0004/bb.bef11-bodenfeuchtesensorendatenaufzeichnung-20210119.pdf/PDFBrowserview>

5.5 Düngereinspeisung – N-Düngesysteme mit Fertigation

Die Bedeutung von Düngereinspeisung und N-Düngesystemen mit Fertigation wurde bereits im Kapitel 4.1 erläutert. Verschiedene Versuchsergebnisse zeigten, dass durch Fertigation von Stickstoff bei Hopfen eine bedarfsgerechtere Stickstoffernährung und eine Stabilisierung bzw. Steigerung von Ertrag und Qualität möglich sind. Zu beachten ist, dass ein Großteil der Erkenntnisse auf Erfahrungen bei oberirdischen Tropfbewässerungssystemen beruht. Eine Beschreibung der technischen Voraussetzungen für Fertigation erfolgte im Kapitel 3.3. Im Rahmen dieses Kapitels wird auf die Planung von N-Düngesystemen mit Fertigation sowie die praktische Durchführung der Düngereinspeisung eingegangen.

N-Düngeplanung und Bewässerungsmanagement:

Ist am Betrieb eine Bewässerungsanlage mit oberirdischer Tropfschlauchverlegung auf dem Bifang (AB) vorhanden, ist es grundsätzlich sinnvoll, einen Teil der N-Menge über Fertigation auszubringen. Wichtig dabei ist, dies bereits bei der N-Düngeplanung im Frühjahr zu berücksichtigen, damit keine zusätzlichen N-Mengen ausgebracht werden. Bei der Konzipierung eines N-Düngesystems mit Fertigation sind folgende Aspekte zu beachten:

- N_{min} und Gesamthöhe der N-Düngung (Ergebnis der Düngebedarfsermittlung)
- Einsatz organischer Dünger am Betrieb, z. B. Biogassärreste
- Ausbringung stickstoffhaltiger Nährlösungen zum Hopfenputzen
- Reifezeit der Hopfensorten

Im Rahmen der Feldversuche wurden auch Systeme geprüft, bei denen hohe Anteile der gesamten N-Menge (bis zu 2/3) über Fertigation ausgebracht wurden. Dabei zeigte sich, dass bei hohen N-Anteilen über das Bewässerungswasser ein rechtzeitiger Beginn der Ausbringung über Fertigation entscheidend ist. Eine zu späte Ausbringung führte zu einer eingeschränkten Pflanzenentwicklung und zu Ertragseinbußen.

Grundsätzlich gilt: Je höher der N-Anteil über Fertigation, desto früher muss mit der Einspeisung begonnen werden.

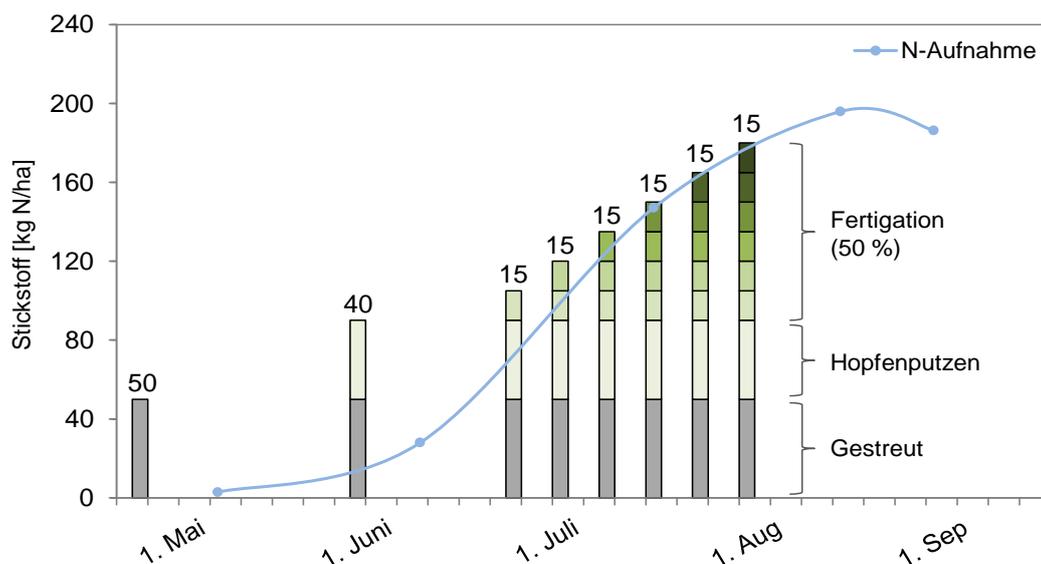
Wichtig ist deshalb, dass die Abläufe am Betrieb danach ausgerichtet werden, dass ein rechtzeitiges Auslegen der Tropfschläuche erfolgen kann, so dass die Düngereinspeisung

spätestens Ende Juni (ab Kalenderwoche 25-26) möglich ist. Die Empfehlung für die Praxis lautet auf Basis der aktuellen Datengrundlage ein Drittel bis maximal die Hälfte der gesamten N-Menge über Fertigation auszubringen. Bei frühreiferen Sorten wie Perle und Hallertauer Tradition besteht, im Gegensatz zu spätreiferen Sorten wie Herkules, grundsätzlich ein höheres Risiko für eine zu späte N-Ausbringung. Für frühere Sorten wird deshalb empfohlen, nur 1/3 der gesamten N-Menge über Fertigation auszubringen.

Beispiele für N-Düngesysteme mit Fertigation:

Bei der Erstellung eines konkreten N-Düngesystems mit Fertigation ist zu beachten, dass die Ausbringung des N-Anteils über das Bewässerungswasser möglichst während der Hauptwachstumsphase im Zeitraum zwischen Mitte Juni und Anfang August erfolgen sollte. Im Rahmen verschiedener Feldversuche (vgl. Kapitel. 4.3) zeigte sich, dass ab Anfang August keine nennenswerten N-Mengen mehr ausgebracht werden sollten, da eine hohes N-Versorgungsniveau im Zeitraum der Alphasäurebildung negative Auswirkungen auf den Alphasäuregehalt haben kann. Zudem sollten über eine einzelne Wassergabe maximal 20 kg N/ha und Woche ausgebracht werden.

Beispiel 1: Mineralisches N-Düngesystem mit 50 % Fertigation



Monat Kalenderwoche	April				Mai				Juni				Juli				August				Gesamt [kg N/ha]	Fertigation Anteil		
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33			34	35
N-Menge [kg N/ha]				50					40			15	15	15	15	15	15						180	50%

Abb. 5.11: Beispiel 1 - Mineralisches N-Düngesystem mit 50 % Fertigation und Ausbringung ab KW25.

In dem ersten Beispiel beträgt die Gesamthöhe der N-Düngung 180 kg N/ha (vgl. Abb. 5.11). Zunächst wird im April eine einzelne N-Gabe in Höhe von 50 kg N/ha gestreut ausgebracht (z. B. über KAS). Anschließend folgt im Mai die Ausbringung von weiteren 40 kg N/ha über das Hopfenputzen (AHL oder AN-Lösung). Weitere 90 kg N/ha werden dann

ab Kalenderwoche 25 über 6 Einzelgaben (je 15 kg N/ha) über einen Zeitraum von 6 Wochen über Fertigation ausgebracht.

Ist die Ausbringung des N-Anteils über Fertigation erst ab Kalenderwoche 26 möglich, kann die Verteilung der 90 kg N/ha auch auf 5 Gaben zu je 18 kg N/ha erfolgen (vgl. Tab. 5.4).

Tab. 5.4: Beispiel 1 - Mineralisches N-Düngesystem mit 50 % Fertigation und Ausbringung ab KW26.

Monat Kalenderwoche	April				Mai					Juni				Juli				August					Gesamt [kg N/ha]	Fertigation Anteil
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
N-Menge [kg N/ha]				50					40				18	18	18	18	18						180	50%

Beispiel 2: Mineralisches N-Düngesystem mit 33 % Fertigation

Soll z. B. bei früheren Hopfensorten lediglich ein Drittel der benötigten N-Menge über Fertigation ausgebracht werden, können 6 Einzelgaben ab KW 25 mit je 10 kg N/ha wöchentlich eingespeist werden. Alternativ kann die Verteilung des N-Anteils über Fertigation (60 kg N/ha) ab KW 26 auch auf 5 Gaben zu je 12 kg N/ha erfolgen.

Tab. 5.5: Beispiel 2 - Mineralisches N-Düngesystem mit 33 % Fertigation und Ausbringung ab KW25 bzw. KW26.

Monat Kalenderwoche	April				Mai					Juni				Juli				August					Gesamt [kg N/ha]	Fertigation Anteil	
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35			
N-Menge [kg N/ha]				60					60			10	10	10	10	10	10						180	33%	
				↓ Gestreut					↓ Hopfenputzen oder Gestreut			↓ Fertigation													

Monat Kalenderwoche	April				Mai					Juni				Juli				August					Gesamt [kg N/ha]	Fertigation Anteil
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35		
N-Menge [kg N/ha]				60					60				12	12	12	12	12						180	33%

Beispiel 3: Mineralisches / Organisches N-Düngesystem mit 28 % Fertigation

Werden am Betrieb organische Düngemittel, z. B. Biogasgärreste, Rinder- oder Schweinegülle eingesetzt, verringert sich i.d.R. die N-Menge, die über Fertigation ausgebracht werden kann.

Tab. 5.6: Beispiel 3: Mineralisches / Organisches N-Düngesystem mit 28 % Fertigation.

Monat Kalenderwoche	April				Mai					Juni				Juli				August					Gesamt [kg N/ha]	Fertigation Anteil		
	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35				
N-Menge [kg N/ha]				50					80				10	10	10	10	10						180	28%		
				↓ Gestreut					↓ Org. Düngung z.B. Gärreste				↓ Fertigation													

Festlegung des Düngemittels:

Als Stickstoffdüngemittel zur Einspeisung ins Bewässerungssystem wurde im Rahmen 4-jähriger Feldversuche hauptsächlich Ammoniumnitrat-harnstoff-Lösung (AHL) mit 28 % N eingesetzt. Der im AHL enthaltene Stickstoff setzt sich zusammen aus:

- 50 % Harnstoff ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)
- 25 % Ammonium (NH_4^+)
- 25 % Nitrat (NO_3^-)

Dabei ist zu beachten, dass der im AHL enthaltene Harnstoff-Anteil bei hohen Bodentemperaturen im Sommer innerhalb weniger Tage zu Ammonium und anschließend zu Nitrat umgewandelt wird und der Pflanze somit voll zur Verfügung steht. Ein wesentlicher Vorteil von AHL ist, dass das Handling im Vergleich zu Spezialnährsalzen, die zunächst in Wasser gelöst werden müssen, deutlich einfacher ist. Grundsätzlich können aber auch andere für Bewässerung geeignete Nährsalze eingesetzt werden. Jedoch zeigte sich in Versuchen, dass z. B. der Einsatz eines reinen Ammonium- oder Ammoniumnitratsalzes im Vergleich zu AHL zu keinem Vorteil führt.

Vorgehensweise bei der Düngereinspeisung:

Möglichkeit 1: Nur einzelne Wassergaben enthalten Stickstoff

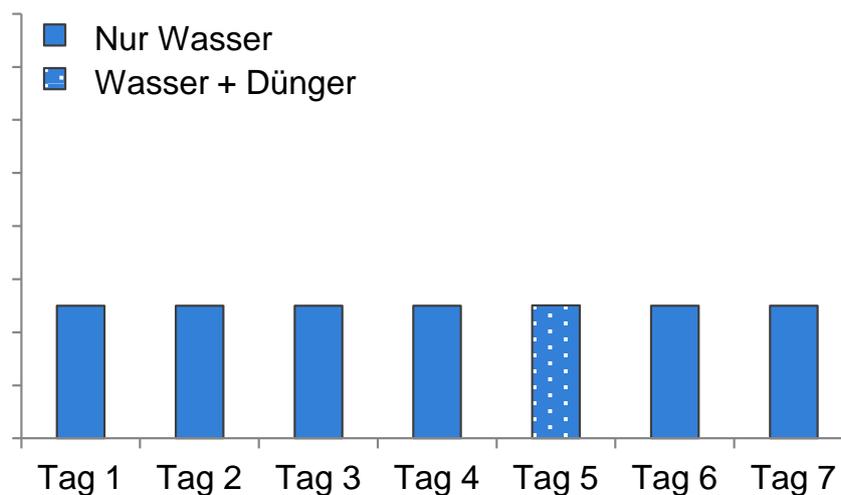


Abb. 5.12: Düngereinspeisung – Nur einzelne Wassergaben enthalten Stickstoff.

Enthalten nur einzelne Wassergaben Stickstoff, ist es auch in Jahren mit geringem oder keinem Bewässerungsbedarf einfach möglich, durch wenige kleine Wassergaben den im Frühjahr festgelegten N-Anteil über Fertigation auszubringen. Grundsätzlich erwies sich das in den Feldversuchen genutzte System mit einer Düngergabe pro Woche als effektiv und praxistauglich.

Möglichkeit 2: Jede Wassergabe enthält Stickstoff

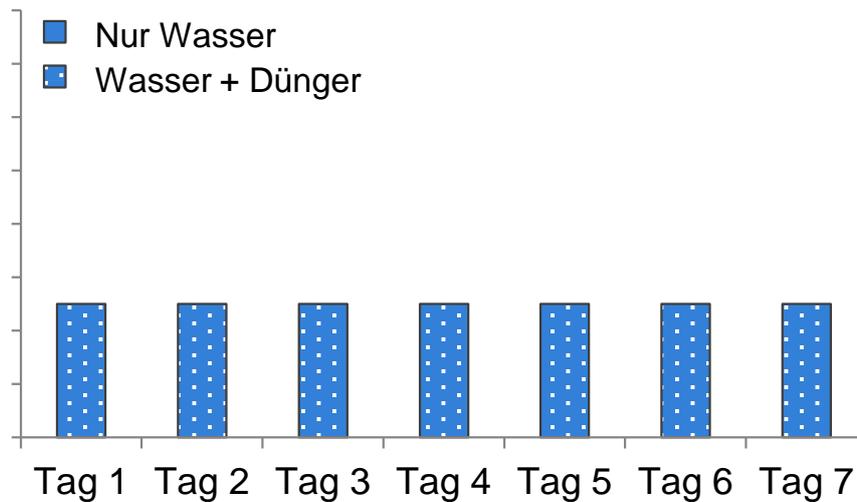


Abb. 5.13: Düngereinspeisung – Jede Wassergabe enthält Stickstoff.

Enthält jede Wassergabe eine geringe Menge an Stickstoff, ist die Planung aufwendiger, da der witterungsabhängige Bewässerungsbedarf und somit die Anzahl der auszubringenden Wassergaben variiert. Es empfiehlt sich etwa eine Woche im Voraus zu planen und die Düngerkonzentration wöchentlich anzupassen.

Soll an einem konkreten Termin eine definierte N-Menge ausgebracht werden, sind folgende Punkte zu beachten:

- **Begrenzung der Höhe der Wassergabe:**

Damit der über das Bewässerungswasser ausgebrachte Dünger bzw. Stickstoff nicht außerhalb der intensiv durchwurzelt Zone verlagert wird, sollte die Höhe der Wassergabe begrenzt werden. Jedoch sollte auch eine bestimmte Mindesthöhe eingehalten werden, um eine ausreichende Verteilung zu erreichen. Bei oberirdischer Bewässerung (AB) werden folgende Wassergaben empfohlen:

- Sandboden: mindestens 3 bis maximal 4 Stunden (19 – 25 m³)
- Lehmboden: mindestens 3 bis maximal 6 Stunden (19 – 38 m³)

Wird aufgrund hoher Verdunstungsraten täglich bewässert, sollte auch in den darauffolgenden zwei Tagen die Höhe der Einzelgaben begrenzt und die genannten Wassermengen nicht überschritten werden.

- **Berechnung der auszubringenden Menge:**

Die unterschiedlichen Dosierpumpen arbeiten in der Regel auf Volumenbasis. Je nachdem, welche Technik vorhanden ist, muss deshalb zunächst die einzuspeisende Menge in Liter berechnet werden.

Berechnungsbeispiel:

N-Gabe: 10 kg N/ha

Fläche: 3 Schläge (1,5 + 0,5 + 2,0) = 4,0 ha

Düngemittel: AHL (28 % N) mit 358 g N pro Liter

Rechenweg:

1) $4,0 \text{ ha} \times 10 \text{ kg N/ha} = 40 \text{ kg N}$

2) $40 \text{ kg N} / 0,358 \text{ kg N/Liter} = \underline{\underline{111,7 \text{ Liter AHL}}}$

Um auf einer Fläche von 4,0 ha eine N-Menge von 10 kg N/ha über AHL auszubringen, müssen 111,7 Liter AHL in das Bewässerungssystem dosiert werden.

· Gleichmäßige Düngerverteilung im Feld:

Eine homogene Düngerverteilung bedeutet, dass sowohl am Anfang als auch am Ende eines jeden Tropfschlauches dieselbe Nährstoffmenge ausgebracht wird. Um dies zu garantieren, sind folgende Aspekte zwingend zu beachten:

- 1) Keine Leckagen an den Tropfschläuchen, zu erkennen an größeren Wasseransammlungen im Feld (Vgl. Abb. 5.14).
- 2) Vor Beginn eines Einspeisevorgangs müssen alle Tropfschläuche der zu bewässernden Schläge vollständig gefüllt **UND** der Betriebsdruck muss erreicht sein.
- 3) Nach Abschluss des Einspeisevorgangs muss eine ausreichende Nachlaufzeit mit reinem Wasser eingehalten werden, damit sich der im Bewässerungssystem befindliche Dünger gleichmäßig im Feld verteilt.



Abb. 5.14: Leckage an den Tropfschläuchen durch falsche Befestigung am Reihenende (links) oder mechanische Beschädigung des Tropfschlauches innerhalb der Reihe (rechts).

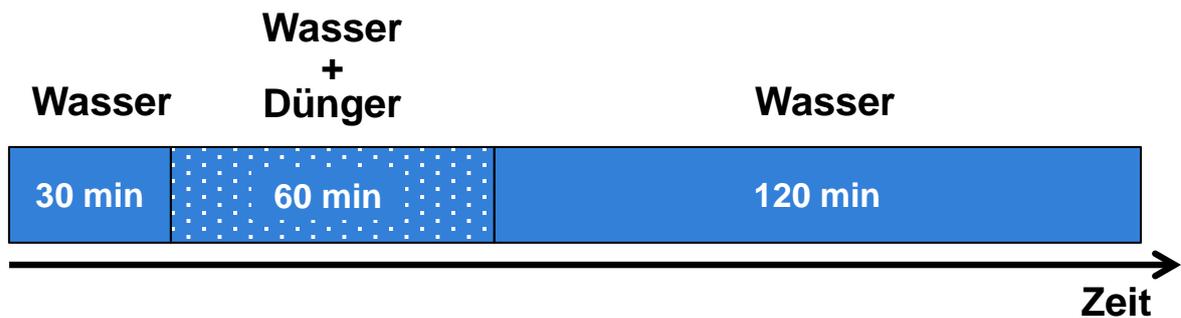


Abb. 5.15: Beispiel eines Einspeisevorgangs mit 3,5 Std. Gesamtlaufzeit.

Die erforderliche Nachlaufzeit ist abhängig von:

- Zeitdauer, die das Wasser vom Einspeisepunkt bis zum Anfang der Tropfschläuche benötigt
- Länge des Tropfschlauches bzw. Zeitdauer, bis die gesamte Wassermenge eines Schlauches ersetzt wird

Weitere Hinweise zur Düngereinspeisung:

Die erläuterten Vorgehensweisen zur Fertigation basieren im Wesentlichen auf Erfahrungen bei oberirdischer Bewässerung. Aufgrund folgender Punkte ist eine direkte Übertragbarkeit auf unterirdische Bewässerungssysteme nicht gegeben:

- Lagerungsdichte und schädliche Bodenverdichtungen
- Lufthaushalt
- N-Umsetzungsverhalten
- Versickerungstiefe
- Wurzelmorphologie und Wurzeltypen

Bei unterirdischen Bewässerungssystemen sollte, wie im Kapitel 4 erläutert, ein möglichst großes Bodenvolumen durchfeuchtet werden. Dies gilt vor allem im Hinblick auf die Verteilung ausgebrachter Stickstoffgaben. Dabei ist jedoch zwingend darauf zu achten, dass eine Versickerung des Wassers außerhalb des intensiv durchwurzelten Bereichs ausgeschlossen wird. Folglich eignen sich nur Böden mit ausreichender horizontaler Wasserverteilung für die Düngereinspeisung bei unterirdisch verlegten Tropfschläuchen.

Versuchsergebnisse weisen darauf hin, dass die Wirkung unterirdisch ausgebrachter N-Gaben auf schweren Böden im Vergleich zur oberirdischen Ausbringung verzögert eintritt.

Der Einsatz von AHL wurde bei unterirdischen Bewässerungssystemen nicht auf allen Bodenarten getestet. Auf leichten und mittleren Böden zeigte sich jedoch eine positive Wirkung. Auf sehr schweren Böden mit hohen Tongehalten könnten die N-Umsetzungsprozesse durch die kühleren Temperaturen und den Sauerstoffmangel beeinflusst werden.

Grundsätzlich können alle Pflanzennährstoffe über Fertigation ausgebracht werden. Es gibt eine Vielzahl an unterschiedlichen Spezialnährsalzen für die Bewässerung. Untersucht wurde bisher vor allem die Ausbringung von Stickstoff über Fertigation. In kleineren und deutlich weniger umfangreichen Teilversuchen wurde auch geprüft, wie sich die

Ausbringung von Phosphat, Kali und Magnesium auswirkt. Eindeutig positive Effekte wurden bisher nicht festgestellt. Jedoch ist nicht ausgeschlossen, dass auch die Ausbringung dieser Nährstoffe über Fertigation, z. B. an Standorten mit geringer Bodenversorgung, oder aber bei sehr lang anhaltender und starker Trockenheit, zu positiven Effekten führen kann.

6 Literatur

- ALB Bayern (ed.) (2020):** *Bewässerungsforum Bayern: Ausgabe 1 - 4/2020*. Available at: www.alb-bayern.de/bef1 (Accessed 24.11.2020).
- ALB Bayern (2020):** *Bewässerung*. Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und Landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V., Freising-Weihenstephan. Available at: <https://www.alb-bayern.de/> (Accessed 24.11.2020).
- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M. (1998):** *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper, 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom.
- Eckelmann W., ed. (2005):** *Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 103 Tabellen und 31 Listen*, 5th edn. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele und Obermiller), Stuttgart.
- Engelhard B., Kammhuber K., Lutz A., Lachermeier U., Bergmeier M. (2011):** *Blattflächenentwicklung und Ertragsaufbau wichtiger Hopfensorten*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. LfL-Schriftenreihe 11/2011.
- Graf T. M. (2016):** *Tröpfchenbewässerung im Hopfenbau - Feldversuche, Physiologie und Rhizosphäre*. Dissertation. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Hagin J., Sneh M., Lowengart-Aycicegi A. (2003):** *Fertigation: Fertilization through Irrigation*. International Potash Institute. IPI Research Topics 23. Available at: <https://www.ipipotash.org/udocs/39-fertigation-fertilization-through-irrigation.pdf>. (Accessed 22.09.2020).
- ICID (ed.) (2016):** *Agricultural Water Management for Sustainable Rural Development: Annual Report 2015-16*. International Commission on Irrigation and Drainage. Available at: http://www.icid.org/ar_2015.pdf (Accessed 24.11.2020).
- Kafkafi U., Tarchitzky J. (2011):** *Fertigation: A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management*. Available at: http://www.haifa-group.com/files/Articles/ifa_fertigation-Kafkafi-511.pdf (Accessed 24.08.2020).
- LfL (2020):** *Grünes Heft: Hopfen 2020*. Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, Arbeitsbereich Hopfen. LfL-Information. Available at: https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/hopfen_gr%C3%BCnes_heft_2020.pdf (Accessed 24.11.2020).
- Müller M., Demmel M., Sander G. (2020):** Bewässerungs-App - Ein webbasiertes Entscheidungssystem für bedarfsgerechtes Bewässern. In: ALB Bayern (ed.) *Bewässerungsforum Bayern: Ausgabe 1 - 4/2020*, Freising-Weihenstephan. Available at www.alb-bayern.de/bef1 (Accessed 24 November 2020).
- Müller M., Ebertseder F. (2020):** Fachliche Grundlagen zur Bewässerungs-App, Teil 2: Bodenart und Verteiltechnik bezogene Kennzahlen. In: ALB Bayern (ed.) *Bewässerungsforum Bayern: Ausgabe 1 - 4/2020*, Freising-Weihenstephan. Available at www.alb-bayern.de/bef1 (Accessed 24 November 2020).
- Müller M., Zinkernagel J., Kleber J., Fricke E., Beck M., Göttl M. (2020):** Fachliche Grundlagen zur Bewässerungs-App, Teil 1: Kulturartbezogene Kennzahlen. In: ALB Bayern (ed.) *Bewässerungsforum Bayern: Ausgabe 1 - 4/2020*, Freising-Weihenstephan. Available at www.alb-bayern.de/bef1 (Accessed 24 November 2020).
- Münsterer J. (2012):** Untersuchungen möglicher Methoden zur Steuerung der Tröpfchenbewässerung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed.) *Jahresbericht 2011: Sonderkultur Hopfen*, pp. 84–88, Freising-Weihenstephan.
- Niedermeier E. (2020):** Persönliche Mitteilung, 12 November.
- Portner J., Roßbauer G., Bauer M. (2007):** *Nährstoffaufnahme des Hopfens*. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Available at: <https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/artikelnaehrstoffaufnahme.pdf> (Accessed 18.02.2020).
- Schütze N., Lubrich T., Khaddam I., Jung C. (2013):** *Atlas der Bewässerung: Ober- und unterirdische Tropfer: Die Ausbreitung des Wassers im Boden beim Einzeltropfer*. Technische Universität Dresden. Institut für Hydrologie und Meteorologie. Available at: https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/ihtm/hydrologie/ressourcen/dateien/forschung/Projekte/saphir/atlanterfolder/atlas_tropfer.pdf?lang=de (Accessed 20.01.2020).
- Stampfl J. (2017):** *Auswirkungen von Fertigation und Tropfschlauchpositionierung auf den Ertrag und die Inhaltsstoffe von Hopfen (Humulus lupulus)*. Masterarbeit. Technische Universität München, Freising-Weihenstephan.
- Stampfl J. (2020):** *Bedarfsgerechte Stickstoffernährung von Hopfen (Humulus Lupulus L.) durch Düngesysteme mit Fertigation*. Dissertation. Universität Hohenheim, Stuttgart.